CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

MODELAGEM DE UM ABSORVEDOR DE VIBRAÇÕES DO TIPO *HONEYCOMB* COM ELEMENTOS DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Gabriel Guimarães Averbug

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre.

Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

Coorientador: Marcelo Amorim Savi

Rio de Janeiro
Outubro de 2017

MODELAGEM DE UM ABSORVEDOR DE VIBRAÇÕES DO TIPO *HONEYCOMB* COM ELEMENTOS DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre.

Gabriel Guimarães Averbug

Banca Examinadora:

Presidente, Prof. D.Sc. Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco (CEFET/RJ) (orientador)

Prof. D.Sc. Marcelo Amorim Savi (UFRJ) (Coorientador)

Prof. D.Sc. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar (CEFET/RJ)

Prof. D.Sc. Alberto Paiva (UFF)

Rio de Janeiro
Outubro de 2017

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

A952 Averbug, Gabriel Guimarães
Modelagem de um absorvedor de vibrações do tipo *honeycomb* com elementos de ligas com memória de forma / Gabriel Guimarães Averbug.—2017.
86f. + apêndice e anexo : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2017.
Bibliografia : f. 84-86
Orientador : Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco
Coorientador : Marcelo Amorim Savi

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

CDD 620.16

Agradecimentos

Gostaria primeiramente de prestar agradecimentos a meus membros familiares, sobretudo a minha mãe, Mayra Cristina Guimarães Averbug, por seu enorme carinho e incansável incentivo nos momentos mais necessários da execução deste trabalho. Seus ensinamentos como figura materna e seu exemplo como pesquisadora e docente semearam em mim características sem as quais, os rumos deste trabalho não teriam tido o mesmo êxito. Agradeço também a minha irmã, Larissa Guimarães Averbug, por transbordar confiança e ânimo através de suas acolhedoras palavras, repletas de motivação.

Gostaria também de expressar minha gratidão ao Prof. Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco, por sua orientação e paciência, com as quais conduziu este projeto. Agradeço-lhe também por sua atuação como professor e mentor acadêmico, tanto no na graduação e mestrado, quanto em projetos paralelos de iniciação científica. Agradeço também ao Prof. Marcelo Amorim Savi por integrar de maneira tão consistente esse projeto e por me receber em seu laboratório, disponibilizando de seu tempo e infraestrutura laboratorial.

Agradeço também imensamente aos colegas de pesquisa Brenno Duarte, Arthur Adeodato, Marina Castro e Antônio Candido, por suas generosas contribuições de naturezas distintas a esse projeto e por criarem um rico ambiente acadêmico colaborativo.

A imaginação é a mais elevada forma de pesquisa.

Albert Einstein

Sumário

Introdução 16

I. Ligas com Memória de Forma 19

I.1 Introdução às ligas com memória deforma 19

I.2 Transformação de fase induzida por temperatura 19

I.3 Efeito de memória deforma 20

I.4 Pseudoelasticidade 21

I.5 Plasticidade induzida por transformação de fase 22

I.6 Efeito de memória de forma reversível 23

I.7 Aplicações com ligas com memória de forma 24

I.8 Atenuadores de vibração 28

II. Metodologia 33

II.1 Parâmetros de análise dos resultados e critérios adotados 39

II.2 Modelos numéricos do absorvedor em S de *SMA* 41

II.3 Modelo constitutivo para a modelagem de ligas com memória de forma 43

II.4 Calibração do modelo numérico 47

III. Resultados 50

III.1 Análise de convergência 52

III.2 Análise de convergência no espaço 53

III.3 Análise de convergência no tempo 58

III.4 Estudo da influência da variação do índice i na dissipação de energia e rigidez 59

III.5 Estudo da influência da variação do número de dobras *n* na dissipação de energia e rigidez 64

III.6 Estudo da influência do modo de carregamento na rigidez 72

III.7 Comparação da capacidade dissipativa do absorvedor em S com uma barra sob carregamento axial puro 76

III.8 Comparação da capacidade dissipativa do absorvedor em S com outros tipos de molas 80

IV. Conclusão..... 82

Referências Bibliográficas..... 84

Apêndice I..... 87

Anexo I..... 97

Lista de Ilustrações

Figura I-1 – Transformação de fase induzida por temperatura. 20

Figura I-2 – Efeito de Memória de Forma. 21

Figura I-3 – Efeito pseudoelástico em ligas com memória de forma. 22

Figura I-4 – Carregamento térmico cíclico de um fio de *SMA* sob tensão constante de 200 MPa. 23

Figura I-5 – Princípio de funcionamento da junta de acoplamento de *SMA.* 24

Figura I-6 – Filtro de Simon. 25

Figura I-7 – *Stents* auto expansíveis nas configurações expandida e compacta. 26

Figura I-8 – Diagrama de densidade de energia de atuação de diversas classes de materiais inteligentes. 27

Figura I-9 – Diagrama de frequência de atuação de diferentes classes de materiais inteligentes. 27

Figura I-10 – Modelo de um dedo protético atuado por *SMAs.* 28

Figura I-11 – Queda da ponte de Tacoma (1940). 29

Figura I-12 – Desenho representativo do sistema com um grau de liberdade proposto por Saadat *et al.* (2001). 30

Figura I-13 – Modelos experimentais de sistemas compósitos com *SMAs* desenvolvidos por Matsuzaki *et al.* (2005). 31

Figura I-14 – Protótipo na configuração indeformada 32

Figura II-1 – Absorvedor em S de SMA de estrutura do tipo *honeycomb.* 33

Figura II-2–Geometria simples do absorvedor em S com uma dobra (módulo). 35

Figura II-3 – Geometria do absorvedor em S com duas dobras. 36

Figura II-4 – Geometrias de 3 (a), 4 (b) e 5 (c). 36

Figura II-5 – Absorvedor em S de *SMA* nos modos de carregamento compressivo (a) e trativo (b). 37

Figura II-6 – Resultados experimentais de energia dissipada por número de ciclos ... 40

Figura II-7 – Condições de contorno e carregamento no modelo numérico do Absorvedor em S de *SMA.* 42

Figura II-8 – Representação esquemática dos parâmetros do modelo idealizado por Auricchio e Petrini (2004). 44

Figura II-9 – Variação do parâmetro h. 45

Figura II-10 – Variação do parâmetro $\boldsymbol{R}$. 45

Figura II-11 – Variação do parâmetro $\boldsymbol{\beta}$. 46

Figura II-12 – Variação do parâmetro $\boldsymbol{\varepsilon L}$. 46

Figura II-13 – Dimensões dos corpos de prova de seção retangular utilizados por Xi Xie *et al*. (2016) – medidas em milímetros. 47

Figura II-14 – Modelo numérico em ANSYS do ensaio de tração uniaxial do corpo de prova de seção retangular utilizado por Xi Xie *et al.* (2016). 48

Figura II-15 – Resultados numéricos da distribuição de tensão equivalente de *von Mises* sob deformação de 0,46%. 48
Figura II-16 – Superposição entre as curvas histerética experimental e numérica. 49
Figura III-1 – Malhas com fator igual a 2 (a) e 4 (b). 53
Figura III-2 – Malhas com fator igual a 6 (a) e 8 (b). 54
Figura III-3 – Malhas com fator igual a 10 (a) e 12 (b)..... 54
Figura III-4 – Malhas com fator igual a 14 (a) e 16 (b)..... 55
Figura III-5 – Análise de convergência no espaço da geometria de n=1 e i=0,75..... 55
Figura III-6 – Malhas com fator igual a 2 (a) e 4 (b). 56
Figura III-7 – Malhas com fator igual a 6 (a) e 8 (b). 56
Figura III-8 – Malhas com fator igual a 10 (a) e 12 (b)..... 57
Figura III-9 – Malhas com fator igual a 14 (a) e 16 (b)..... 57
Figura III-10 – Análise de convergência no espaço da geometria de n=10 e i=2..... 58
Figura III-11 – Análise de convergência no tempo. 59
Figura III-12 – Curvas γ versus i (a) e força-deslocamento (b) para as geometrias de n=1 no modo de carregamento trativo. 60
Figura III-13– Curvas γ versus i (a) e força-deslocamento (b) para as geometrias de n=2 no modo de carregamento trativo. 61
Figura III-14– Curvas γ versus i (a) e força-deslocamento (b) para as geometrias de n=3 no modo de carregamento trativo. 61
Figura III-15 – Curvas γ versus i (a) e força-deslocamento (b) para as geometrias de n=4 no modo de carregamento trativo. 62
Figura III-16 – Curvas γ versus i (a) e força-deslocamento (b) para as geometrias de n=5 no modo de carregamento trativo. 62
Figura III-17 – Curvas γ versus i (a) e força-deslocamento (b) para as geometrias de n=6 no modo de carregamento trativo. 63
Figura III-18 – Distribuição de fração volumétrica de martensita para as geometrias de n=1 com i=0,75 (a) e n=1 com i=1 (b). 63
Figura III-19 – Distribuição de fração volumétrica de martensita para a geometria de n=1 com i=1,5 64
Figura III-20 – Curvas força-deslocamento (a) e γ versus n (b) para as geometrias de i=2 no modo de carregamento trativo..... 65
Figura III-21 – Curva força-deslocamento normalizado para as geometrias de i=2 no modo de carregamento trativo. 66
Figura III-22 – Curva da energia dissipada e volume normalizados pelo número de dobras n para as geometrias com índice i=2..... 67
Figura III-23 – Influência das não linearidades geométricas nos gráficos força-deslocamento (a) e γ versus n (b) para as geometrias de i=2 no modo de carregamento trativo. 68
Figura III-24 – *Plots* da distribuição de tensão equivalente segundo *von Mises* (a) e de fração volumétrica de martensita (b) para n=1 e i=2. 69

Figura III-25 – *Plots* da distribuição de tensão equivalente segundo *von Mises* (a) e de fração volumétrica de martensita (b) para *n*=2 e *i*=2. 69

Figura III-26 – *Plots* da distribuição de tensão equivalente segundo *von Mises* (a) e de fração volumétrica de martensita (b) para *n*=3 e *i*=2. 70

Figura III-27 –*Plots* da distribuição de tensão equivalente segundo *von Mises* (a) e de fração volumétrica de martensita (b) para *n*=5 e *i*=2. 70

Figura III-28 – *Plots* da distribuição de tensão equivalente segundo *von Mises* para *n*=10 e *i*=2. 71

Figura III-29 – *Plots* da distribuição de fração volumétrica de martensita para *n*=10 e *i*=2. 71

Figura III-30 – Curva γ versus *n* para as geometrias de *i*=0,75, *i*=2 e *i*=4 no modo de carregamento trativo. 72

Figura III-31 – Curva força-deslocamento para as geometrias de *n*=1 nos modos de carregamento trativo e compressivo. 73

Figura III-32– Curva força-deslocamento para as geometrias de *n*=2 nos modos de carregamento trativo e compressivo. 74

Figura III-33– Curva força-deslocamento para as geometrias de *n*=3 nos modos de carregamento trativo e compressivo. 74

Figura III-34 – Curva força-deslocamento para as geometrias de *n*=4 nos modos de carregamento trativo e compressivo. 75

Figura III-35 - Curva força-deslocamento para as geometrias de n=5 nos modos de carregamento trativo e compressivo. 75

Figura III-36 – Configuração deformada final sob o modo de carregamento trativo (a) e compressivo (b). 76

Figura III-37 – *Plot* da distribuição de tensão equivalente segundo *von Mises* para a barra axial (a) e o absorvedor em S com *n*=6 e *i*=4 (b). 78

Figura III-38 – Comparação dos laços de histerese no gráfico $F \times u$ da barra axial e do absorvedor em S com *n*=10 e *i*=4 no modo de carregamento trativo. 78

Lista de Tabelas

Tabela II-1 – Parâmetros utilizados para definir a geometria do módulo básico. 34

Tabela II-2 – Casos do estudo de otimização no modo de carregamento compressivo. 37

Tabela II-3 – Casos do estudo de otimização no modo de carregamento trativo 38

Tabela II-4 – Parâmetros constitutivos obtidos após a calibração. 49

Tabela III-1 – Deslocamentos prescritos com as respectivas tensões de saída para as geometrias no modo de carregamento compressivo. 51

Tabela III-2 – Deslocamentos prescritos com as respectivas tensões de saída para as geometrias no modo de carregamento trativo. 52

Tabela III-3 – Número de elementos para diferentes fatores de refinamento da malha para a geometria de n=1 e i=0.75. 55

Tabela III-4 – Número de elementos para diferentes fatores de refinamento da malha para a geometria de n=10 e i=2. 57

Tabela III-5 – Coeficientes de forma e capacidade de armazenamento de energia para diversos tipos de mola. 79

Tabela III-6 – Resumo dos valores dos coeficientes de forma de molas com elementos pseudoelásticos. 81

Lista de Símbolos Gregos

β – *Fator de dependência da tensão com a temperatura*

ε – Deformação

ε_L – Deformação final de transformação de fase

ε_{tr} – Deformação de transformação de fase

ξ_M – Fração volumétrica de transformação de fase

γ – Energia dissipada por unidade de volume

Ψ – Energia livre de Helmholtz

σ – Tensão

σ_c – Tensão de compressão

σ_{MISES} – Tensão segundo o critério de *von Mises*

σ_t – Tensão de tração

Lista de Símbolos Latinos

A_f – Temperatura final de transformação da austenita

A_s – Temperatura inicial de transformação da austenita

C_f – Coeficiente de forma

E – Módulo de elasticidade

E_A - Módulo de elasticidade da austenita

E_d – Energia dissipada

E_M - Módulo de elasticidade da martensita

F – Força

h – Coeficiente de endurecimento

i – Índice de esbeltez

m – Parâmetro de Lode

M_f – Temperatura final de transformação da martensita

M_s – Temperatura inicial de transformação da martensita

n – Número de dobras

R – Raio de curvatura

$R(T)$ – Raio do domínio elástico

t – Espessura de parede

T – Temperatura

T_0 – Temperatura de referência

u – Deslocamento

V – Volume

RESUMO

Ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys – SMAs*) são materiais inteligentes capazes de desenvolver grandes forças e deslocamentos devido a seu complexo comportamento termomecânico associado a transformações de fase. O efeito pseudoelástico, presente em ligas austeníticas, está associado a um comportamento histerético na curva tensão-deformação. Ligas de níquel-titânio e à base de cobre apresentam uma significativa densidade volumétrica de energia e têm sido, portanto, amplamente aplicadas em sistemas envolvendo absorvedores de vibração. O projeto de geometrias que propiciem alta capacidade dissipativa representa um grande desafio para a construção de absorvedores de vibração de *SMA* em função das não linearidades constitutivas e geométricas existentes. O presente trabalho apresenta uma metodologia baseada no método de elementos finitos desenvolvida para avaliar a capacidade de dissipação de energia de um absorvedor de vibrações com elementos de *SMA* em forma de S conectados a placas para formar uma estrutura do tipo *honeycomb*. Um modelo constitutivo com variáveis internas é utilizado para descrever o comportamento pseudoelástico da *SMA*. O modelo proposto é utilizado como uma ferramenta para analisar a distribuição de transformação de fase de modo a estabelecer geometrias de absorvedores de vibração com elementos de *SMA* de elevada capacidade de dissipação de energia mecânica.

Palavras-chave: Ligas com memória de forma; pseudoelasticidade; absorvedores de vibração; estruturas *honeycomb*; método de elementos finitos.

MODELAGEM DE UM ABSORVEDOR DE VIBRAÇÕES DO TIPO *HONEYCOMB* COM ELEMENTOS DE LIGAS COM MEMÓRIA FORMA

Modelling of a Honeycomb Vibration Absorber with Shape Memory Alloys Elements

ABSTRACT

Shape memory alloys (SMAs) are intelligent materials, which can develop significant loads and displacements due to their complex thermomechanical behavior related to phase transformation. Pseudoelastic effect occurs in austenitic SMAs and is associated to the hysteretic behavior observed in the stress-strain curve. Nickel-titanium and copper based alloys present a significant volumetric density of energy and have been broadly applied in systems involving energy absorbers. The design of geometries with high dissipation capability represents a great challenge for the construction of SMA vibration absorbers due to the existing constitutive and geometric non-linearities. This work presents a methodology based on the finite element method developed to study the energy dissipation capability of a vibration absorber with SMA S-shaped elements connected to plates to form a honeycomb structure. A constitutive model with internal variables is used to describe the pseudoelastic behavior of the SMA. The proposed model is used as a tool for analyzing phase transformation distribution in order to establish geometries of vibration absorbers with SMA elements with high capacity of dissipating mechanical energy.

Keywords: shape memory alloys; pseudoelasticity; vibration absorbers; honeycomb structures; finite element method.

Introdução

As Ligas com Memória de Forma (*Shape Memory Alloys – SMAs*) são materiais inteligentes que, devido a seu complexo comportamento termomecânico associado a processos de transformação de fase, são capazes de gerar forças e deslocamentos significativos. Duas fases estão presentes: austenita, estável para um estado livre de tensões a altas temperaturas, e martensita, estável para um estado livre de tensões a baixas temperaturas. Dentre os fenômenos apresentados por esses materiais, destacam-se a pseudoelasticidade e o efeito de memória de forma. As propriedades termomecânicas dos materiais das *SMAs* somadas à sua biocompatibilidade possibilitam que sejam aplicadas em diversas áreas, como a biomedicina e os setores aeroespaciais, automotivos e de exploração de petróleo (Petrini e Migliavacca, 2011; Nava *et al.*, 2014; Lagoudas, 2008).

A pseudoelasticidade ou superelasticidade é o fenômeno responsável pela recuperação de altas deformações induzidas por tensão à temperatura constante (Lagoudas, 2008). Devido a seu comportamento histerético, as *SMAs* dissipam energia mecânica a cada ciclo de carregamento-descarregamento, o que torna apropriado seu uso como elementos atenuadores de vibração. Além disso, como as duas fases presentes possuem diferentes módulos de elasticidade, a rigidez de elementos de materiais pseudoelásticos varia ao longo do processo de transformação de fase. Esses efeitos podem ser utilizados para alterar o comportamento dinâmico de sistemas mecânicos (Pugliese e Casey, 2012). Outra característica marcante nas ligas com memória de forma é a capacidade de restaurar seu ponto de equilíbrio (*recentering*) através de transformação de fase induzida por tensão (Pugliese e Casey, 2012).

Ao longo dos anos, diversos tipos de absorvedores de energia têm sido desenvolvidos com formas distintas. Como cada tipo de elemento atenuador é capaz de dissipar energia em modos diferentes, as respostas nos sistemas em que são aplicados variam amplamente. Olabi*et al.* (2007) apresentaram uma visão geral de absorvedores de energia metálicos no formato de tubos. Shaw *et al.*(2007) realizaram um estudo para o projeto e fabricação de estruturas celulares do tipo *honeycomb* (colmeia de mel) de ligas pseudoelásticas de NiTi. Adicionalmente, Michailidis *et al.* (2009) investigaram o uso de estruturas de SMA do tipo *honeycomb* hexagonal sob compressão no plano para a análise do comportamento superelástico e de

estabilidade. De fato, estruturas periódicas de baixa densidade, como elementos de ligas com memória de forma do tipo *honeycomb*, apresentam uma alta relação rigidez-massa e boas características de absorção de energia. Além disso, a máxima deformação trativa recuperada e a superelasticidade dessas estruturas de parede fina são significativamente amplificadas em comparação a estruturas monolíticas, tornando-as apropriadas para atenuação de vibração (Michailidis *et al.*, 2009).

A disponibilidade de ferramentas numéricas existentes, aliada a modelos constitutivos avançados, promoveu melhorias na modelagem do comportamento complexo de elementos mecânicos de atenuação de vibração com *SMAs*. O presente trabalho apresenta uma metodologia baseada no desenvolvimento de modelos numéricos utilizando o método de elementos finitos para avaliar o desempenho de absorvedores de vibrações com elementos de *SMA* conectados a estruturas solicitadas mecanicamente, de modo a formar estruturas do tipo *honeycomb*. O modelo proposto é utilizado para avaliar o desempenho de diversas geometrias distintas, de modo a buscar aquelas que permitam maximizar a dissipação de energia através do efeito pseudoelástico.

A alteração dos parâmetros geométricos do absorvedor afeta diretamente o comportamento dinâmico dos sistemas mecânicos conectados, que depende diretamente das características de amortecimento e rigidez do elemento absorvedor. Dessa forma, além de avaliar as características de dissipação de energia, é desenvolvida também uma análise da rigidez do sistema. As não linearidades de natureza constitutiva, intrínsecas à *SMA,* somadas àquelas de natureza geométrica, dadas pelos grandes deslocamentos aplicados, tornam a análise complexa, o que demanda a utilização de métodos numéricos avançados, como propõe o presente estudo.

Esta dissertação divide-se em quatro capítulos, listados a seguir:

- **Capítulo I**: este capítulo dedica-se à apresentação das ligas com memória de forma, fazendo uma breve introdução aos principais fenômenos termomecânicos associados a esses materiais e descrevendo algumas aplicações presentes na literatura. O capítulo I é encerrado com um tópico sobre atuadores de vibração, no qual são explorados alguns conceitos introdutórios ao estudo de vibrações, assim como alguns exemplos de atenuadores com *SMAs*.

- **Capítulo II**: a metodologia abordada no presente estudo é descrita no

capítulo II. Sendo assim, são inicialmente apresentados os parâmetros de análise dos resultados e os critérios adotados. Além disso, o capitulo abrange a apresentação do modelo numérico utilizado, do modelo constitutivo implementado e, por fim, da calibração do modelo numérico.

- **Capítulo III**: o capítulo III é dedicado à apresentação dos principais resultados obtidos das simulações numéricas. O capítulo é introduzido por um tópico que apresenta as análises de convergência no espaço e no tempo. Em seguida são apresentados os principais estudos conduzidos no trabalho, que abordam a influência dos parâmetros de análise, descritos na metodologia, na dissipação de energia e rigidez do sistema adotado. O capítulo III é encerrado com uma comparação da capacidade dissipativa do modelo numérico adotado com demais absorvedores presentes na literatura.

- **Capítulo IV**: O capítulo IV é voltado à conclusão do estudo e apresenta um apanhado de seus principais resultados, assim como sugestões para trabalhos futuros.

I. Ligas com Memória de Forma

Neste capítulo são abordados os principais fenômenos característicos das ligas com memória de forma, seguidos de algumas aplicações extraídas da literatura. O capítulo é encerrado com um tópico de atenuadores de vibração, onde são introduzidos alguns conceitos referentes à vibração, absorvedores convencionais e de *SMA*, incluindo estruturas periódicas de baixa densidade como estruturas do tipo *honeycomb*.

I.1 Introdução às ligas com memória deforma

As *SMAs* são materiais inteligentes que possuem a habilidade de modificar sua forma em resposta a um estímulo externo, seja ele um campo de tensão ou uma variação de temperatura (Lagoudas, 2008). Elementos de *SMA* são largamente aplicados como atenuadores de vibração e atuadores termomecânicos, podendo ser encontrados no formato de fios, barras, chapas, filmes finos, entre outros.

O comportamento peculiar das *SMAs* está associado a fenômenos envolvendo processos de transformação de fase (Paiva e Savi, 2006). Duas fases marcam este processo: a fase austenítica, estável a temperaturas superiores em um estado livre de tensões; e a fase martensítica, que apresenta duas principais variantes a temperaturas inferiores, chamadas de maclada e demaclada. Apesar de outras ligas desenvolverem deformações durante o processo de transformação de fase reversível, somente aquelas que apresentam valores significativos são de interesse comercial, como é o caso das ligas à base de cobre (CuAlNi e CuZiAl) e de NiTi (Pacheco *et al.*, 2015).

Os principais fenômenos termomecânicos apresentados pelas *SMAs* são: a transformação de fase induzida por temperatura; o efeito de memória de forma (*Shape Memory Effect – SME*) e a pseudoelasticidade (Paiva, 2004).

I.2 Transformação de fase induzida por temperatura

Na transformação de fase induzida por temperatura, existem quatro temperaturas características, associadas às *SMAs* em um estado livre de tensões, durante os processos de aquecimento e resfriamento. Partindo de uma composição

inicial totalmente austenítica, encontrada a temperaturas superiores, o resfriamento do material até a temperatura M_s marca o início do processo de transformação de fase, que cessa apenas sob a temperatura M_f, a partir da qual a liga é integralmente martensítica de variante maclada. Por outro lado, partindo de uma composição inicial da liga totalmente martensítica de variante maclada, encontrada a temperaturas inferiores, o aquecimento do material até à temperatura A_s marca o início do processo de transformação de fase, que é somente concluído sob a temperatura A_f, a partir da qual a liga é integralmente austenítica. A Figura I-1 ilustra esquematicamente a transformação de fase induzida por temperatura em *SMAs*.

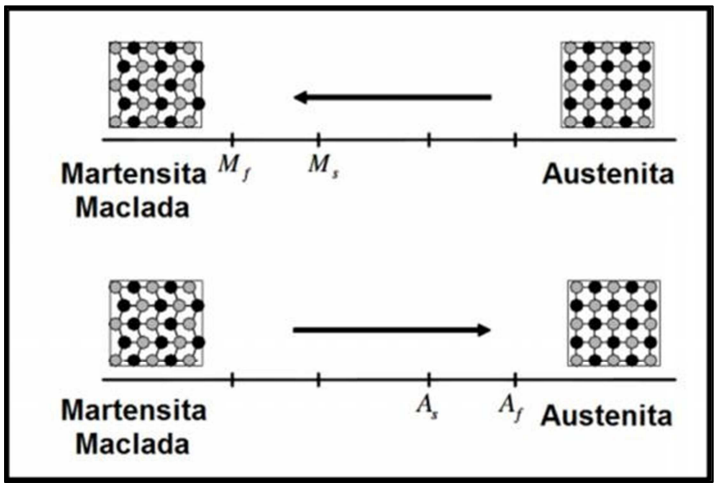


Figura I-1 – Transformação de fase induzida por temperatura.
Fonte: Lagoudas (2008).

I.3 Efeito de memória deforma

O efeito de memória de forma (*SME*) ocorre para ligas inicialmente em um estado livre de tensões a uma temperatura inferior à M_f, onde o material encontra-se como martensita de variante maclada. A Figura I-2 exibe um gráfico da curva tensão-deformação- temperatura (σ-ε-T) para ilustrar o efeito de memória de forma. Ao aplicar um carregamento na liga, pode-se observar um comportamento inicial linear elástico partindo do ponto B, seguido por uma curva não linear que marca o início do processo de transformação de variante martensítica, com fim no ponto C. Essa reorientação da martensita gera a variante martensítica associada à tração, chamada de demaclada. Durante o descarregamento do material, representado pela curva C-D, observa-se novamente mais um comportamento linear elástico. Como a martensita de variante demaclada é estável, após o descarregamento ainda há uma parcela de deformação

residual. Esta deformação é somente recuperada após um aquecimento da liga acima da temperatura A_f, que dá início ao processo de transformação de fase de martensita de variante demaclada para austenita, representada pela curva não linear E-F. Ao fim desse processo, o resfriamento da liga abaixo da temperatura M_f promove uma nova transformação de fase de austenita para martensita de variante maclada, fazendo com que o material retorne à sua forma inicial (Paiva,2004).

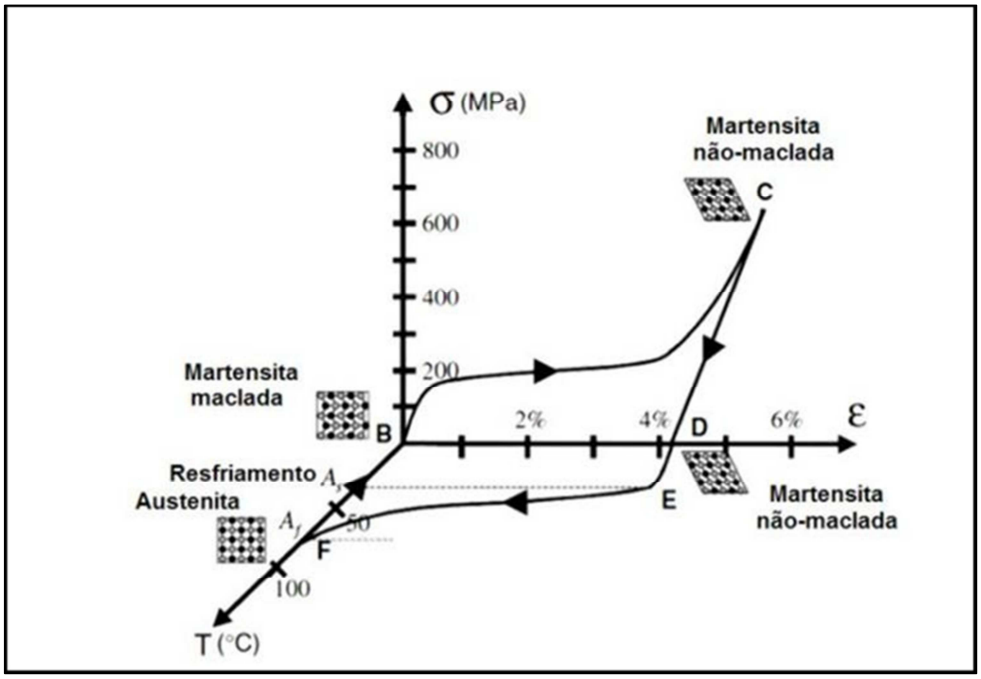


Figura I-2 – Efeito de Memória de Forma.
Fonte: Ivanovitsch (2012).

I.4 Pseudoelasticidade

A pseudoelasticidade, também conhecida como superelasticidade, é o efeito responsável pela recuperação de altas deformações sob temperatura constante (Lagoudas, 2008). O efeito pseudoelástico ocorre a altas temperaturas, acima da temperatura A_f, onde a austenita é a fase estável em um estado livre de tensões. Como pode ser visto na curva tensão-deformação (σ-ε) na Figura I-3, um comportamento inicial linear elástico, cuja inclinação está associada ao módulo de elasticidade da austenita, ocorre durante o processo de carregamento até o ponto A. A curva A-B é caracterizada por um comportamento não linear devido à transformação de fase de austenita para martensita de variante demaclada. Um valor de 100% de fração volumétrica de martensita é alcançado no ponto B. Após este ponto, o carregamento dá início a um novo comportamento linear, em que a inclinação da curva

está associada ao módulo de elasticidade da martensita. Para o processo de descarregamento, uma curva linear pode ser observada para o processo B-C, seguido de uma curva não linear C-D, onde ocorre a transformação de fase reversa. Finalmente, quando o ponto D é atingido, tem-se novamente100% de austenita na liga.

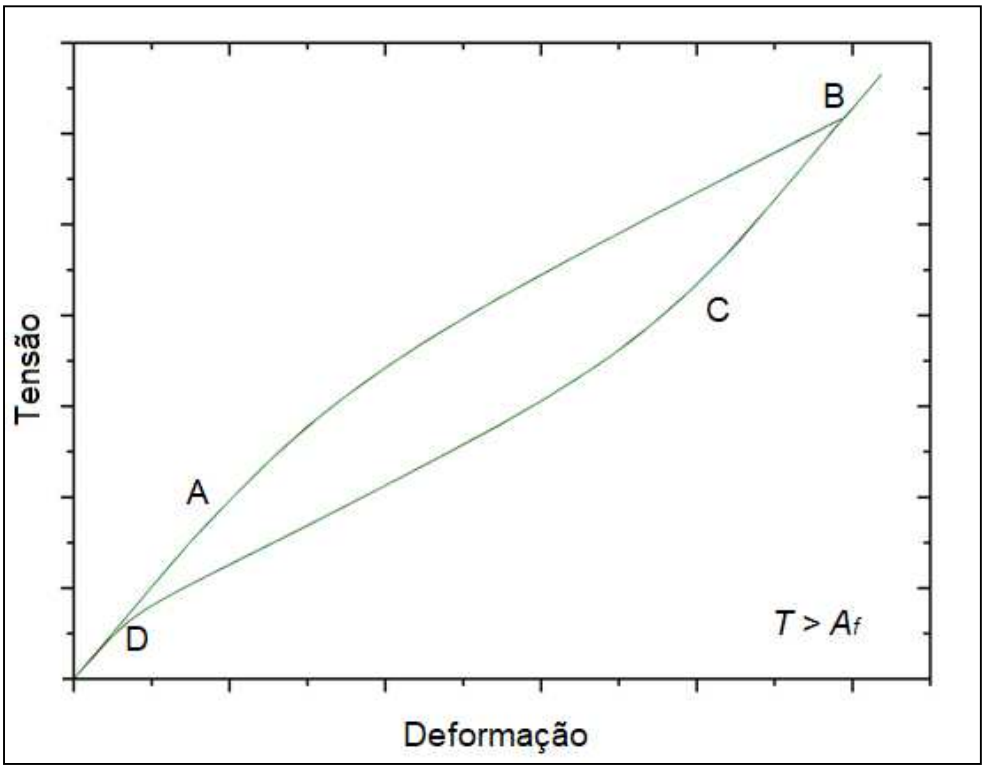


Figura I-3 – Efeito pseudoelástico em ligas com memória de forma.

Como resultado de seu comportamento histerético, as *SMAs* são capazes de dissipar energia mecânica a cada ciclo de carregamento-descarregamento, o que as torna apropriadas para aplicações de atenuação de vibração (Aguiar *et al*., 2013; da Hora *et al.*, 2013; Lagoudas, 2008, Pacheco *et al.,* 2015, Savi *et al.*, 2011).

I.5 Plasticidade induzida por transformação de fase

Ligas com memória de forma apresentam um comportamento histerético progressivo durante os primeiros ciclos termomecânicos, seja pela aplicação de carregamentos térmicos com tensão constante ou sob regime pseudoelástico (Lagoudas, 2008). Esse fenômeno se dá pelo acúmulo de deformações residuais devido ao início da transformação de fase após o descarregamento do material. Isso é chamado de plasticidade induzida por transformação de fase, também conhecido

como efeito *TRIP* (*transformation induced plasticity*) (Lagoudas, 2008).

O efeito *TRIP* é resultado de algumas modificações microestruturais permanentes no material, o que, macroscopicamente resulta em uma translação do laço de histerese, conforme mostrado na Figura I-4, que apresenta resultados experimentais obtidos para um carregamento térmico cíclico sob tensão constante de 200 MPa. Como pode ser observado na Figura I-4, o efeito *TRIP* tende a diminuir conforme se aproxima do 80° ciclo, onde ocorre a estabilização do laço de histerese.

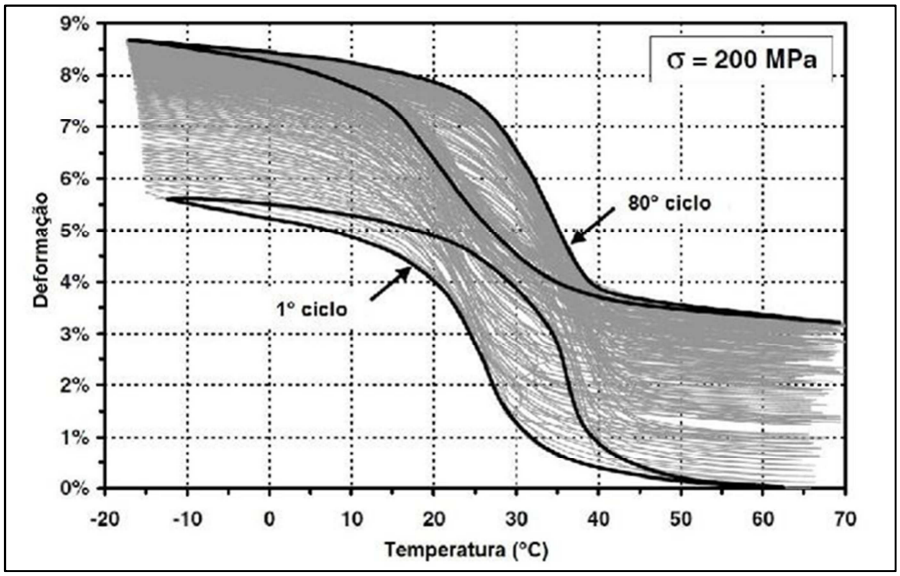


Figura I-4 – Carregamento térmico cíclico de um fio de *SMA* sob tensão constante de 200 MPa.

Fonte: Lagoudas (2008).

I.6 Efeito de memória de forma reversível

Mesmo que não haja tensões atuando sob um elemento de *SMA*, estas ligas podem apresentar mudança de forma repetidamente quando sujeitas a cargas térmicas cíclicas, caracterizando o chamado efeito de memória de forma reversível (*TWSME*) (Lagoudas, 2008). Ao submeter o material a repetidos ciclos térmicos controlados, através dos quais o material é aquecido e resfriado sob valor fixo de tensão, nota-se que seu comportamento histerético estabiliza. Este procedimento é chamado de treinamento (Lagoudas, 2008).

O treinamento se dá através da aplicação de carregamentos termomecânicos cíclicos que seguem o mesmo padrão de carregamento até a estabilização do laço de histerese, ocasionada pela saturação da deformação plástica devido ao efeito *TRIP*.

De maneira geral, é possível observar que a deformação residual, cujo valor é significativo no primeiro ciclo, tende a diminuir gradativamente conforme se aumenta o número de ciclos.

I.7 Aplicações com ligas com memória de forma

Devido a suas características especiais com grande potencial em engenharia, as ligas com memória de forma têm atraído enorme interesse em diversas áreas de aplicação, desde as indústrias aeronáutica, naval e automobilística até a biomedicina, voltada à fabricação de instrumentos cirúrgicos, implantes médicos, dentre outros (Lagoudas, 2008).

Um dos casos mais conhecidos de aplicação de ligas com memória de forma é a junta de acoplamento para tubulações hidráulicas da aeronave F-14, chamada de CryoFit ® (Chopra eIrohi, 2014). As temperaturas de operação da aeronave F-14 chegam à faixa de -55 graus Celsius, portanto era necessária a fabricação de ligas com temperaturas características de transformação de fase muito baixas (Otsuka e Wayman, 1998). A Figura I-5 ilustra o princípio de funcionamento das juntas de acoplamento de *SMA*. Sob baixas temperaturas, quando a liga encontra-se em estado martensítico, o diâmetro da junta é expandido a valores ligeiramente superiores ao diâmetro externo da tubulação. Logo após, a junta é aquecida, o que promove a transformação de fase do material para o estado austenítico, resultando na redução do diâmetro da junta e no encaixe efetivo do acoplamento. A grande vantagem da utilização de *SMAs* são os elevados esforços radiais resultantes para a fixação da tubulação (Chopra eIrohi, 2014).

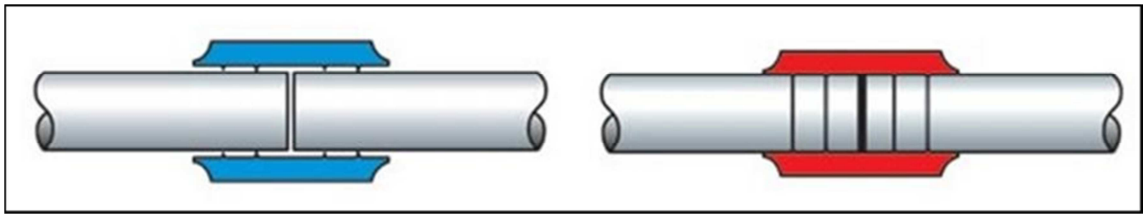


Figura I-5 – Princípio de funcionamento da junta de acoplamento de *SMA.*

No que diz respeito à utilização de *SMAs* na biomedicina, os chamados filtros de *Simon* são um exemplo de aplicação na área de implantes vasculares para o tratamento de embolia pulmonar (Ivanovitsch, 2012). A Figura I-6 apresenta um arranjo de configurações distintas do filtro de *Simon*. A baixas temperaturas, o

dispositivo encontra-se na fase martensítica, onde é deformado conforme o quadro 1, e colocado em um cateter com solução salina para manter sua temperatura constante. Ao entrar em contato com a corrente sanguínea, o cateter é removido e a temperatura corporal induz a transformação de fase para a fase austenítica, de maneira que o dispositivo assuma sua configuração inicial, apresentada pelo quadro 5 (Lagoudas, 2008). A função do filtro de *Simon* é conter coágulos até que eles se dissolvam com a própria corrente sanguínea (Lagoudas, 2008).

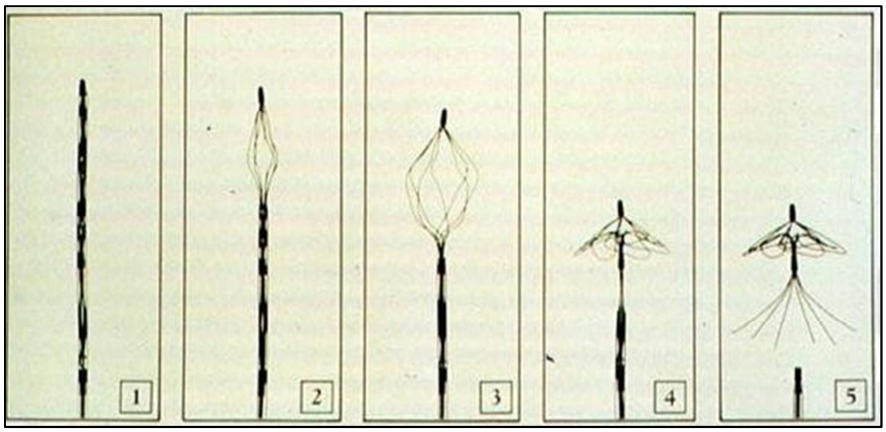


Figura I-6 – Filtro de Simon.

Outra aplicação na área de implantes cardiovasculares, são os chamados *stents* auto expansíveis, cuja função é manter o diâmetro interno de vasos sanguíneos (Lagoudas, 2008). Inicialmente, os *stents* são conformados em uma configuração compacta dentro de um cateter antes de serem implantados no corpo humano. Após ser inserido cirurgicamente no corpo humano, o cateter é removido e o contato da estrutura com a corrente sanguínea promove o aquecimento *stent* acima da temperatura de transformação A_f, resultando em sua expansão (Lagoudas,2008).

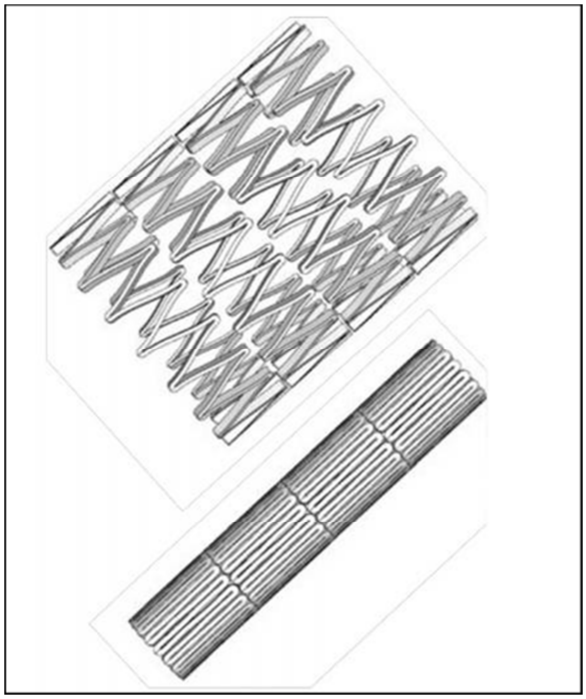


Figura I-7 – *Stents* auto expansíveis nas configurações expandida e compacta.

A Figura I-8 apresenta um diagrama de densidade de energia de atuação, definido pela razão entre a quantidade de energia de atuação e o volume, no qual as ligas com memória de forma possuem o valor mais elevado deste parâmetro, equivalente à faixa de 10 MJ/m³, dentre as demais classes de materiais inteligentes. O diagrama de frequência de atuação, apresentado pela Figura I-9, mostra que os materiais de *SMA* encontram-se em uma faixa de frequências medianas ao serem comparados com demais classes de materiais inteligentes.

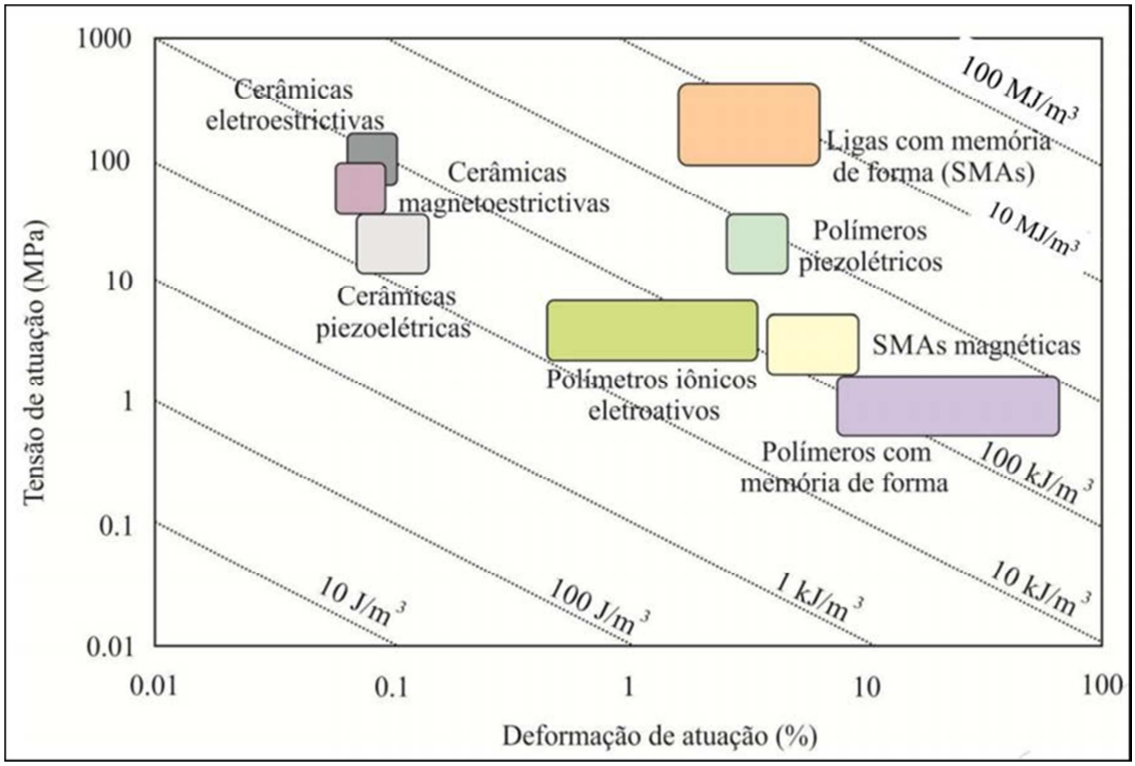


Figura I-8 – Diagrama de densidade de energia de atuação de diversas classes de materiais inteligentes.
Fonte: Lagoudas (2008).

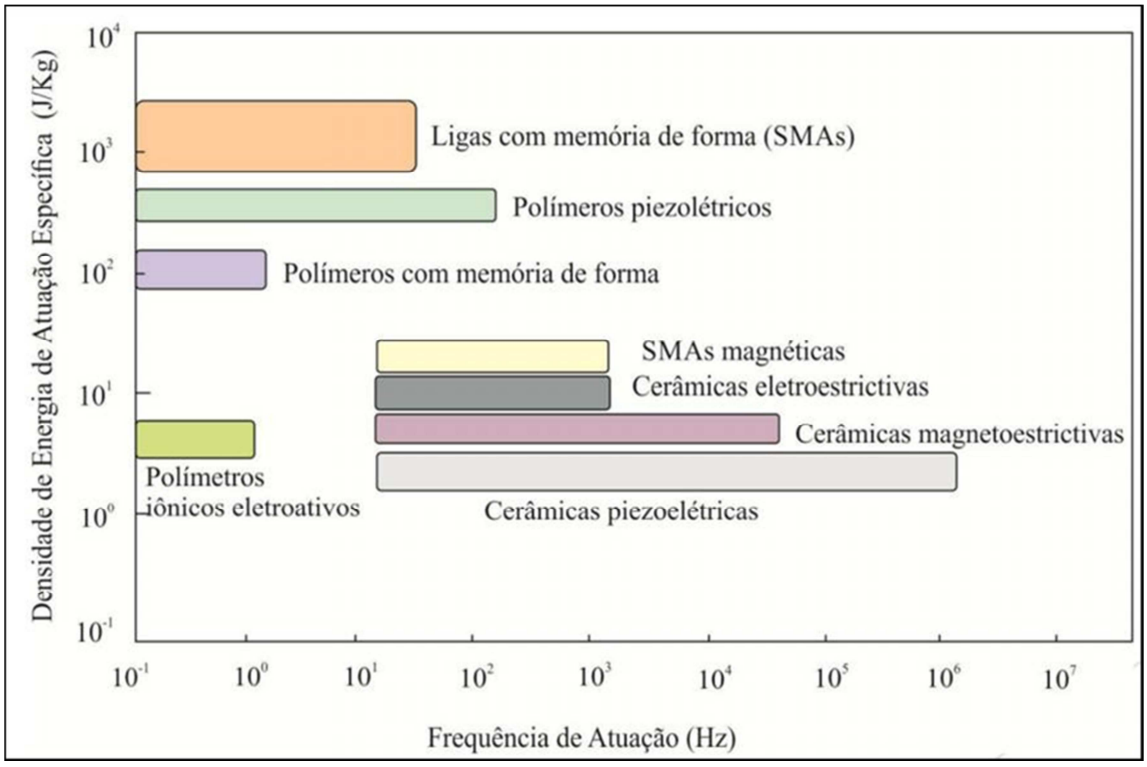


Figura I-9 – Diagrama de frequência de atuação de diferentes classes de materiais inteligentes.
Fonte: Lagoudas (2008).

As ligas com memória de forma apresentam inúmeras vantagens quando aplicadas como atuadores termomecânicos devido à sua alta densidade de energia de e aos elevados esforços e deslocamentos desenvolvidos Um crescente segmento onde *SMAs* têm sido utilizados como atuadores é na fabricação de próteses. Low *et al.* (2012) desenvolveram um modelo de um dedo protético biométrico atuado por um mecanismo híbrido. A utilização de *SMAs* possibilita a miniaturização do dispositivo à escala antropomórfica, assim como a redução do peso do conjunto, além de desempenhar grandes forças de atuação sem elevados níveis de ruído. A Figura I-10 ilustra a representação do dedo protético idealizada por Low *et al.* (2012). A função do fio de *SMA* é contrair a falange média, quando aquecido, com auxílio de um arranjo de engrenagens, que amplificam a amplitude do movimento. O fio é fixado em uma extremidade a uma mola convencional, que promove o movimento de abertura do dedo simultaneamente ao resfriamento do fio por convecção natural ao ar. Ligações mecânicas permitem com que o movimento da falange média promova um deslocamento sincronizado da falange distal.

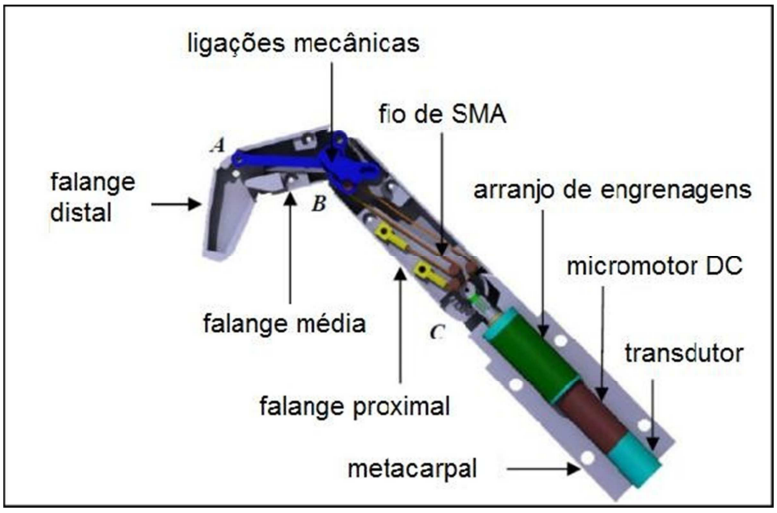


Figura I-10 – Modelo de um dedo protético atuado por *SMAs.*
Fonte: Low *et al.* (2012).

I.8 Atenuadores de vibração

O fenômeno de ressonância ocorre quando a frequência de forçamento ou de excitação externa se aproxima de uma das frequências naturais do sistema, o que provoca grandes deslocamentos e deformações. Normalmente a ressonância deve ser evitada no projeto de estruturas mecânicas, pois é capaz de induzir tensões e deformações muito além dos valores críticos previstos nos cálculos estruturais,

provocando o colapso do elemento estrutural. Segundo Torra *et al.* (2009), há um ganho na vida útil e na segurança de pontes quando eliminadas as vibrações relacionadas à ação do vento, chuva e tráfego de veículos e ou pessoas. A Figura I-11 apresenta o caso clássico da ponte estaiada de Tacoma, nos Estados Unidos, cuja falha ocorreu devido à ressonância induzida por vento.

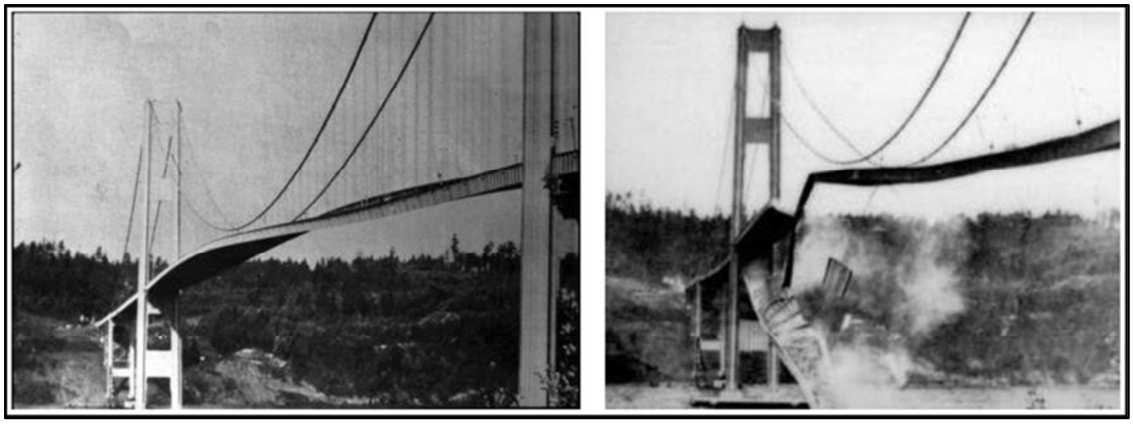


Figura I-11 – Queda da ponte de Tacoma (1940).
Fonte: da Hora (2015).

A fim de reduzir o efeito prejudicial de vibrações, elementos atenuadores são implementados. Du (2003) classifica três formas distintas de controle de vibrações: por redução da excitação da fonte de vibração; por isolamento da estrutura a ser excitada, e pela modificação das características dinâmicas do sistema. Os atenuadores de vibração dividem-se em passivos, ativos e adaptativos. Atenuadores passivos têm a capacidade constante de reduzir as interações entre a fonte excitadora e a estrutura excitada através de valores fixos de rigidez e amortecimento. Os atenuadores ativos, por sua vez, têm a capacidade dissipativa ajustada através de um sistema de controle externo, que é capaz de responder aos estímulos do meio. Por fim, os atenuadores adaptativos são aqueles que podem ajustar sua capacidade dissipativa através de um sistema de controle que rapidamente adapta os parâmetros de saída em função dos de entrada. Elementos de ligas com memória de forma na condição austenítica, por exemplo, podem agir como atenuadores do tipo adaptativo, pois apresentam valores distintos de densidade volumétrica de energia dissipada, associada ao laço de histerese e à sua geometria, em função das oscilações forçadas da fonte excitada.

A literatura apresenta inúmeros exemplos de ligas com memória de forma aplicadas como elementos atenuadores de vibração. Em Saadat *et al.* (2001) foi conduzida uma análise de mecanismos de fixação através de fios pseudoelásticos de *SMA* para reduzir o nível de vibrações em estruturas costeiras sujeitas a sinistros de furacão. Segundo os autores, a principal causa dos danos sofridos por essas

construções se dá pelo desprendimento súbito dos telhados ao resto da estrutura devido aos elevados carregamentos dinâmicos característicos deste fenômeno natural. Nesse sentido, as ligas com memória de forma demonstram-se vantajosas, pois podem reduzir e ou isolar vibrações induzidas por vento e conferem à estrutura acapacidade de sofrer grandes deformações, permitindo muitas vezes que recuperesu a forma inicial.

O objetivo principal do trabalho de Saadat *et al.* (2001) é estudar a viabilidade da utilização de *SMAs* como dispositivos absorvedores de vibração através de um modelo de um atenuador passivo-adaptativo com um grau de liberdade, conforme a Figura I-12. Para reproduzir o comportamento pseudoelástico da liga de *SMA* utiliza-se um modelo constitutivo bilinear. Oito configurações distintas divididas em dois grupos iguais, quatro com pré-deformação e quatro sem, foram simuladas numericamente. Cada grupo de quatro casos apresenta diferentes comprimentos de fio e arranjos, alguns constituídos integralmente por fios de NiTi e outros híbridos (seções perfeitamente rígidas nas extremidades).

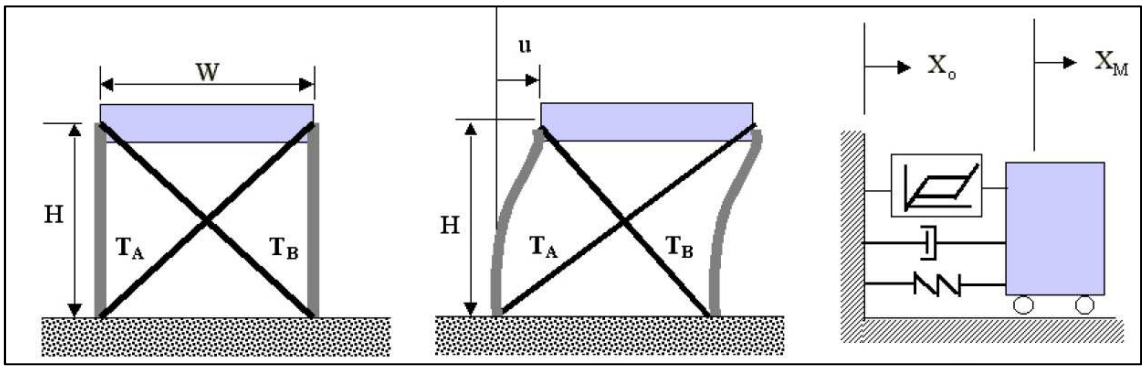


Figura I-12 – Desenho representativo do sistema com um grau de liberdade proposto por Saadat *et al.* (2001).
Fonte: Saadat *et al.* (2001).

O estudo de Saadat *et al.* (2001) concluíram que as configurações com fios híbridos apresentaram os efeitos mais significativos de endurecimento e amortecimento, pois reduziram de forma mais expressiva as amplitudes de oscilação da estrutura. Além disso, foi estabelecido um critério de dimensionamento do diâmetro do fio em função das cargas dinâmicas existentes, de maneira que as tensões geradas nos fios devem ser grandes o suficiente para promover transformação de fase, caso contrário ele atua apenas como um elemento de reforço estrutural.

Matsuzaki *et al.* (2005) realizaram um estudo de ligas com memória de forma aplicadas como atenuadores de vibração em sistemas de materiais compósitos. O primeiro arranjo é composto por uma viga de alumínio com filmes de *SMA* colados por

adesivo Epoxy, enquanto o segundo arranjo é constituído por fios de *SMA* imersos em uma matriz de resina de Epoxy reforçada por fibra de vidro. A fim de ivestigar a eficácia da utilização de *SMAs* na proteção passiva de vigas sujeitas à vibração, ensaios preliminares foram realizados, conforme o desenho esquemático na Figura I-13. Adicionalmente, um estudo analítico e outro numérico foram conduzidos para descrever o comportamento termomecânico do da *SMA*. De maneira geral, os sistemas compósitos de *SMA* propostos apresentaram em todos os casos um aumento superior a 100% do coeficiente de amortecimento.

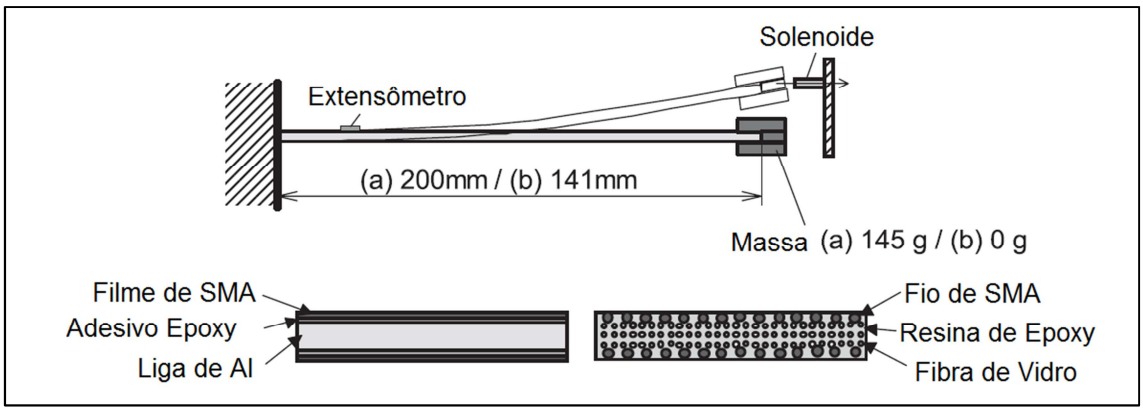


Figura I-13 – Modelos experimentais de sistemas compósitos com *SMAs* desenvolvidos por Matsuzaki *et al.* (2005).
Fonte: Matsuzaki *et al.* (2005).

Além disso, o emprego de estruturas celulares para aplicações de atenuação de vibração tem se tornado gradativamente mais recorrente (Shaw *et al.,* 2007). Shaw *et al.*(2007) realizaram um estudo para o projeto e fabricação de estruturas periódicas do tipo *honeycomb* (colmeia de mel) de ligas pseudoelásticas de NiTi, conforme o protótipo da Figura I-14. Essas estruturas são formadas por células ou módulos, que se repetem ordenadamente para formar um arranjo maior. Adicionalmente, Michailidis *et al.* (2009) investigaram o uso de estruturas de *SMA* do tipo *honeycomb* hexagonal sob compressão no plano para a análise do comportamento superelástico e de estabilidade. De fato, estruturas celulares de baixa densidade, como ligas com memória de forma do tipo *honeycomb*, apresentam uma alta relação rigidez-massa e boas características de absorção de energia. Além disso, a máxima deformação trativa recuperada e a superelasticidade dessas estruturas de parede fina são significativamente amplificadas em comparação a estruturas monolíticas, tornando-as apropriadas para atenuação de vibração (Michailidis*et al.*,2009).

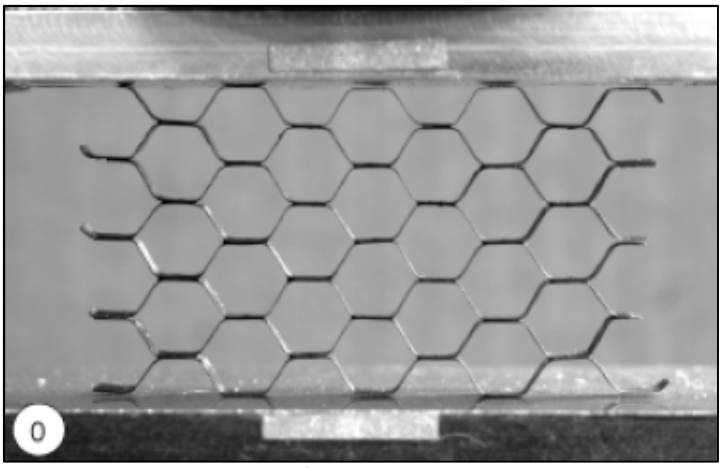


Figura I-14 – Protótipo na configuração indeformada
de ligas com memória de forma pseudoelásticas em estrutura do tipo *honeycomb* utilizado por Shaw et al. (2007).
Fonte: Shaw *et al.* (2007).

II. Metodologia

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia baseada no método de elementos finitos para avaliar a capacidade de dissipação de energia e de alteração de rigidez de um atenuador de vibrações com elementos de *SMA* conectados a placas para formar uma estrutura do tipo *honeycomb*. A Figura II-1 apresenta a geometria de um conjunto do absorvedor de vibrações, onde os componentes em azul representam os elementos de liga com memória de forma e os componentes em roxo representam as placas. A placa superior simula o comportamento de uma estrutura sujeita a uma excitação externa, como por exemplo, um componente mecânico em operação ou uma base de maquinário exposta à vibração.

A análise utiliza uma ferramenta numérica baseada no método de elementos finitos. Basicamente, avalia-se a dissipação de energia a partir da distribuição de fração volumétrica de martensita, o que permite caracterizar a histerese pseudoelástica. Diferentes geometrias de absorvedores de vibração são investigadas A alteração dos parâmetros geométricos do absorvedor afeta diretamente o comportamento dinâmico dos sistemas mecânicos conectados que depende diretamente das características de amortecimento e rigidez do elemento absorvedor. Dessa forma, além de avaliar as características de dissipação de energia, é desenvolvida também uma análise da rigidez do sistema. As não linearidades de natureza constitutiva, intrínsecas à *SMA,* somadas àquelas de natureza geométrica, dadas pelos grandes deslocamentos aplicados, tornam a análise complexa, o que demanda a utilização de métodos numéricos avançados, como propõe o presente estudo.

O foco do estudo consiste em uma análise do comportamento de absorvedores de vibrações, em função de seus principais parâmetros, com o objetivo de obter geometrias que propiciem melhores características de atenuação de vibração.

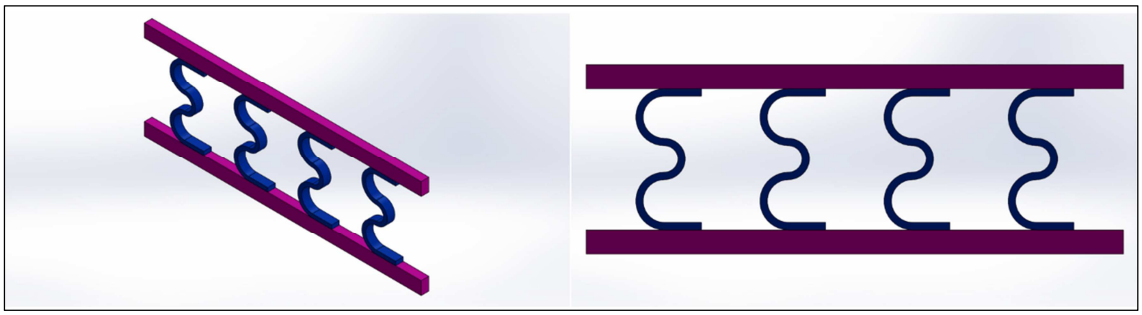


Figura II-1 – Absorvedor em S de SMA de estrutura do tipo *honeycomb.*

O estudo desenvolvido considera a formação de geometrias de absorvedores de vibrações a partir de elementos modulares em forma de S. A geometria mais simples é dada por um elemento com apenas uma dobra, como mostra a Figura II-2. Por esta razão, toma-se este primeiro caso como um módulo, isto é, uma geometria simples com cotas parametrizadas, que pode ser utilizada para compor geometrias mais complexas. Os parâmetros utilizados para definir a geometria modular são os seguintes: raio médio do absorvedor (*R*), definido como a média aritmética entre os raios interno e externo; e a espessura da parede (*t*). Três análises são desenvolvidas para avaliar os efeitos da dos parâmetros geométricos.

O primeiro estudo trata de avaliar a influência do parâmetro *t* na capacidade de dissipação e rigidez do sistema. Para isso, define-se o índice *i* como sendo a razão entre o raio médio *R* e a espessura de parede *t*.

$$i = \frac{R}{t} \tag{1}$$

O parâmetro *i* funciona como um índice de esbeltez da geometria e sua alteração afeta diretamente o comportamento dinâmico do sistema, avaliado por sua rigidez e amortecimento. A modificação do índice implica diretamente na alteração dos deslocamentos aplicados, que se tornam gradativamente maiores conforme a estrutura fica mais esbelta. Portanto, são esperados diferentes comportamentos sob índices distintos devido à influência das não-linearidades geométricas, inerentes ao problema simulado. A Tabela II-1apresenta os índices utilizados na etapa inicial de análise.

Tabela II-1 – Parâmetros utilizados para definir a geometria do módulo básico.

R (mm)	***t*** (mm)	***i*** (-)
6,0	1,5	4
6,0	2,0	3
6,0	3,0	2
6,0	4,0	1,5
6,0	6,0	1
6,0	8,0	0,75

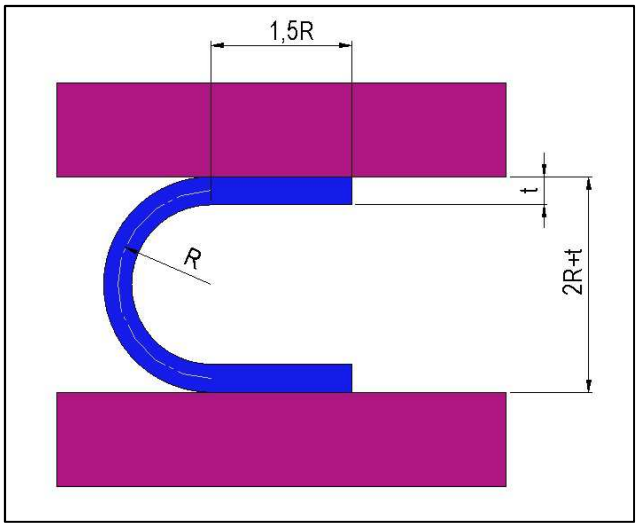


Figura II-2–Geometria simples do absorvedor em S com uma dobra (módulo).

O segundo estudo consiste em aumentar o número de dobras *n* a partir da geometria do módulo. A Figura II-3 apresenta a geometria obtida com duas dobras, criada a partir da adição de mais uma dobra à geometria do módulo. O conjunto total de casos de simulação será avaliado quantitativamente segundo sua capacidade de dissipação e qualitativamente segundo a rigidez do sistema (elemento de *SMA* acoplado à placa). Assim como no primeiro estudo, a variação do parâmetro *n* impacta diretamente nos valores de deslocamento aplicado, de maneira que geometrias com mais dobras apresentem deslocamentos gradativamente maiores. Novamente, são esperados diferentes comportamentos do sistema para números de dobras distintos devido à presença das não linearidades geométricas.

A Figura II-4 apresenta as geometrias com 3, 4 e 5 dobras.

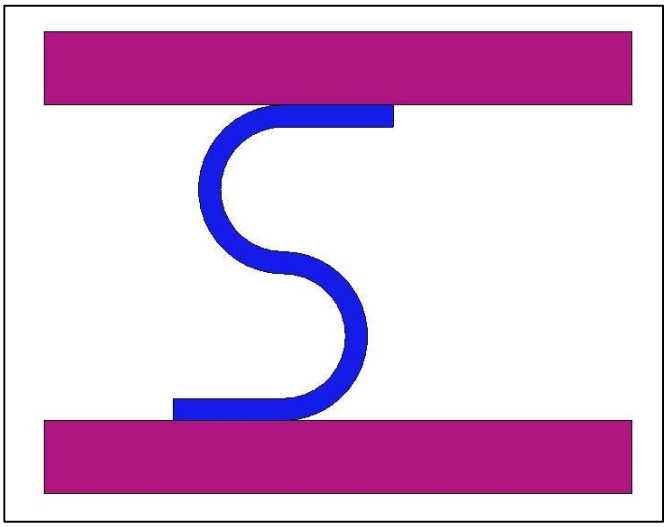


Figura II-3 – Geometria do absorvedor em S com duas dobras.

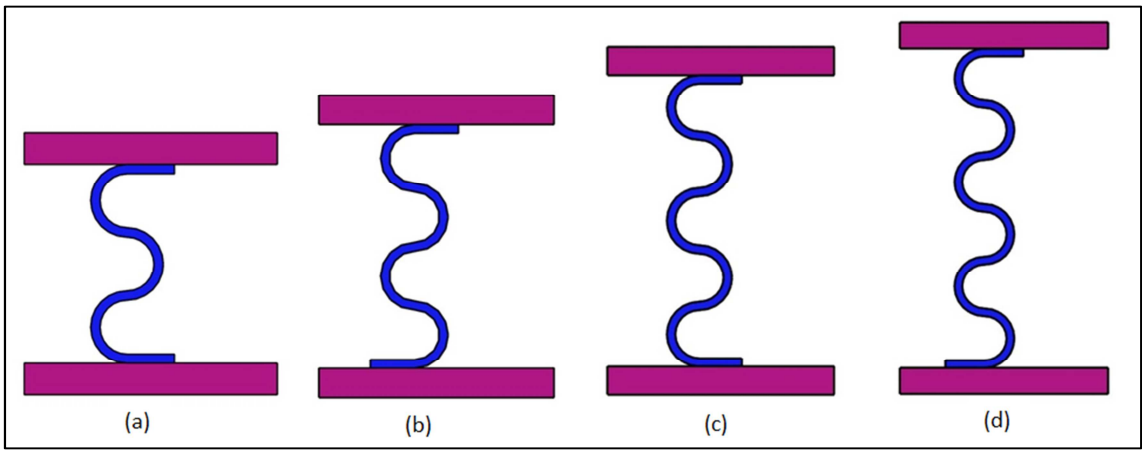
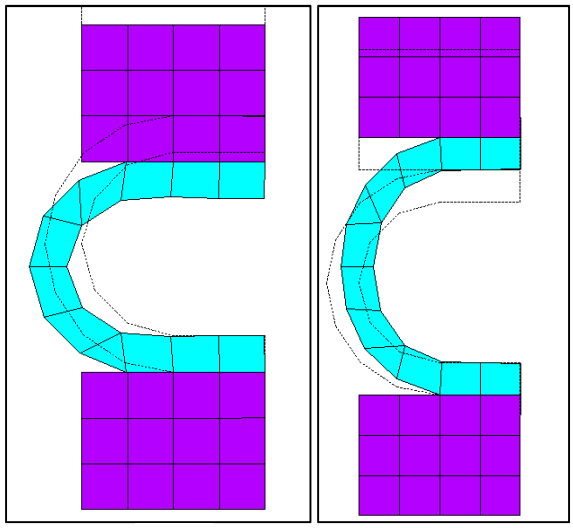


Figura II-4 – Geometrias de 3 (a), 4 (b) e 5 (c).

O terceiro estudo tem o intuito de avaliar o comportamento do absorvedor em S de *SMA* sujeito a carregamentos compressivos e trativos aplicados no plano em suas diversas configurações geométricas, conforme ilustra a Figura II-5. Os carregamentos mecânicos de natureza compressiva e trativa são chamados, respectivamente, de modos de carregamento compressivo e trativo. Vale ressaltar novamente que, em função da capacidade do elemento de desenvolver grandes deslocamentos, a influência das não linearidades geométricas resulta em comportamentos distintos para carregamentos aplicados em sentidos opostos, uma vez que em compressão e tração as configurações deformadas finais são bem diferentes.



(a) (b)

Figura II-5 – Absorvedor em S de *SMA* nos modos de carregamento compressivo (a) e trativo (b).

A Tabela II-2 e a Tabela II-3 apresentam o resumo dos casos de simulação nos modos de carregamento compressivo e trativo, respectivamente.

Tabela II-2 – Casos do estudo de otimização no modo de carregamento compressivo.

MODO COMPRESSIVO	
Número de dobras (*n*)	**Índice (*i*= *R*/*t*)**
1	4
	3
	2
2	4
	3
	2
3	4
	3
	2
4	4
	3
	2
5	4
	3
	2
6	4
	3
	2
Número total de casos	18

Tabela II-3 – Casos do estudo de otimização no modo de carregamento trativo

MODO TRATIVO	
Número de dobras (*n*)	**Índice (*i* = R/*t*)**
1	4
	3
	2
	1,5
	1,0
	0,75
2	4
	3
	2
	1,5
	1,0
	0,75
3	4
	3
	2
	1,5
	1,0
	0,75
4	4
	3
	2
	1,5
	1,0
	0,75
5	4
	3
	2
	1,5
	1,0
	0,75
6	4
	3
	2
	1,5
	1,0
	0,75
7	4
	2
	0,75
8	4
	2
	0,75
9	4
	2
	0,75
10	4
	2
	0,75
Número total de casos	48

II.1 Parâmetros de análise dos resultados e critérios adotados

Os resultados de todos os casos gerados são analisados com base em dois parâmetros distintos, associados à capacidade de dissipação e à rigidez do sistema. O primeiro deles, denominado de energia dissipada por unidade de volume, γ, representa a capacidade dissipativa do elemento e é definido através da relação entre a energia dissipada a cada ciclo de carregamento (E_d) e o volume da geometria adotada (*V*):

$$\gamma = \frac{E_d}{V} \tag{2}$$

A energia dissipada por unidade de volume γ, é útil para comparar a capacidade dissipativa de diferentes geometrias de elementos de *SMA*. Note que é esperado que o aumento do volume do corpo de *SMA* esteja associado a um aumento de energia dissipada. Sendo assim, o parâmetro γ permite comparar a capacidade dissipativa de uma dada geometria independente do seu volume, em função apenas de suas características de rigidez e dissipação.

No entanto, é necessário adotar um critério que permita estabelecer, de forma coerente, uma comparação entre os valores de energia dissipada por unidade de volume γ para cada caso. Procura-se, portanto, avaliar comparativamente a capacidade de dissipação de energia para as diferentes configurações geométricas estudadas.

Song *et al.* (2014) realizaram uma série de carregamentos cíclicos em ligas pseudoelásticas de *SMA* sob taxa de carregamento e temperatura constantes para avaliar a influência da tensão de pico sob o comportamento dissipativo de ligas com memória de forma. Foram utilizadas tensões de pico de 600 a 1200 MPa para diferentes corpos de prova, de maneira que todas as amostras fossem submetidas a um total de 50 ciclos à temperatura de 296 K, superior à temperatura final de transformação de fase austenítica (A_f). A Figura II-6 apresenta os resultados que correlacionam energia dissipada por unidade de volume com o número de ciclos aplicados, onde é possível observar uma queda acentuada na capacidade dissipativa da liga a partir do valor de tensão de pico de 950 MPa, ligeiramente superior ao limite de escoamento do material (930 MPa). Segundo os autores, este comportamento decorre da perda das propriedades mecânicas associadas aos efeitos de memória de

forma e pseudoelasticidade presentes em ligas com memória de forma, chamado de fadiga funcional (Azevedo, 2016).

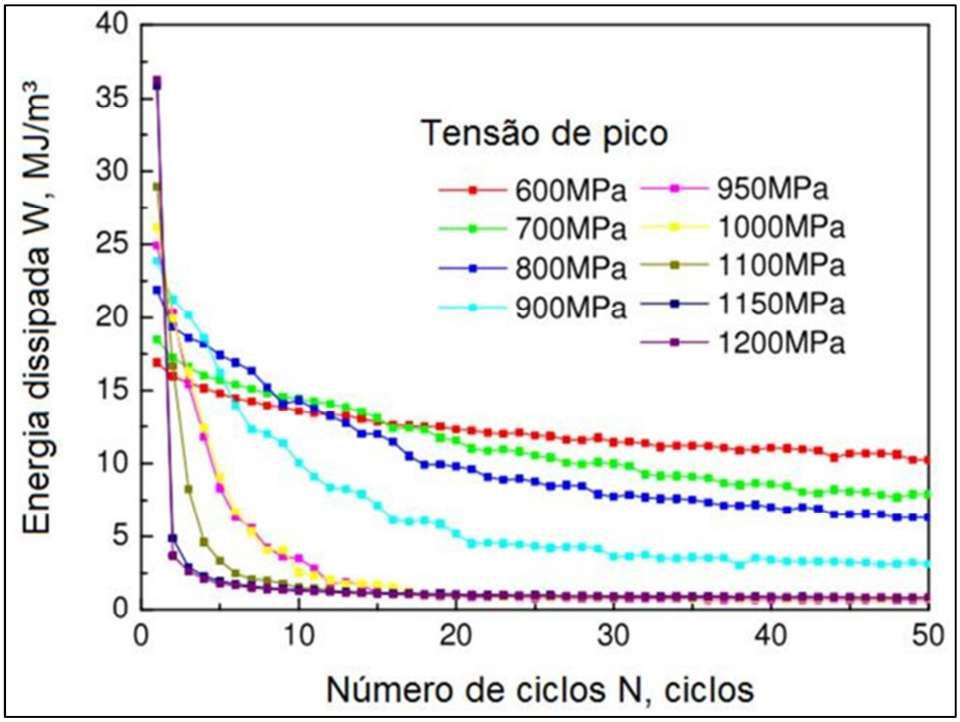


Figura II-6 – Resultados experimentais de energia dissipada por número de ciclos
Fonte: Song *et al*. (2014).

Dessa forma, a fim de evitar a redução das propriedades funcionais do material em função do carregamento cíclico, conforme apontado por Song *et al.* (2014), todos os casos de simulação desenvolvidos neste trabalho têm como *input* valores de deslocamento prescrito que gerem tensões equivalentes de *von Mises* iguais a 80% do limite de ruptura do material.

No presente estudo faz-se uma análise qualitativa dos valores de rigidez das fases metalográficas comparando a inclinação das regiões lineares dos laços de histerese de uma geometria em relação a outra. Portanto, será avaliada a inclinação das regiões lineares dos laços de histerese na fase inicial de carregamento, associada à fase austenítica, e final, associada à fase martensítica, sem que esses valores sejam medidos e quantificados.

II.2 Modelos numéricos do absorvedor em S de *SMA*

As simulações numéricas apresentadas no trabalho são obtidas através de modelos numéricos baseados no método de elementos finitos, desenvolvido com o uso do pacote comercial ANSYS Mechanical (ANSYS, 2018). Todos os casos de simulação podem ser gerados a partir de uma única macro, denominada arquivo-mãe (vide o Apêndice I), através da alteração de parâmetros de entrada. Os parâmetros de entrada são número de dobras *n*, índice *i* e deslocamento prescrito *Amp_u*, que pode assumir valor negativo ou positivo para simular os modos de carregamento compressivo e trativo, aplicados na direção normal às placas que compõem o elemento absorvedor.

O elemento PLANE 182, disponível na biblioteca do ANSYS, é utilizado considerando estado plano de tensões. O PLANE 182 é um elemento retangular que possui 4 nós, um em cada vértice, com 2 graus de liberdade cada, translação nos eixos *X* e *Y*. O elemento admite o comportamento de pseudoelasticidade em sua formulação.

A Figura II-7 apresenta a geometria do absorvedor de *SMA* com a malha de elementos finitos, as condições de contorno (representadas pelas setas em azul claro) e o carregamento de deslocamento prescrito aplicado (representado pelas setas em verde). As geometrias das placas, representadas pela cor roxa, recebem as propriedades elásticas de uma liga de alumínio, cujo módulo de elasticidade é de 64 GPa e o coeficiente de Poisson é de 0,32. A geometria dos elementos em S, representados pela cor azul claro, recebem as propriedades elásticas de uma liga com memória de forma extraídas de Xi Xie *et al.* (2016), cujo o módulo de elasticidade é de aproximadamente 27,51 GPa. À geometria em Sé atribuído um coeficiente de Poisson de 0,30. As demais propriedades do da *SMA*, referentes ao seu modelo constitutivo, são abordadas e apresentadas no item II.4.

O modelo numérico baseia-se em uma análise quase-estática, considerando que o tempo de permanência da carga é muito superior ao de deslocamento do sistema, em que os ciclos de carregamento e descarregamento são aplicados através de um número fixo de passos. Além disso, o modelo despreza qualquer influência da geração de calor associada a carregamentos dinâmicos, que tem como efeito alterar as propriedades termomecânicas das ligas com memória de forma.

Na base da placa inferior é empregado um deslocamento nulo em *Y*, enquanto

na região da lateral esquerda de ambas as placas aplica-se um deslocamento nulo em *X* para representar condições de simetria. O deslocamento prescrito não nulo é aplicado no topo da placa superior em duas etapas: uma de carregamento, dividida em 40 passos, seguida de outra de descarregamento, dividida também em 40 passos. Além disso, os nós das regiões de interface entre as placas e o elemento de *SMA* são unidos através de um comando denominado NUMMRG, que conecta nós coincidentes no espaço. Sendo assim, quando o carregamento é aplicado na placa superior, ele é transferido para os elementos de SMA que estão conectados através dos nós presentes nas superfícies comuns.

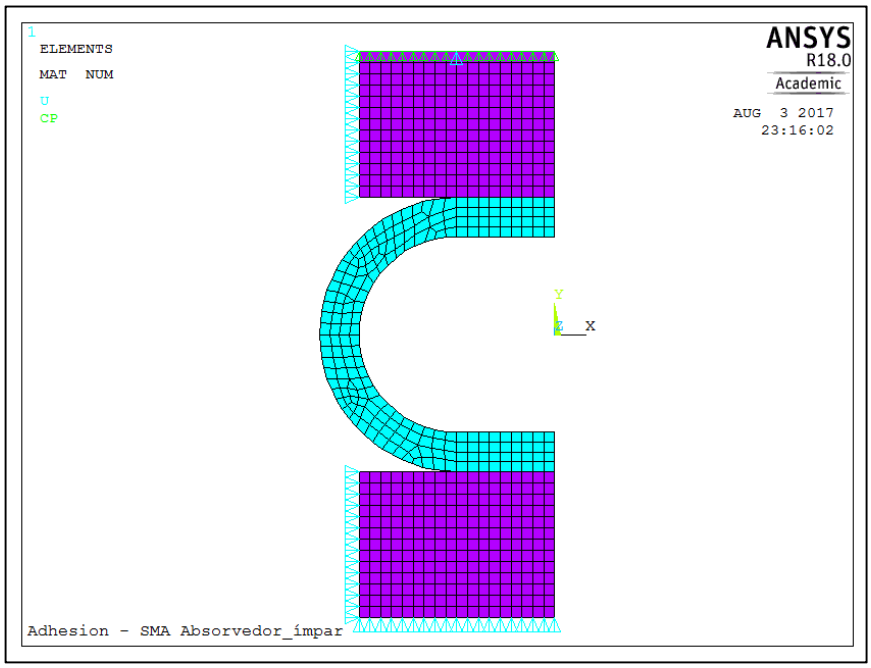


Figura II-7 – Condições de contorno e carregamento no modelo numérico do Absorvedor em S de *SMA.*

II.3 Modelo constitutivo para a modelagem de ligas com memória de forma

Os comportamentos característicos das ligas com memória de forma podem ser representados através de diversos modelos disponíveis na literatura (Paiva e Savi, 2006; Lagoudas, 2008). O modelo constitutivo fenomenológico com variáveis internas de Aurrichio e Petrini (2004) é capaz de representar os principais comportamentos das *SMAs*, como os efeitos de memória de forma e de pseudoelasticidade, e está implementado no pacote comercial de elementos finitos ANSYS. As equações que descrevem o comportamento das *SMAs* são desenvolvidas a partir do estabelecimento da Energia Livre de *Helmholtz*:

$$\Psi(\varepsilon, \varepsilon_{tr}, T) = \frac{1}{2}E(\varepsilon - \varepsilon_{tr})^2 + \beta\langle T - M_f\rangle|\varepsilon_{tr}| + \frac{1}{2}h(\varepsilon_{tr})^2 + \mathcal{I}_{\varepsilon_L}(\varepsilon_{tr}) \qquad (3)$$

onde E é o módulo de elasticidade da liga, definido como $E_A + \xi_M(E_M - E_A)$, sendo E_A e E_M os módulos de elasticidade da austenita e da martensita, respectivamente. ξ_M representa a fração volumétrica de transformação de fase, ε_{tr} é a deformação associada à transformação de fase, βumfator de dependência da tensão com a temperatura *T*. Também são utilizados os seguintes parâmetros: a temperatura final de transformação da martensita (M_f) e o coeficiente de endurecimento (h). Finalmente, $\mathcal{I}_{\varepsilon_L}$ é a restrição necessária para satisfazer à norma da transformação de deformação, definida como $\begin{cases} 0, \text{se } |\varepsilon_{tr}| \leq \varepsilon_L \\ +\infty, \text{se } |\varepsilon_{tr}| > \varepsilon_L \end{cases}$

Derivando a energia livre de *Helmholtz* em relação a ε e a ε_{tr}, obtém-se as forças termodinâmicas, definidas por:

$$\begin{cases} \sigma = \frac{\delta\Psi}{\delta\varepsilon} = E(\varepsilon - \varepsilon_{tr}) \\ X = -\frac{\delta\Psi}{\delta\varepsilon_{tr}} = \sigma - \beta\langle T - M_f\rangle\frac{\varepsilon_{tr}}{|\varepsilon_{tr}|} - h\varepsilon_{tr} - \gamma\frac{\varepsilon_{tr}}{|\varepsilon_{tr}|} \end{cases} \qquad (4)$$

Dentre outros parâmetros do modelo constitutivo de Auricchio e Petrini (2004) estão $R(T)$, como o raio do domínio elástico,T_0, que representa a temperatura de referência em um estado livre de tensões, ε_L, associada à máxima deformação da transformação de fase e m, que denota o parâmetro de dependência de *Lode*, o qual indica a simetria ou assimetria entre as tensões características trativas e compressivas das ligas com memória de forma:

$$m = \sqrt{\frac{27}{2}}\frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \quad (5)$$

A Figura II-8 apresenta uma representação esquemática dos parâmetros do modelo de Auricchio e Petrini (2004).

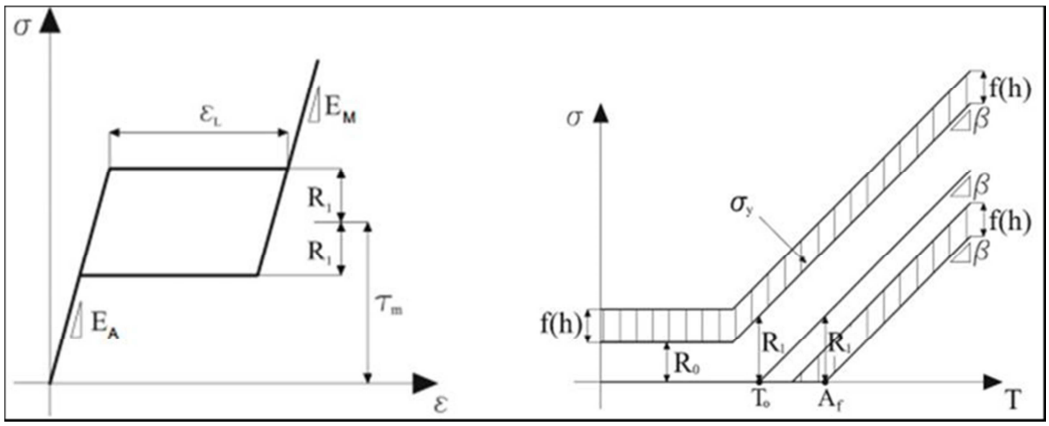


Figura II-8 – Representação esquemática dos parâmetros do modelo idealizado por Auricchio e Petrini (2004).

As Figuras III-9 a III-12 apresentam simulações desenvolvidas com o modelo de uma barra com carregamento axial puro implementado em ANSYS para avaliar qualitativamente a influência dos parâmetros do modelo constitutivo de Auricchio e Petrini (2004) na curva tensão-deformação. A Figura II-9 apresenta a variação do parâmetro h, mantendo-se fixos todos os demais parâmetros para três curvas distintas. A análise da Figura II-9 expressa uma notável mudança da inclinação dos platôs de transformação de fase, de maneira que, quanto maior for valor de h, maior é a inclinação. A Figura II-10 apresenta a variação isolada do parâmetro R. Neste caso, repara-se a variação significativa da altura do laço de histerese, de maneira que, quanto maior for o valor de R, maior é a altura do laço. A Figura II-11 apresenta a variação isolada do parâmetro β. Nesta análise, não há mudança na forma ou tamanho da curva, mas sim sua translação conforme é alterado o valor deste parâmetro, de maneira que valores maiores de β impliquem em tensões e deformações maiores. Por fim, a Figura II-12 apresenta a variação do parâmetro ε_L isoladamente. Como pode ser observado na Figura II-12, quanto maior for o valor de ε_L, por consequência, maior será a largura do laço de histerese.

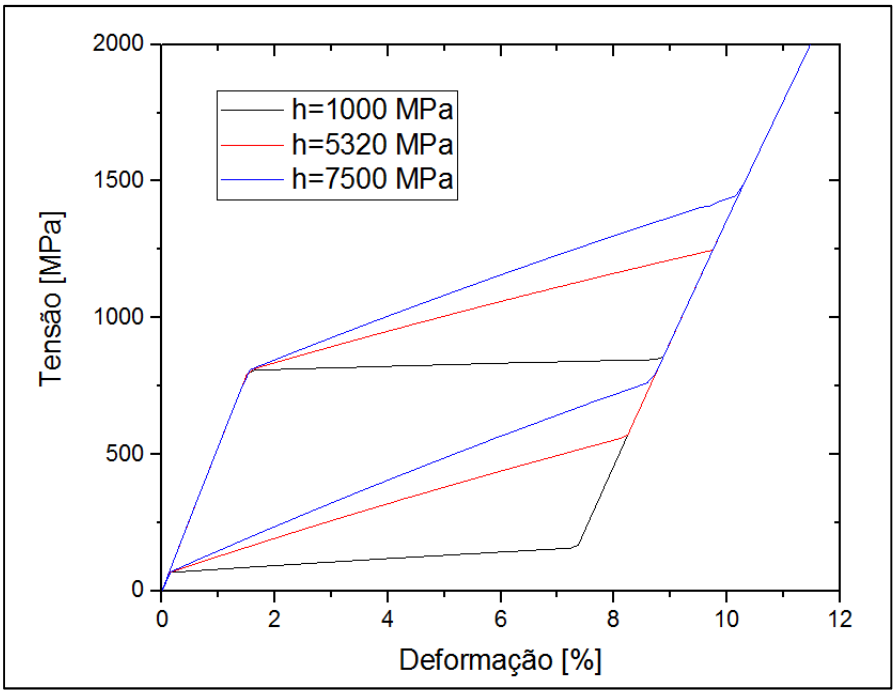


Figura II-9 – Variação do parâmetro h.

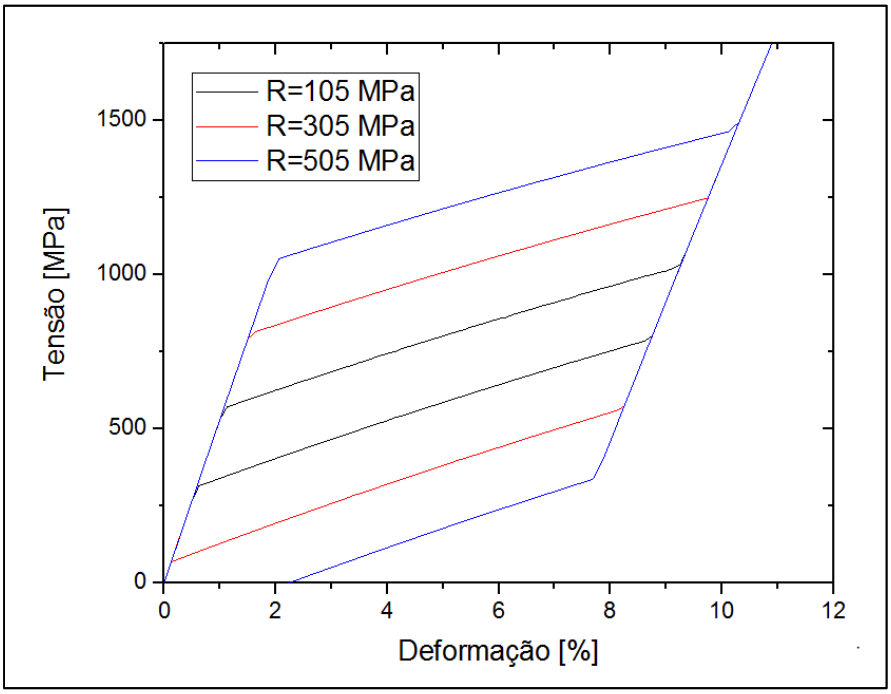


Figura II-10 – Variação do parâmetro $\boldsymbol{R}$.

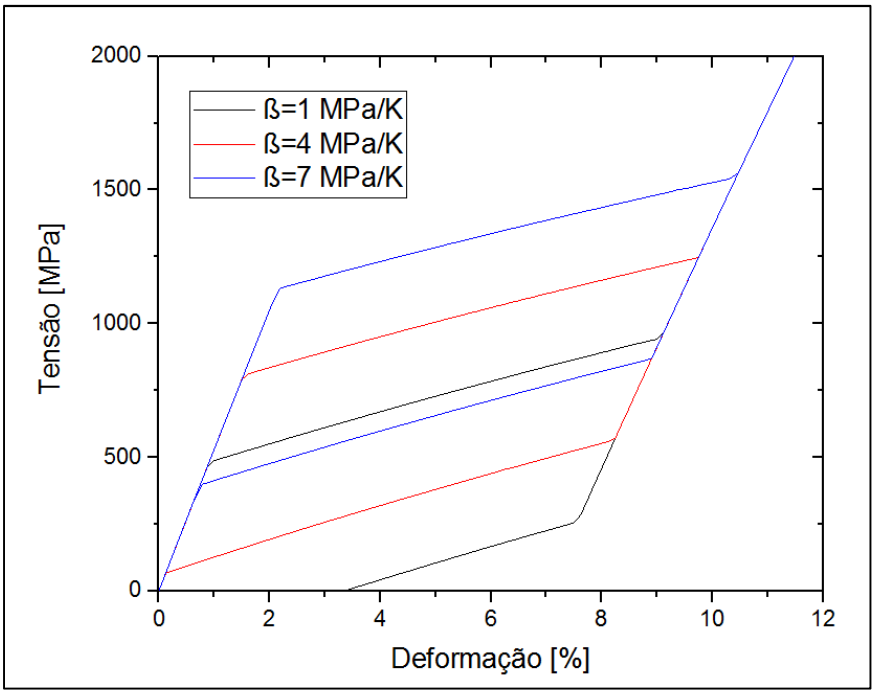


Figura II-11 – Variação do parâmetro $\boldsymbol{\beta}$.

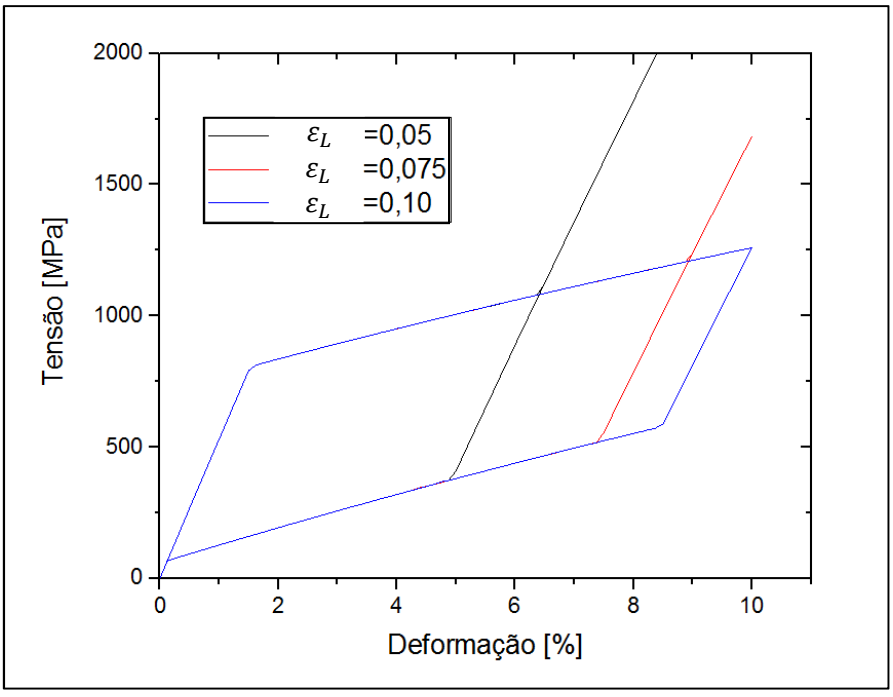


Figura II-12 – Variação do parâmetro $\boldsymbol{\varepsilon_L}$.

II.4 Calibração do modelo numérico

Para a calibração dos parâmetros constitutivos do modelo numérico são utilizados os dados experimentais presentes na literatura em Xi Xie *et al.* (2016). Os autores analisaram a influência da taxa de carregamento em corpos de prova de seção retangular de *SMAs* superelásicas do tipo SE508 através de ensaios cíclicos de tração uniaxial com deformação e tensão controladas. A Figura II-13 apresenta as dimensões dos corpos de prova utilizados. O material consiste em uma liga de memória de forma austenítica de NiTi, cuja temperatura final de transformação de fase austenítica A_f é de 0,8°C. As amostras foram submetidas a um regime de 20 ciclos à temperatura ambiente (23°C) cada sob três taxas de deformação distintas: 0,0006 s^{-1}, 0,006s^{-1} e 0,06s^{-1}.

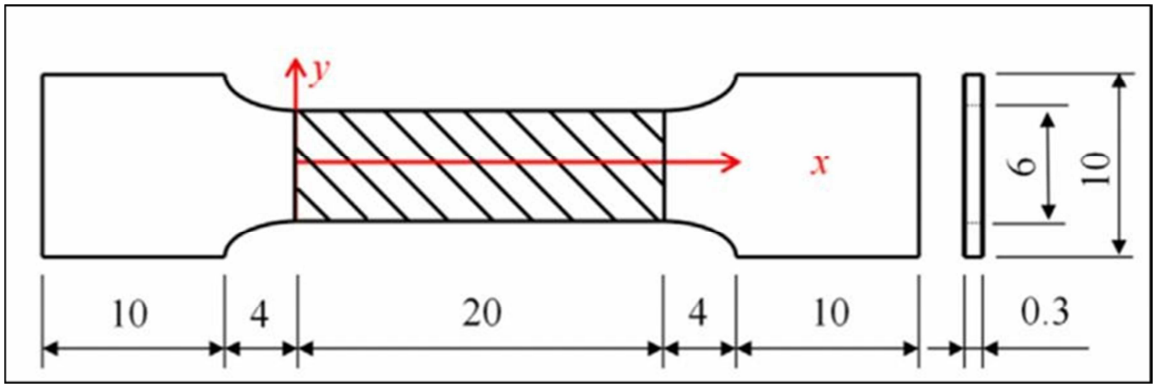


Figura II-13 – Dimensões dos corpos de prova de seção retangular utilizados por Xi Xie *et al*. (2016) – medidas em milímetros.

Para a obtenção dos parâmetros constitutivos, utiliza-se um modelo numérico simplificado a partir do método de elementos finitos através do *software* ANSYS Mechanical (ANSYS, 2018) para representar as mesmas condições do ensaio de tração uniaxial. O corpo de prova é representado através de um único elemento unidimensional (elemento do tipo BEAM188) apenas por seu comprimento útil engastado em uma das extremidades e sujeito a um deslocamento prescrito não nulo na outra. A Figura II-14 apresenta o único elemento que abrange toda a geometria com as dimensões do comprimento útil do corpo de prova de Xi Xie *et al*. (2016), conforme a Figura II-13, e as condições de contorno do modelo numérico do ensaio de tração. A Figura II-15 apresenta a tensão equivalente segundo *von Mises* com o valor de 126 MPa, que condiz exatamente com o valor calculado analiticamente para o mesmo deslocamento aplicado.

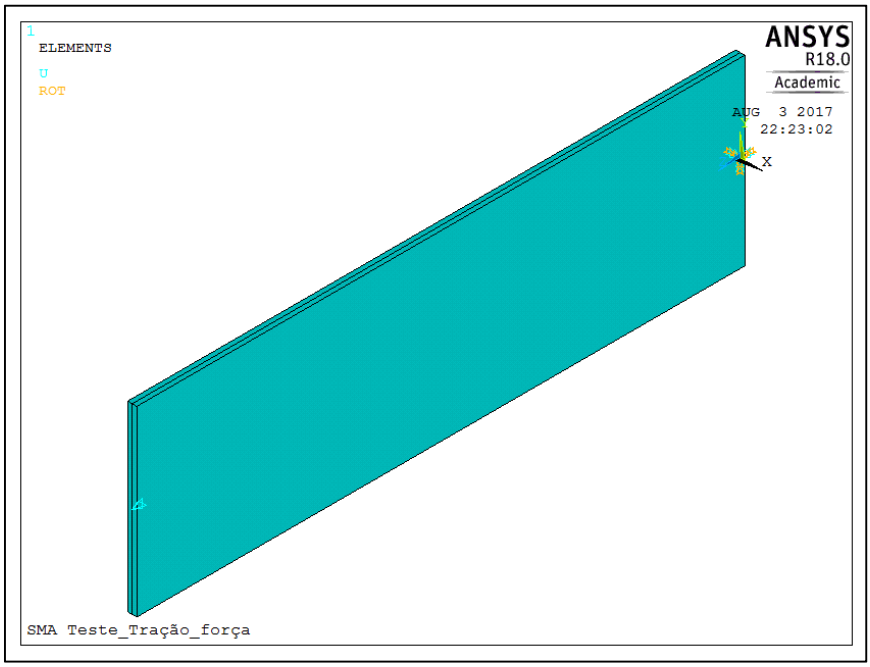


Figura II-14 – Modelo numérico em ANSYS do ensaio de tração uniaxial do corpo de prova de seção retangular utilizado por Xi Xie *et al.* (2016).

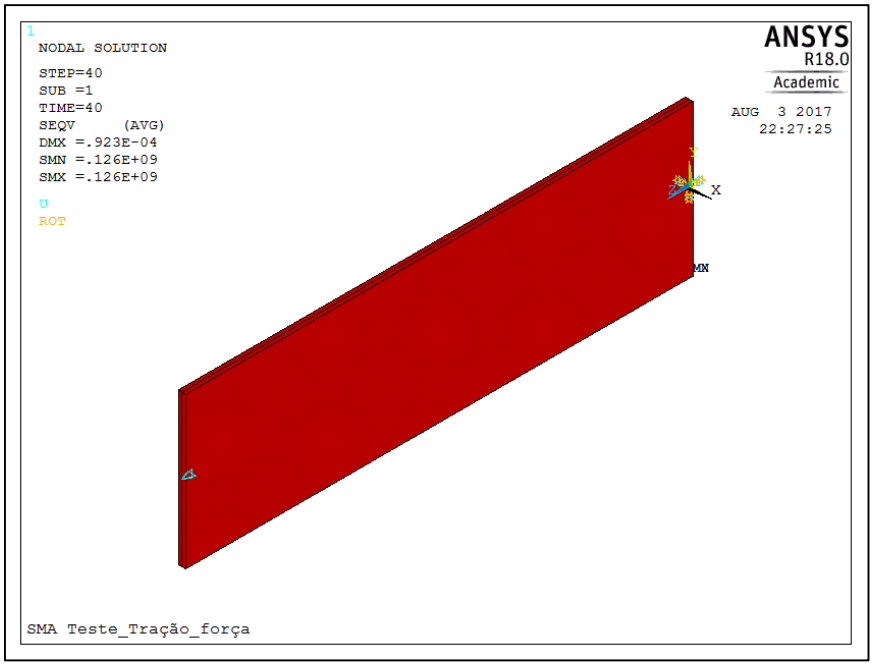


Figura II-15 – Resultados numéricos da distribuição de tensão equivalente de *von Mises* sob deformação de 0,46%.

Com base na análise dos parâmetros constitutivos do modelo de Auricchio e Petrini (2004), apresentados no item II.3, ajustam-se os parâmetros através de um processo iterativo até que exista uma boa concordância entre as curvas experimental, gerada por Xi Xie *et al.* (2016), e numérica. Sendo assim, em uma primeira tentativa

são escolhidos determinados valores dos parâmetros constitutivos, com base na sua representação gráfica no gráfico tensão-deformação, para gerar um laço de histerese e compará-lo com o laço obtido experimentalmente por Xi Xie *et al.* (2016). Em uma segunda tentativa, os parâmetros constitutivos são reajustados até que a curva numérica aproxime-se mais da curva experimental. Este procedimento se sucede até que as curvas experimental e numérica superponham-se com um bom grau de aproximação. A Figura II-16 mostra que o modelo representa adequadamente o comportamento pseudoelástico do material. A Tabela II-4 apresenta os valores finais dos parâmetros constitutivos obtidos.

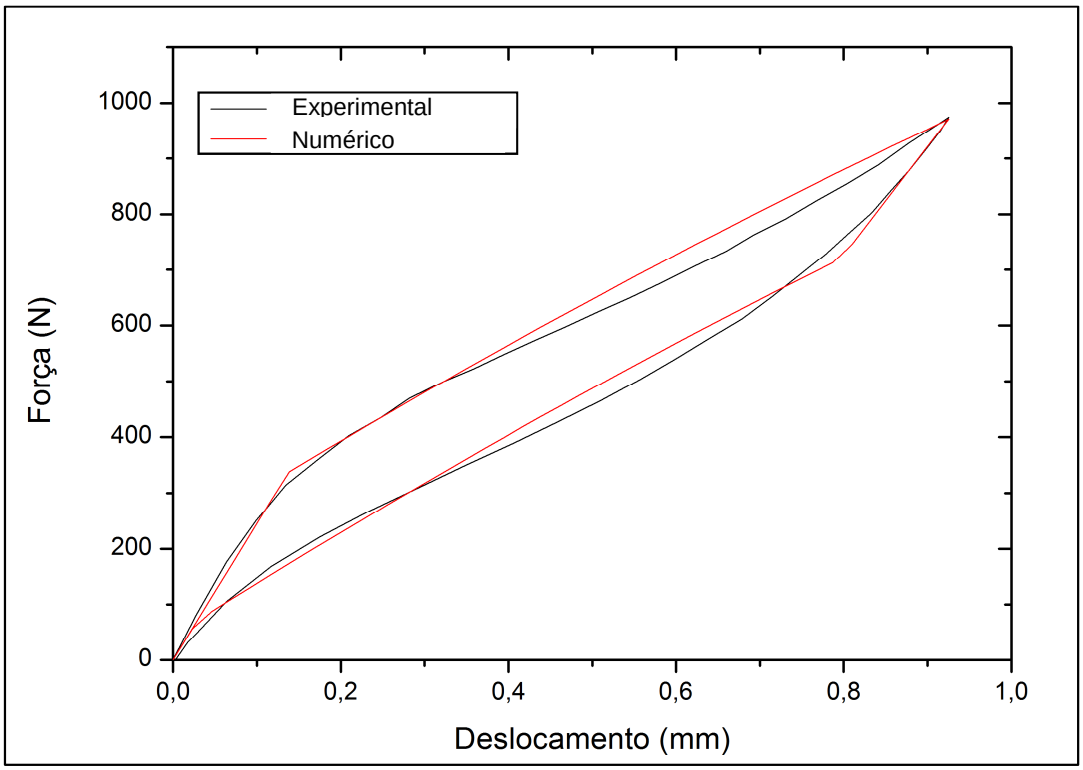


Figura II-16 – Superposição entre as curvas histerética experimental e numérica.

Tabela II-4 – Parâmetros constitutivos obtidos após a calibração.

Parâmetro	Valor
h (GPa)	11,50
T_0 (K)	273,95
R (MPa)	60,50
β (MPa/K)	4,20
ε_L (-)	0,046
E_M (GPa)	21,61
m	0

III. Resultados

Este capítulo apresenta uma discussão acerca dos principais resultados da análise dos absorvedores, investigando a influência de parâmetros geométricos (*n* e *i*) e do modo de carregamento (trativo ou compressivo) na capacidade dissipativa e rigidez de um absorvedor em S de *SMA*.

A fim de aplicar a metodologia proposta, os deslocamentos prescritos para cada caso de simulação devem ser calculados em função dos 80% do limite de ruptura do material de especificação SE508, cujos dados técnicos encontram-se no Anexo I. Para a liga analisada, estabelece-se um valor 856 MPa. A obtenção dos deslocamentos prescritos requer um processo iterativo em que são colocados como dados de entrada valores iniciais de deslocamento prescrito até que a tensão máxima calculada pela simulação esteja na faixa de 849 MPa a 863 MPa, que não representa um desvio muito significativo do valor de tensão proposto.

A Tabela III-1e a apresentam os valores de deslocamento prescrito e tensão equivalente de saída segundo von Mises para todos os casos de simulação nos modos compressivo e trativo, respectivamente.

Tabela III-1 – Deslocamentos prescritos com as respectivas tensões de saída para as geometrias no modo de carregamento compressivo.

MODO COMPRESSIVO			
n **(Dobras)**	***i*** **(-)**	***Amp_u*** **(m)**	σ_{MISES} **(MPa)**
1	4	$-3{,}380.10^{-3}$	850
	3	$-2{,}520.10^{-3}$	853
	2	$-1{,}635.10^{-3}$	859
2	4	$-7{,}650.10^{-3}$	851
	3	$-6{,}150.10^{-3}$	856
	2	$-3{,}650.10^{-3}$	860
3	4	$-1{,}415.10^{-2}$	858

MODO COMPRESSIVO			
n **(Dobras)**	***i*** **(-)**	***Amp_u*** **(m)**	σ_{MISES} **(MPa)**
	3	$-9{,}600.10^{-3}$	855
	2	$-5{,}600.10^{-3}$	849
4	4	$-1{,}593.10^{-2}$	851
	3	$-1{,}148.10^{-2}$	854
	2	$-7{,}000.10^{-2}$	853
5	4	$-2{,}810.10^{-2}$	861
	3	$2{,}069.10^{-2}$	850
	2	$-1{,}085.10^{-2}$	856

Tabela III-2 – Deslocamentos prescritos com as respectivas tensões de saída para as geometrias no modo de carregamento trativo.

MODO TRATIVO			
n **(Dobras)**	***i*** **(-)**	***Amp_u*** **(m)**	σ_{MISES} **(MPa)**
1	4	$2{,}450.10^{-3}$	856
	3	$2{,}025.10^{-3}$	858
	2	$1{,}450.10^{-3}$	860
	1,5	$1{,}165.10^{-3}$	857
	1	$8{,}420.10^{-4}$	849
	0,75	$7{,}900.10^{-4}$	858
2	4	$6{,}525.10^{-3}$	852
	3	$5{,}280.10^{-3}$	852
	2	$3{,}575.10^{-3}$	852
	1,5	$2{,}615.10^{-3}$	854
	1	$1{,}680.10^{-3}$	851
	0,75	$1{,}360.10^{-3}$	857
3	4	$1{,}075.10^{-2}$	855
	3	$7{,}880.10^{-3}$	857
	2	$5{,}050.10^{-3}$	853
	1,5	$3{,}580.10^{-3}$	850
	1	$2{,}380.10^{-3}$	857
	0,75	$1{,}835.10^{-3}$	855
4	4	$1{,}475.10^{-3}$	849
	3	$1{,}060.10^{-3}$	852
	2	$6{,}835.10^{-3}$	853
	1,5	$4{,}985.10^{-3}$	860
	1	$3{,}285.10^{-3}$	854
	0,75	$2{,}430.10^{-3}$	851
5	4	$1{,}980.10^{-2}$	856

MODO TRATIVO			
n **(Dobras)**	***i*** **(-)**	***Amp_u*** **(m)**	σ_{MISES} **(MPa)**
	3	$1{,}480.10^{-2}$	856
	2	$9{,}375.10^{-3}$	859
	1,5	$6{,}675.10^{-3}$	857
	1	$4{,}185.10^{-3}$	861
	0,75	$2{,}950.10^{-3}$	854
6	4	$2{,}415.10^{-2}$	858
	3	$1{,}750.10^{-3}$	857
	2	$1{,}105.10^{-2}$	854
	1,5	$7{,}800.10^{-3}$	850
	1	$4{,}890.10^{-3}$	850
	0,75	$3{,}515.10^{-3}$	856
7	4	$2{,}907.10^{-2}$	861
	2	$1{,}355.10^{-2}$	854
	0,75	$4{,}050.10^{-3}$	854
8	4	$3{,}350.10^{-2}$	862
	2	$1{,}525.10^{-2}$	852
	0,75	$4{,}615.10^{-3}$	860
9	4	$3{,}825.10^{-2}$	860
	2	$1{,}775.10^{-2}$	859
	0,75	$5{,}125.10^{-3}$	861
10	4	$4{,}275.10^{-2}$	862
	2	$1{,}949.10^{-2}$	855
	0,75	$5{,}665.10^{-3}$	852

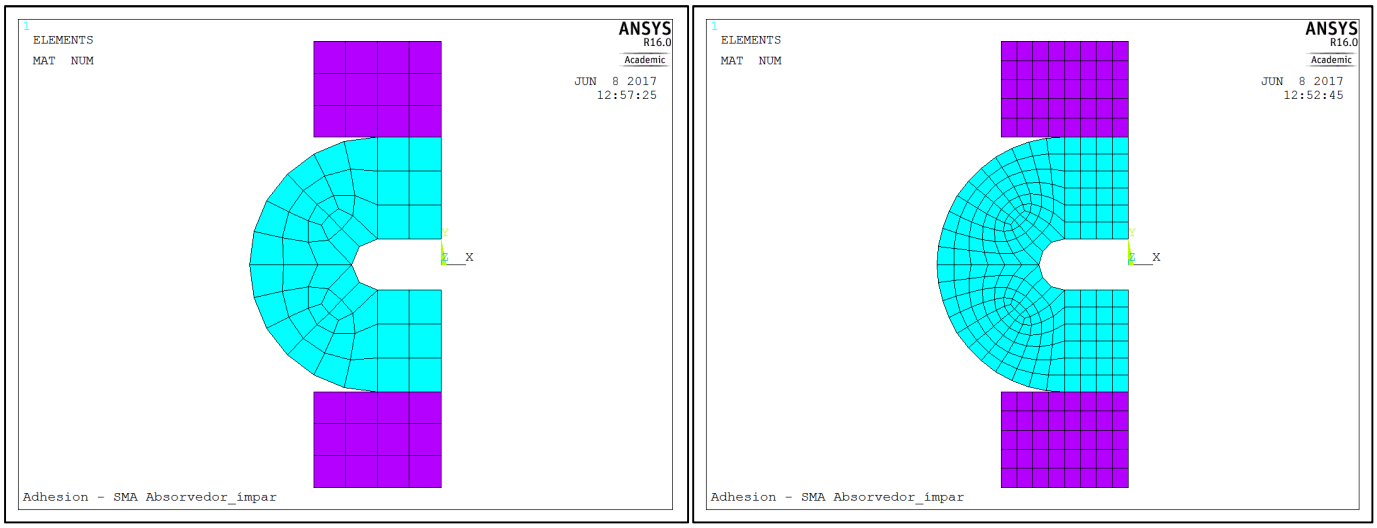
III.1 Análise de convergência

As simulações são precedidas de uma análise de convergência no espaço para a geometria mais rígida empregada (*n*=1 com *i*=0,75), assim como para a geometria menos rígida (*n*=10 com *i*=2), a fim de determinar um fator de refinamento ideal para a malha. Adicionalmente, realiza-se uma análise de convergência no tempo com o objetivo de definir um número ideal de divisões do deslocamento prescrito máximo aplicado.

III.2 Análise de convergência no espaço

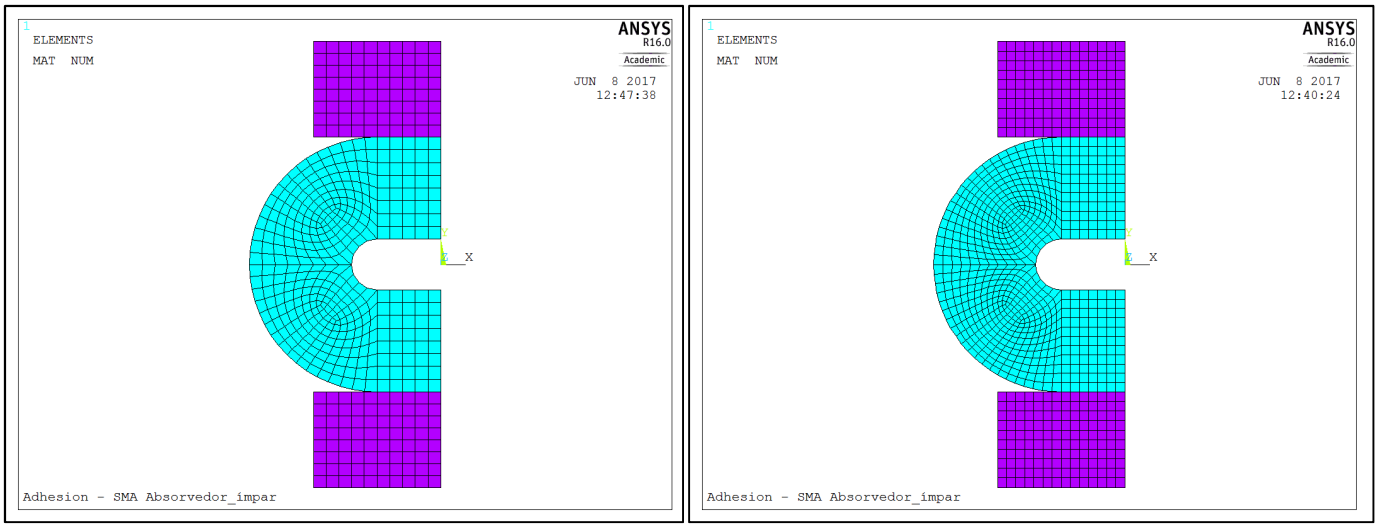
O processo de geração da malha é desenvolvido com o auxílio de um parâmetro chamado fator de refinamento da malha, denotado simplesmente por *Fator*, cujo papel é dividir o tamanho do elemento por números inteiros. A análise de convergência no espaço consiste em aumentar este parâmetro de 2 a 16 com múltiplos de 2, de maneira a estabelecer diferentes malhas que gerem resultados distintos, expressos por suas curvas histeréticas no gráfico força-deslocamento. Inicialmente, utilizou-se um número fixo de subdivisões para a aplicação do ciclo carregamento-descarregamento igual a 6, equivalente ao raio de curvatura da geometria do elemento em S.

As Figuras IV-1 a IV-4 apresentam as malhas obtidas com fatores de refinamento distintos para a geometria mais rígida (n=1 com i=0,75). A Tabela III-3 correlaciona o *Fator* com o número de elementos gerados para a mesma geometria. A Figura III-5 apresenta as curvas histeréticas no gráfico força-deslocamento para cada um dos fatores utilizados. Nota-se que os laços de histerese tendem a se sobrepor à medida que o *Fator* aumenta. É válido ressaltar, no entanto, que malhas mais refinadas implicam em um processamento numérico maior, o que é uma consideração importante em um estudo que lida com um número grande de simulações.



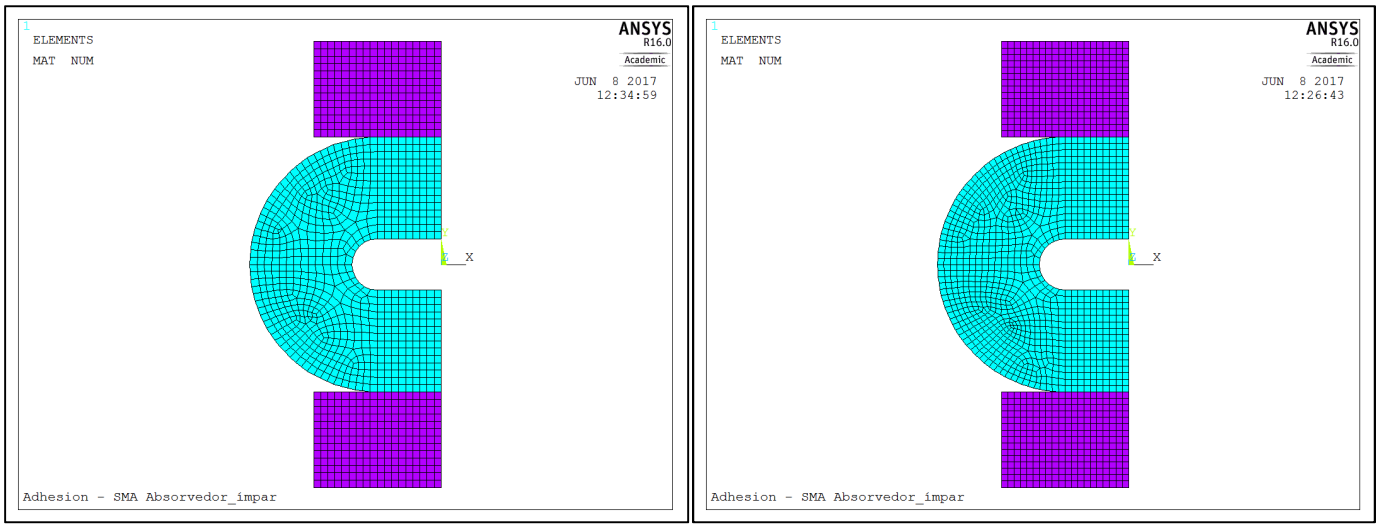
(a) (b)

Figura III-1 – Malhas com fator igual a 2 (a) e 4 (b).



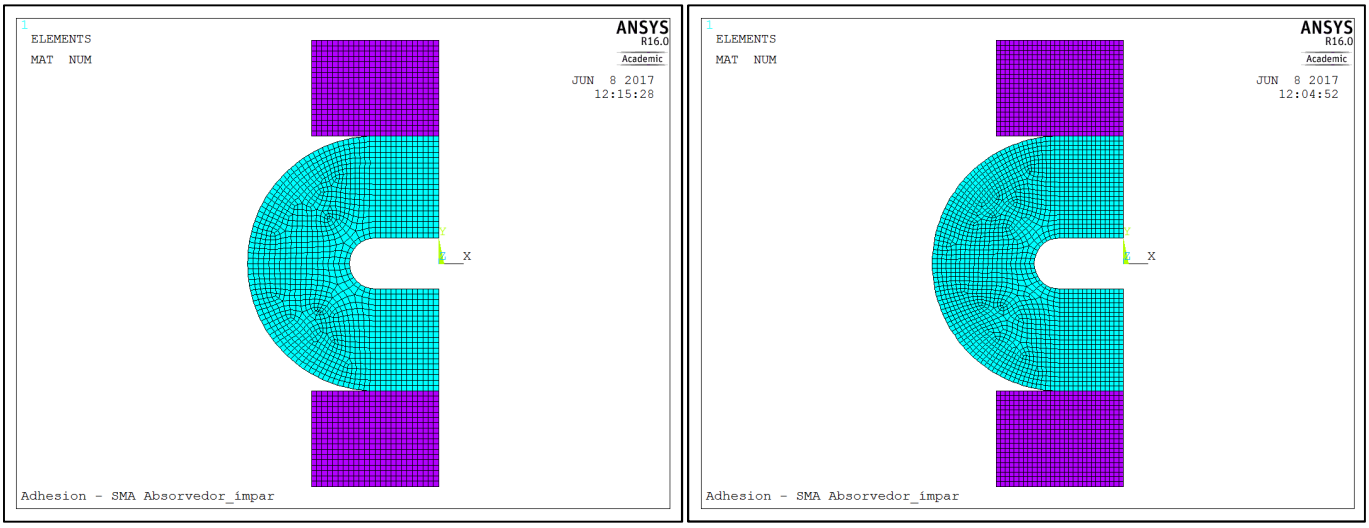
(a) (b)

Figura III-2 – Malhas com fator igual a 6 (a) e 8 (b).



(a) (b)

Figura III-3 – Malhas com fator igual a 10 (a) e 12 (b).



(a) (b)

Figura III-4 – Malhas com fator igual a 14 (a) e 16 (b).

Tabela III-3 – Número de elementos para diferentes fatores de refinamento da malha para a geometria de *n*=1 e *i*=0.75.

Fator	Número de Elementos
2	80
4	284
6	544
8	976
10	1225
12	1642
14	2303
16	2994

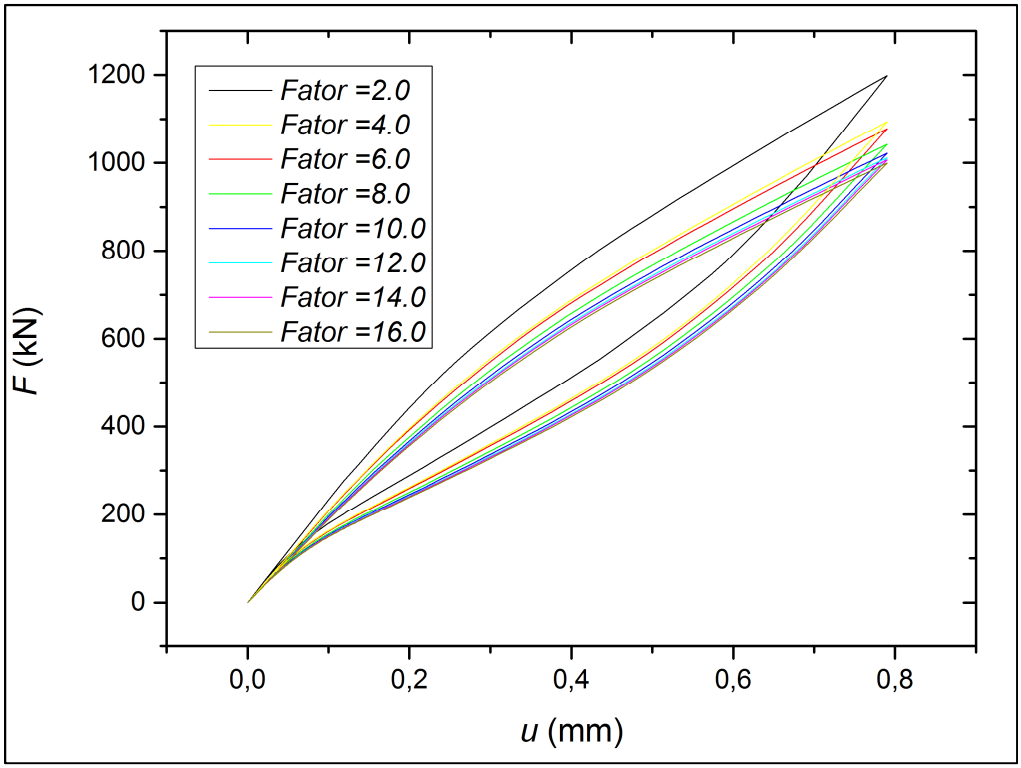
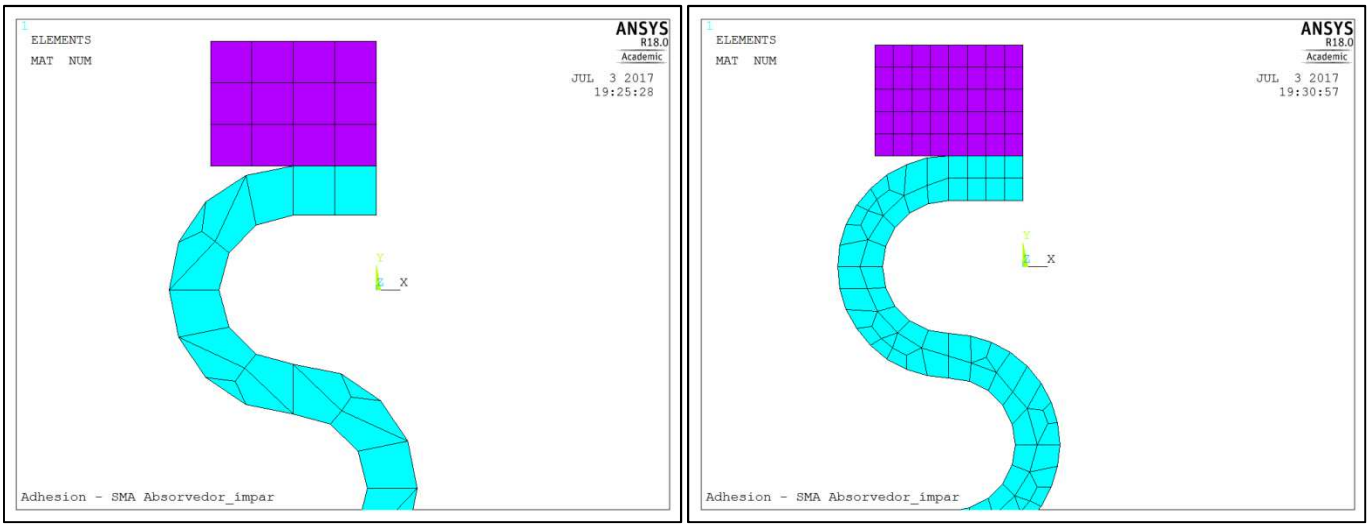


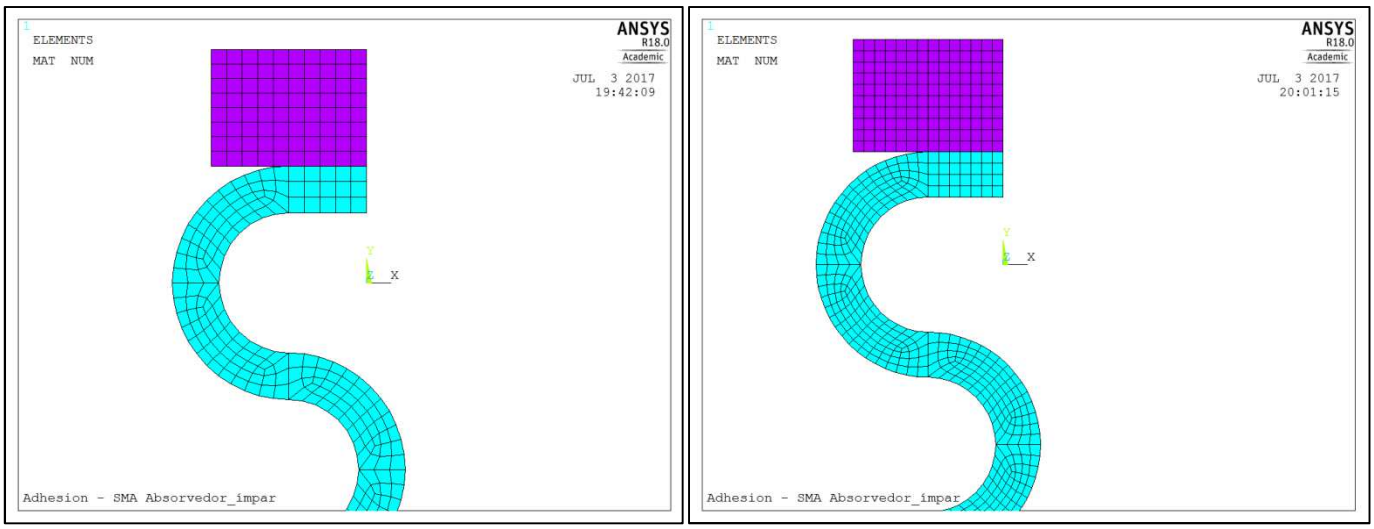
Figura III-5 – Análise de convergência no espaço da geometria de *n*=1 e *i*=0,75.

As Figuras IV-6 a IV-9 apresentam as malhas obtidas com fatores de refinamento distintos para a geometria menos rígida (*n*=10 com *i*=2). A Tabela III-4 correlaciona o *Fator* com o número de elementos gerados para a mesma geometria. A Figura III-10 apresenta as curvas histeréticas no gráfico força-deslocamento para cada um dos fatores utilizados. Novamente, pode-se observar que os laços de histerese tendem a se sobrepor com o aumento do *Fator*.



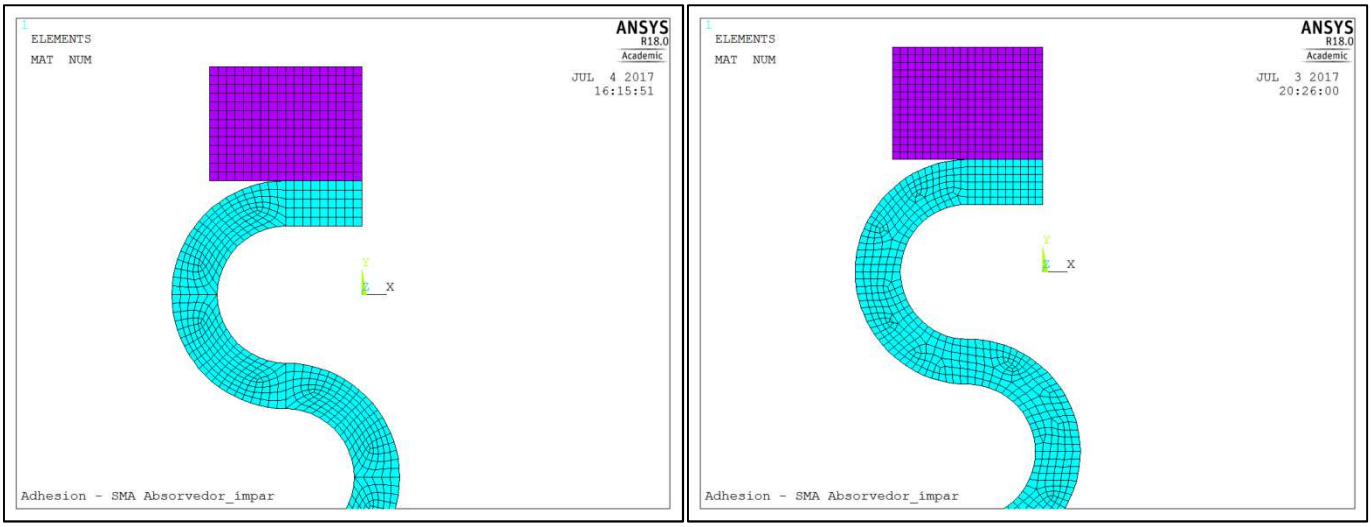
(a) (b)

Figura III-6 – Malhas com fator igual a 2 (a) e 4 (b).



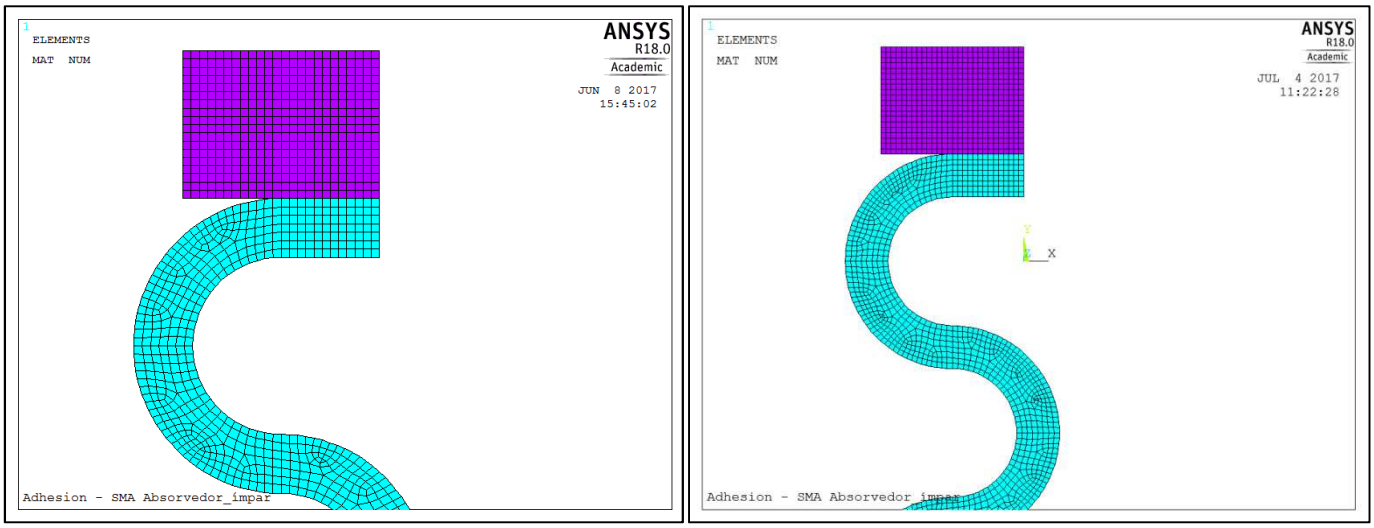
(a) (b)

Figura III-7 – Malhas com fator igual a 6 (a) e 8 (b).



(a) (b)

Figura III-8 – Malhas com fator igual a 10 (a) e 12 (b).



(a) (b)

Figura III-9 – Malhas com fator igual a 14 (a) e 16 (b).

Tabela III-4 – Número de elementos para diferentes fatores de refinamento da malha para a geometria de *n*=10 e *i*=2.

Fator	Número de Elementos
2	148
4	407
6	1230
8	2216
10	3518
12	3389
14	4414
16	5750

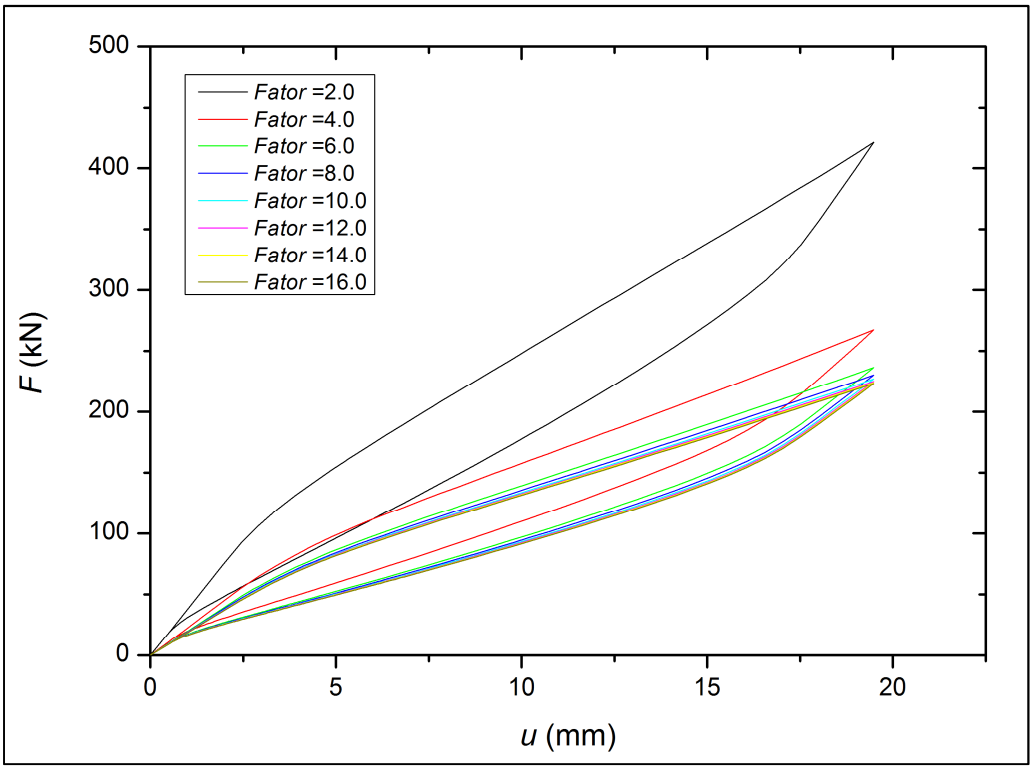


Figura III-10 – Análise de convergência no espaço da geometria de *n*=10 e *i*=2.

Com base nos resultados apresentados, seleciona-se o fator de refinamento da malha igual a 10, pois além de gerar uma boa precisão nos resultados, dada pelo reduzido desvio de sua curva histerética em relação à de fatores superiores, implica em um processamento numérico relativamente baixo.

III.3 Análise de convergência no tempo

Em todos os casos de simulação, o deslocamento prescrito máximo é dividido por um número fixo de passos de carregamento e descarregamento. A análise de convergência no tempo consiste, portanto, em avaliar o aumento do número de divisões do carregamento até que se observe a convergência dos resultados. Nesta análise, inicia-se com 10 divisões, chegando-se a 40 com um incremento de 10, tanto para a etapa de carregamento, quanto de descarregamento, de maneira a estabelecer diferentes curvas histeréticas no gráfico força-deslocamento. Como a variação do número de divisões do carregamento independe da geometria escolhida, utiliza-se um caso de simulação de geometria qualquer para a análise de convergência no tempo.

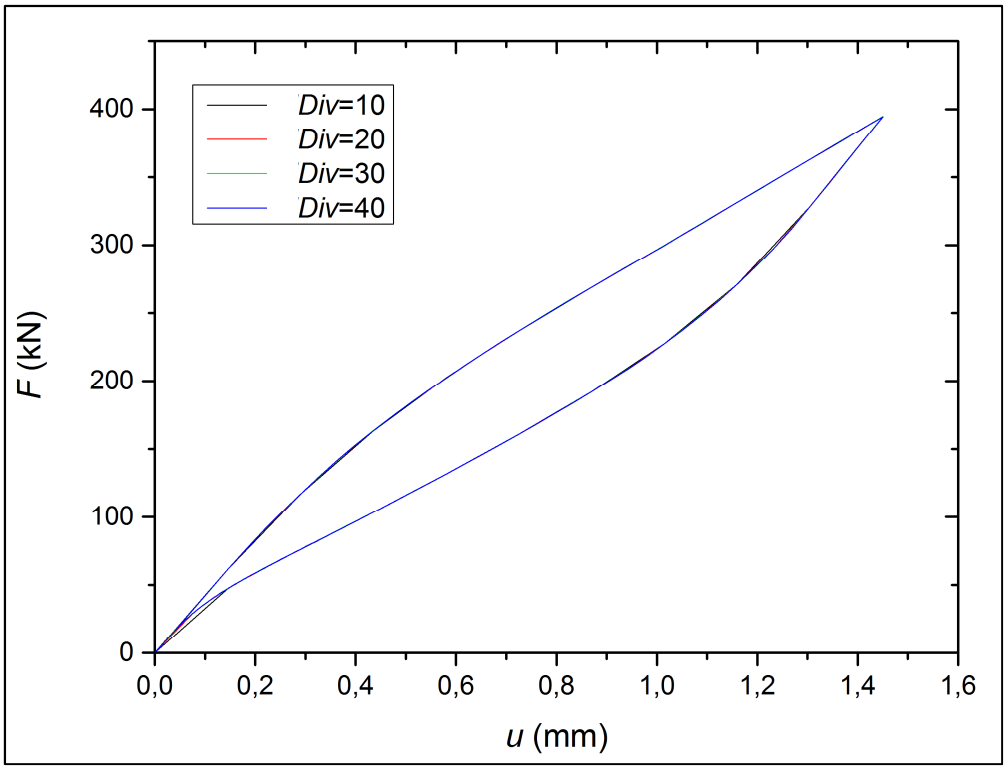


Figura III-11 – Análise de convergência no tempo.

Como pode ser observado na Figura III-11, a alteração do número de divisões não gera desvios significativos entre os testes rodados. No entanto, seleciona-se o número de divisões igual a 40, uma vez que gera um número maior de pares ordenados *F*×*u* nos arquivos de saída das simulações, permitindo uma melhor descrição da curva.

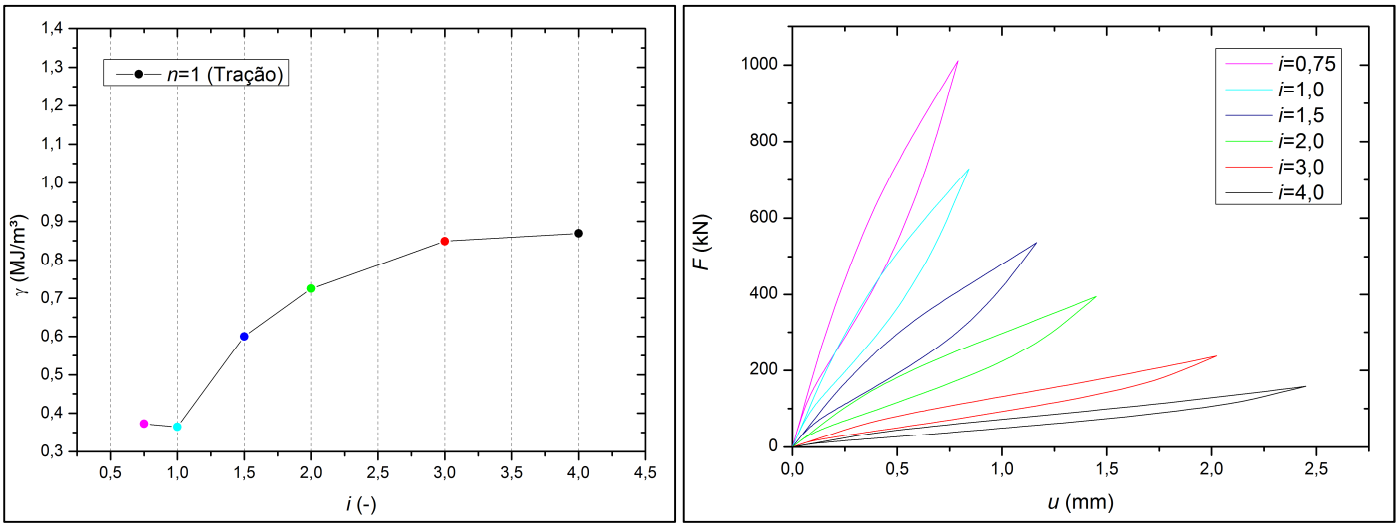
III.4 Estudo da influência da variação do índice i na dissipação de energia e rigidez

O estudo a seguir avalia a influência do índice *i* no valor da energia dissipada por unidade de volume (γ). Para cada um dos valores de número de dobras *n* analisados (*n*=1, 2, 3, 4, 5 e 6), são adotados 6 valores distintos do índice *i* (*i*=0,75; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 e 4,0), totalizando em 36 casos de simulação. Todos os casos são desenvolvidos considerando-se o modo trativo de carregamento.

As Figuras IV-12 a IV-17 apresentam os resultados das simulações através das curvas γ x *i* e *Fxu para* cada número de dobras *n*. Em todos os casos é possível observar qualitativamente uma queda da rigidez com o aumento do índice *i* em virtude da redução da espessura de parede do elemento de *SMA*. Para todos os valores de *n*,

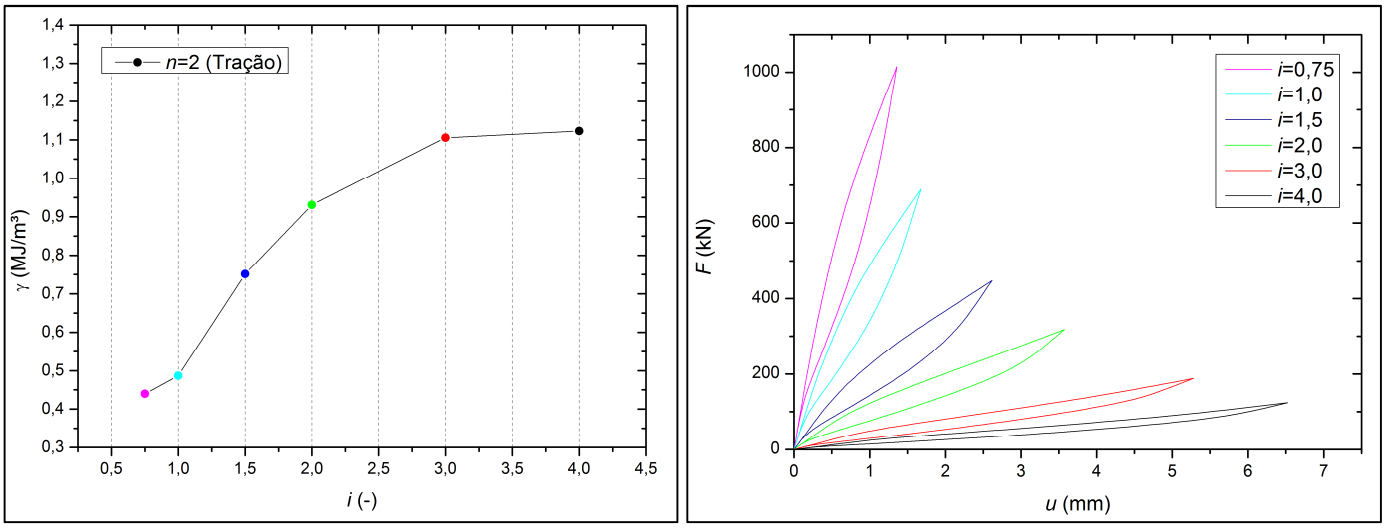
excetuando *n*=1, há uma clara tendência de crescimento de γ com a evolução de *i* e esta relação tende a ficar linear a partir de *n*=3.

Na Figura III-12 (a), que expõe os resultados para *n*=1, nota-se uma queda de γ entre *i*=0,75 e *i*=1,0, diferentemente da tendência apresentada pelos demais valores de *n*. Esse comportamento não monotônico pode ser explicado através da distribuição de fração volumétrica de martensita para as dadas geometrias, conforme a Figura III-18. É possível observar que a geometria de *i*=0,75 ao comparada com a de *i*=1,0 apresenta valores absolutos de fração volumétrica de martensita superiores (0,931042) e em maior concentração nas regiões de interface da placa e da dobra, o que resulta em um valor maior de γ. A Figura III-19 apresenta a distribuição de fração volumétrica de martensita para a geometria de n=1 e *i*=1,5. Esse efeito de concentração de tensões na região de interface é mais expressivo em geometrias de menores índices, e consequentemente maior rigidez, pois a curvatura do elemento de *SMA* nessas estruturas é maior. Ao comparar as geometrias da Figura III-18 e da Figura III-19, é possível observar que tanto a concentração quanto o valor absoluto de fração volumétrica de martensita diminuem conforme o índice *i* aumenta.



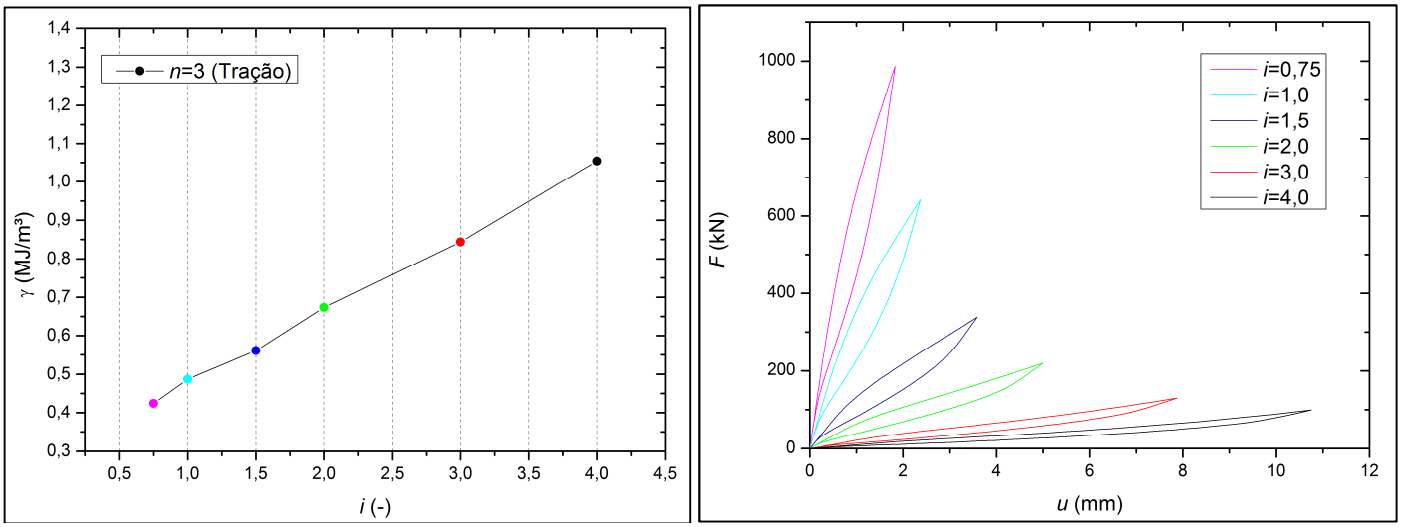
(a) (b)

Figura III-12 – Curvas γ versus *i* (a) e força-deslocamento (b) para as geometrias de *n*=1 no modo de carregamento trativo.



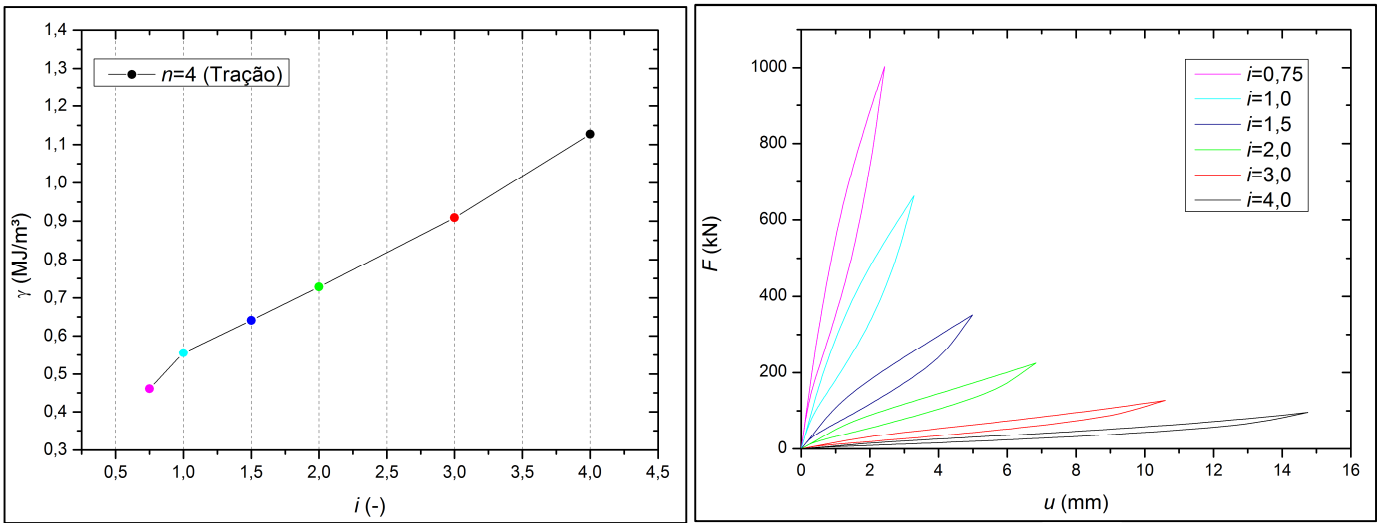
(a) (b)

Figura III-13– Curvas γ versus i (a) e força-deslocamento (b) para as geometrias de n=2 no modo de carregamento trativo.



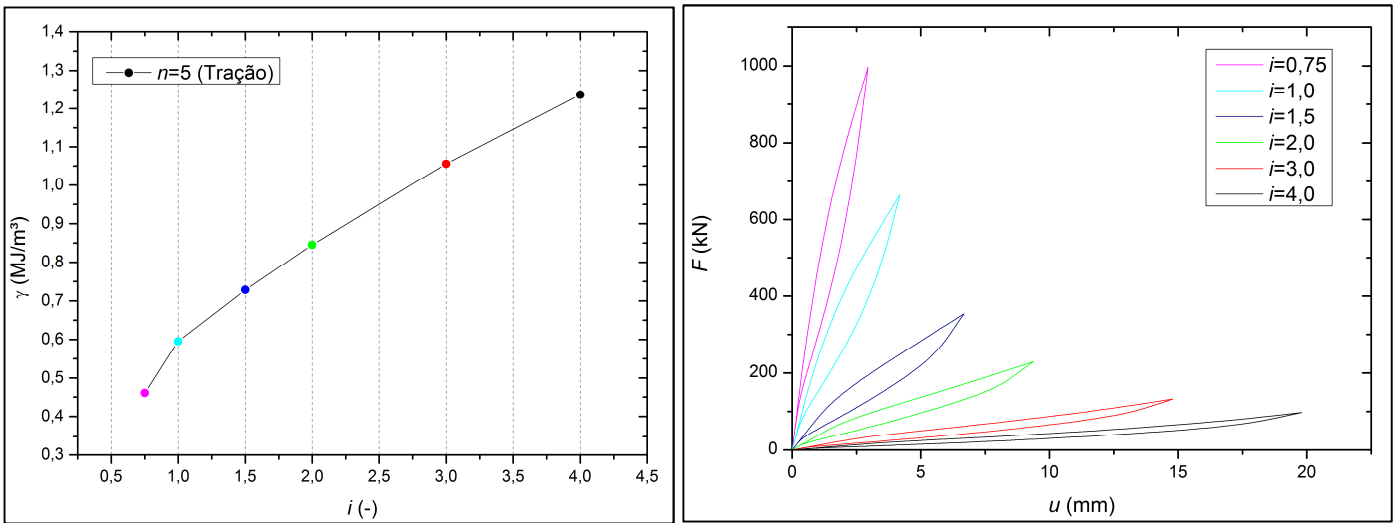
(a) (b)

Figura III-14– Curvas γ versus i (a) e força-deslocamento (b) para as geometrias de n=3 no modo de carregamento trativo.



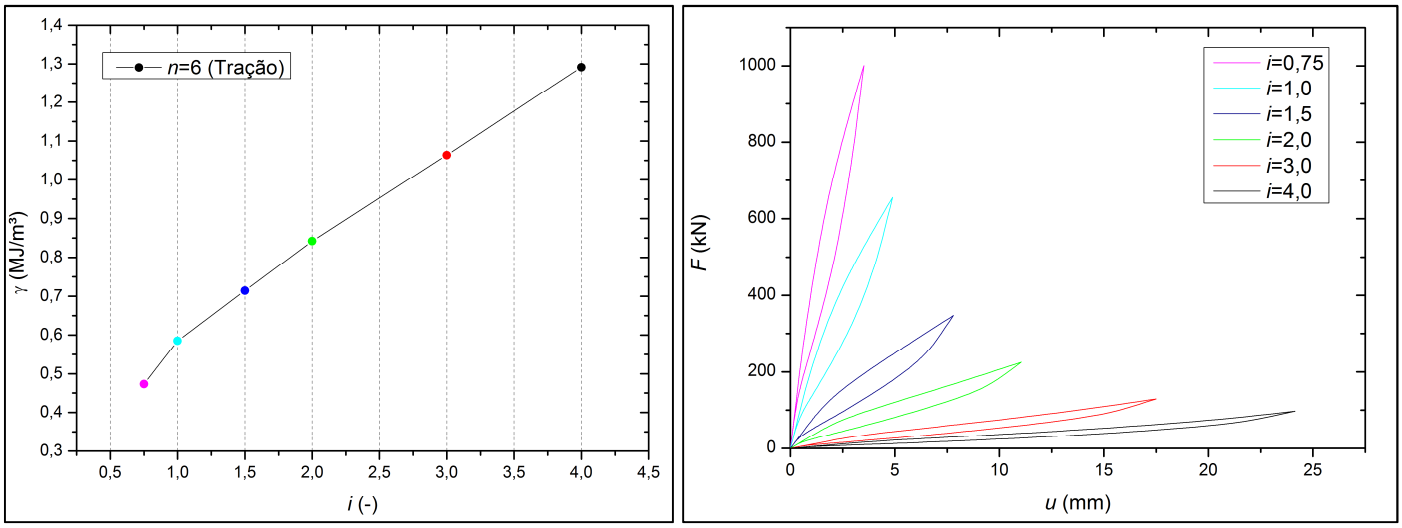
(a) (b)

Figura III-15 – Curvas γ versus *i* (a) e força-deslocamento (b) para as geometrias de *n*=4 no modo de carregamento trativo.



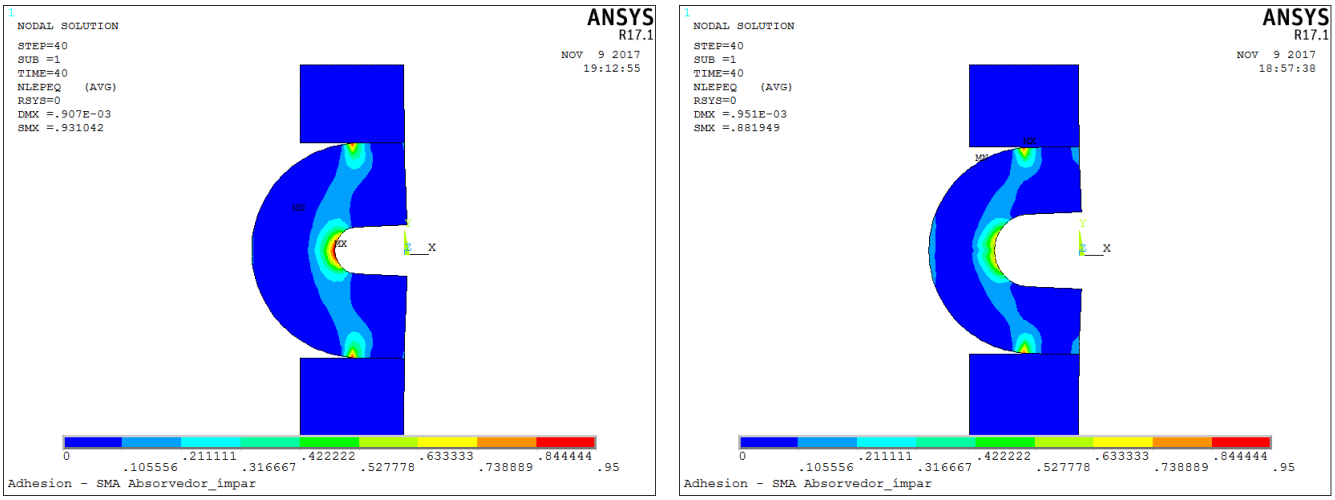
(a) (b)

Figura III-16 – Curvas γ versus *i* (a) e força-deslocamento (b) para as geometrias de *n*=5 no modo de carregamento trativo.



(a) (b)

Figura III-17 – Curvas γ versus *i* (a) e força-deslocamento (b) para as geometrias de *n*=6 no modo de carregamento trativo.



(a) (b)

Figura III-18 – Distribuição de fração volumétrica de martensita para as geometrias de *n*=1 com *i*=0,75 (a) e *n*=1 com *i*=1 (b).

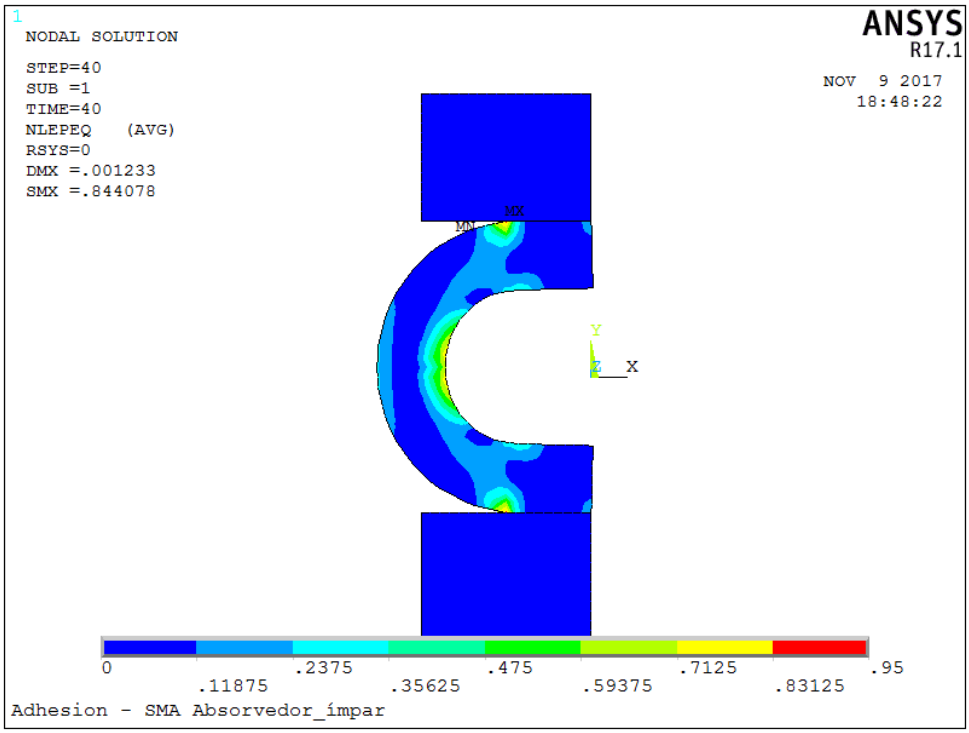


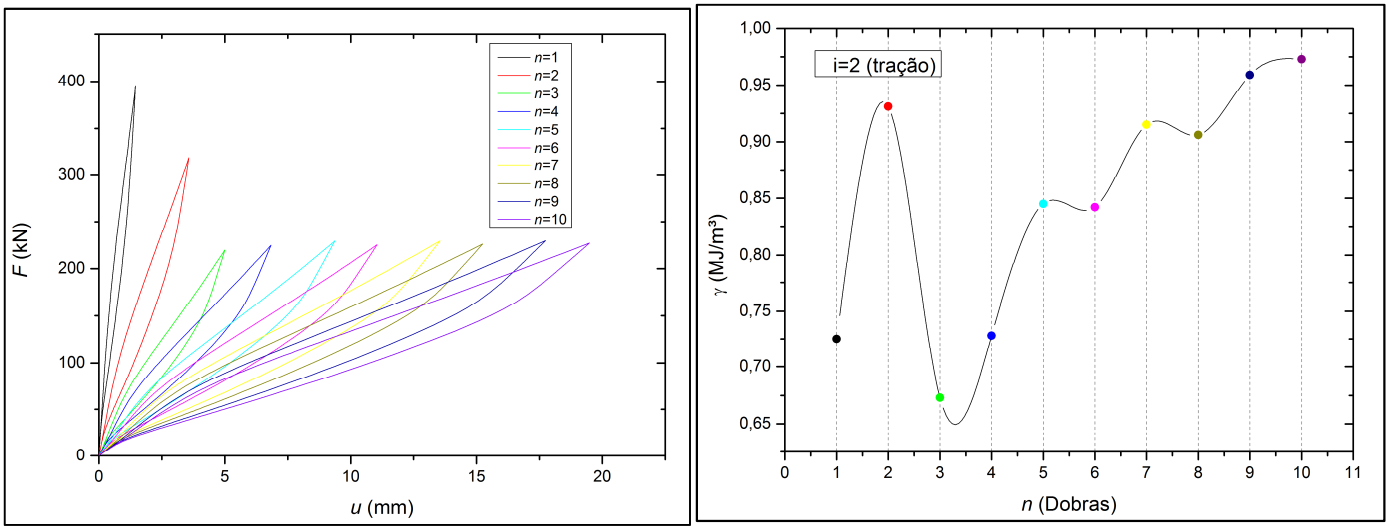
Figura III-19 – Distribuição de fração volumétrica de martensita para a geometria de n=1 com i=1,5

III.5 Estudo da influência da variação do número de dobras *n* na dissipação de energia e rigidez

A seguinte análise tem o objetivo de avaliar a influência do número de dobras (n) na quantidade de energia dissipada por unidade de volume (γ). Sendo assim, inicialmente adotam-se 10 casos de simulação distintos, em que o número de dobras n varia de 1 a 10 para um mesmo índice, i=2, no modo de carregamento trativo. Em uma segunda etapa do estudo, são adotados 20 casos adicionais de simulação, em que o número de dobras n varia de 1 a 10 para os índices i=0,75 e i=4, de maneira a comparar os resultados das geometrias mais rígidas e menos rígidas, respectivamente. O estudo limita-se a carregamentos de natureza trativa, pois as geometrias com o número de dobras maior sujeitas à compressão apresentam casos de interpenetração de elementos. Para que essas simulações apresentem valores de tensão conforme estabelecido no item II.1,referente a 80% do limite de escoamento do material, os valores de deslocamento prescrito são tais que a geometria se interpenetra.

A Figura III-20 apresenta os resultados do estudo nas curvas $F \times u$ e $\gamma \times n$ para i=2. Pela análise da Figura III-20 (a), pode-se observar qualitativamente uma redução da rigidez do sistema com a evolução de n. A análise da Figura III-20 (b) revela

também um crescimento de γ de n=3 a n=10, que tende a estabilizar à medida que n aumenta. No entanto, os valores de γ correspondentes às geometrias de n=1 e n=2 fogem da tendência apresentada pelas demais geometrias.



(a) (b)

Figura III-20 – Curvas força-deslocamento (a) e γ versus n (b) para as geometrias de i=2 no modo de carregamento trativo.

A Figura III-21 apresenta a curva que correlaciona força com deslocamento por número de voltas (deslocamento normalizado). Pode-se observar, pela análise do gráfico, que à medida que o número de voltas n aumenta, as curvas histeréticas tendem a se sobrepor. Isto significa que a partir da geometria com n=8 não há ganho significativo de γ ao aumentar n. Além disso, percebe-se novamente uma grande diferença entre os laços de histerese das geometrias de n=1 e n=2 em relação aos demais.

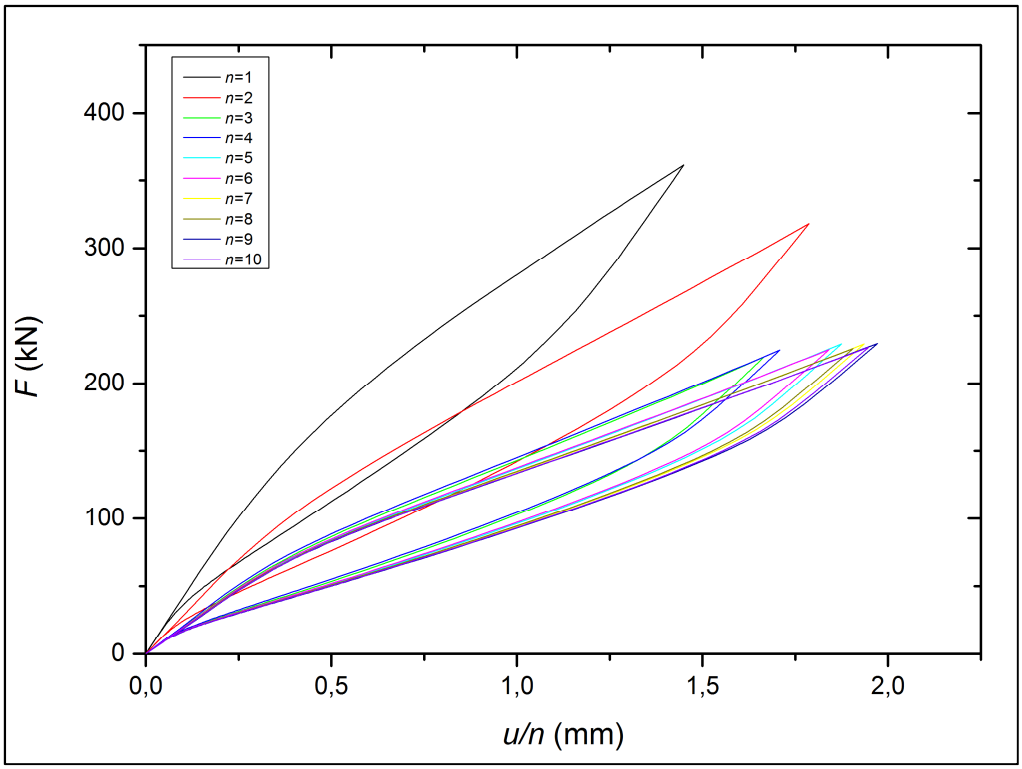


Figura III-21 – Curva força-deslocamento normalizado para as geometrias de *i*=2 no modo de carregamento trativo.

A Figura III-22 apresenta a curva que correlaciona energia dissipada e volume normalizados com o número de dobras *n*. É possível observar que há um salto inicial da energia dissipada em relação ao volume para *n*=2, evidenciando o comportamento atípico dessa geometria. Em *n*=2 o valor absoluto de energia dissipada é o único superior ao de sua geometria sucessora, isto é, sua energia dissipada é maior do que em *n*=3. No entanto, à medida que *n* aumenta a partir de *n*=3, a energia dissipada tende a crescer em uma proporção maior do que o crescimento do volume, o que pode ser observado pelo afastamento gradativo entre as curvas.

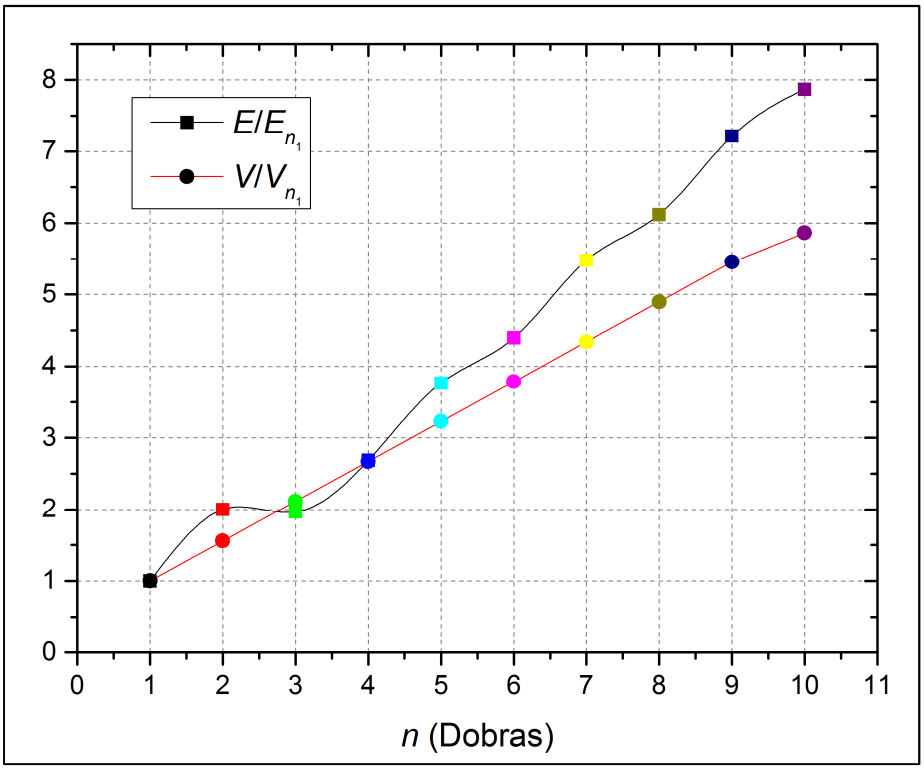
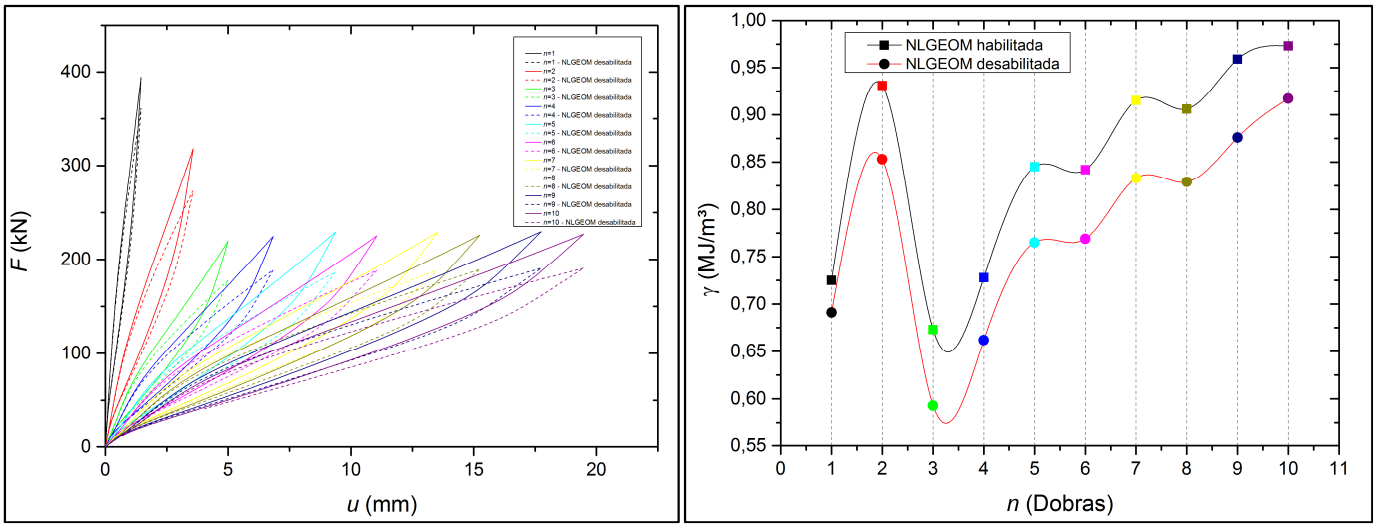


Figura III-22 – Curva da energia dissipada e volume normalizados pelo número de dobras *n* para as geometrias com índice *i*=2.

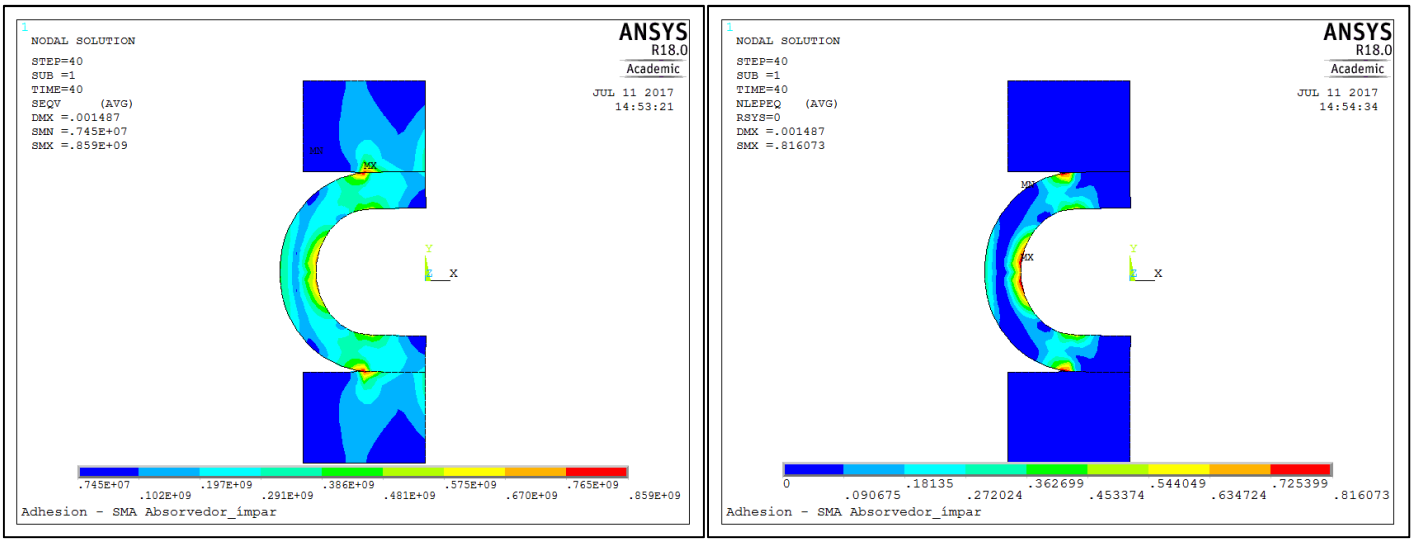
Uma das hipóteses que explicaria o comportamento não monotônico das geometrias de *n*=1 e *n*=2 é o efeito das não linearidades geométricas, que são levadas em consideração no modelo numérico. A fim de averiguar essa hipótese, são geradas novas simulações para as mesmas geometrias, desconsiderando as não linearidades geométricas, conforme os resultados ilustrados nas Figuras III-23 (a) e (b). Pela análise da Figura III-23 (b) é possível observar apenas uma queda dos valores de γ para todos os novos casos, expresso pela translação da curva para baixo.



(a) (b)

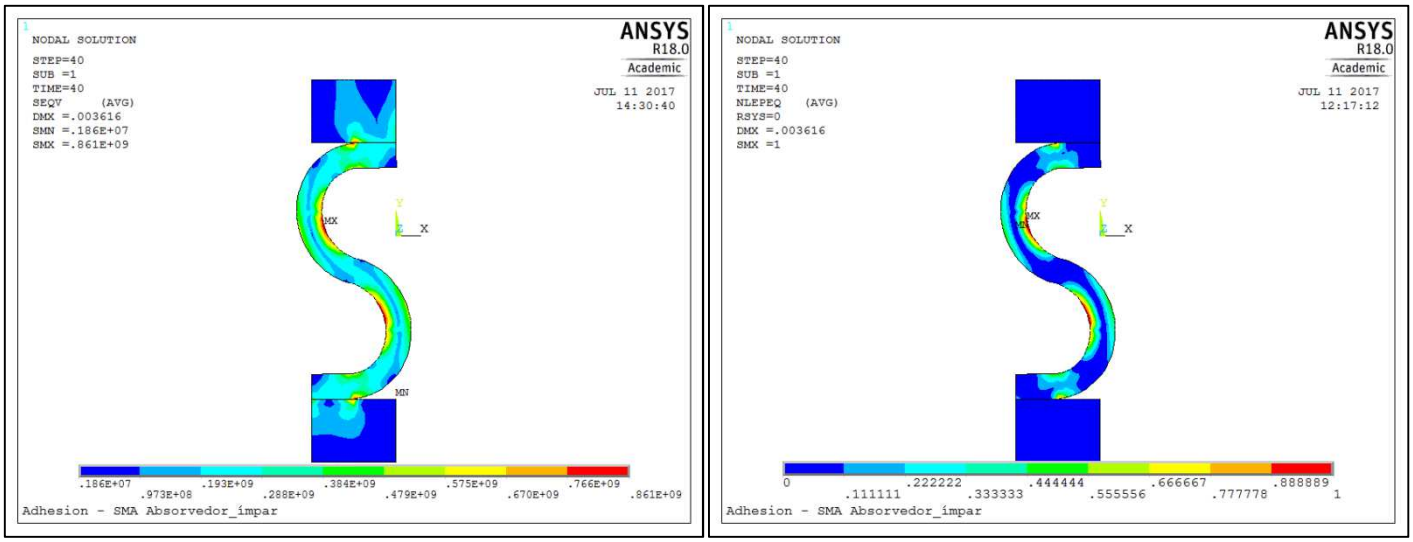
Figura III-23 – Influência das não linearidades geométricas nos gráficos força-deslocamento (a) e γ versus n (b) para as geometrias de i=2 no modo de carregamento trativo.

As Figuras III-24 a III-29 apresentam a distribuição da tensão equivalente de *von Mises* e da fração volumétrica de martensita paras geometrias de n=1, n=2, n=3, n=5 e n=10. A análise das figuras em todas as geometrias apresentadas revela que, conforme esperado, as regiões de concentração de tensão são aquelas que apresentam a maior concentração de tensão e os maiores valores absolutos de fração volumétrica de martensita. Observa-se também que as geometrias de n=1 e n=2 apresentam valores de fração volumétrica de martensita elevados nas regiões de interface da placa e que esta característica tende a tornar-se menos presente conforme a estrutura fica menos rígida, como pode ser visto nas geometrias de n=3, n=5 e n=10. Esta concentração de fração volumétrica de martensita pode ser atribuída à maior curvatura do absorvedor na região de interface como consequência da maior rigidez das geometrias com menor número de dobras. Como as concentrações e valores absolutos de fração volumétrica de martensita nas geometrias de n=1 e n=2 são maiores do que nas demais, isto implica em valores de γ superiores, o que explicaria os resultados não monotônicos na Figura III-20 (b), na Figura III-21 e na Figura III-22.



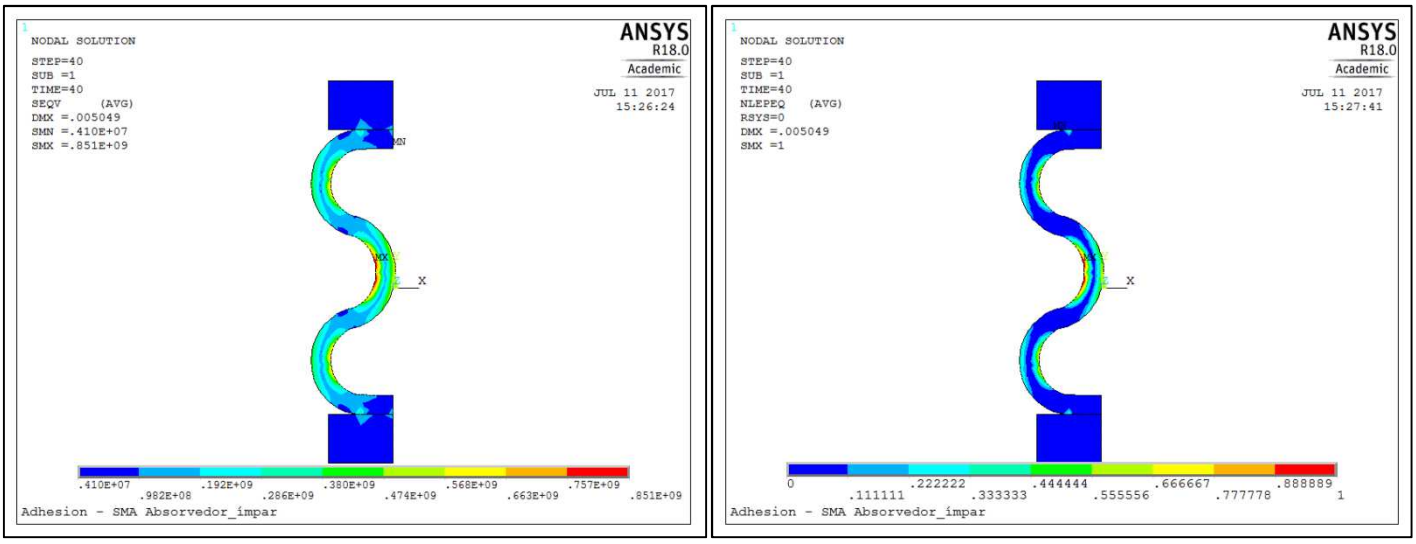
(a) (b)

Figura III-24 – *Plots* da distribuição de tensão equivalente segundo *von Mises* (a) e de fração volumétrica de martensita (b) para *n*=1 e *i*=2.



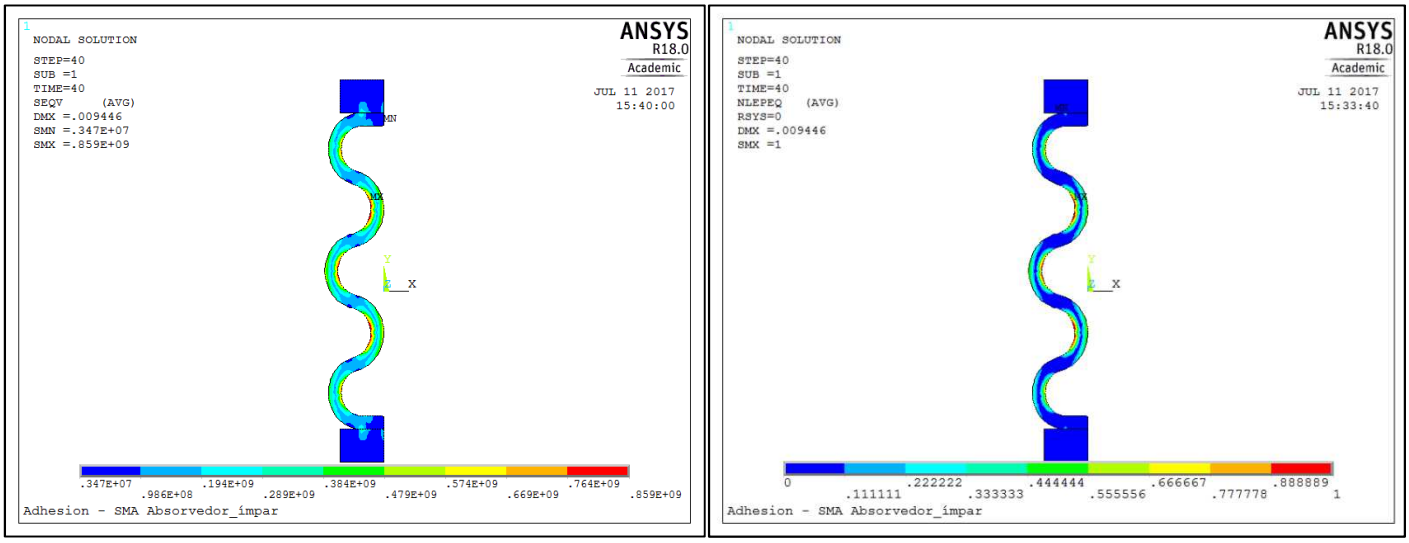
(a) (b)

Figura III-25 – *Plots* da distribuição de tensão equivalente segundo *von Mises* (a) e de fração volumétrica de martensita (b) para *n*=2 e *i*=2.



(a) (b)

Figura III-26 – *Plots* da distribuição de tensão equivalente segundo *von Mises* (a) e de fração volumétrica de martensita (b) para *n*=3 e *i*=2.



(a) (b)

Figura III-27 –*Plots* da distribuição de tensão equivalente segundo *von Mises* (a) e de fração volumétrica de martensita (b) para *n*=5 e *i*=2.

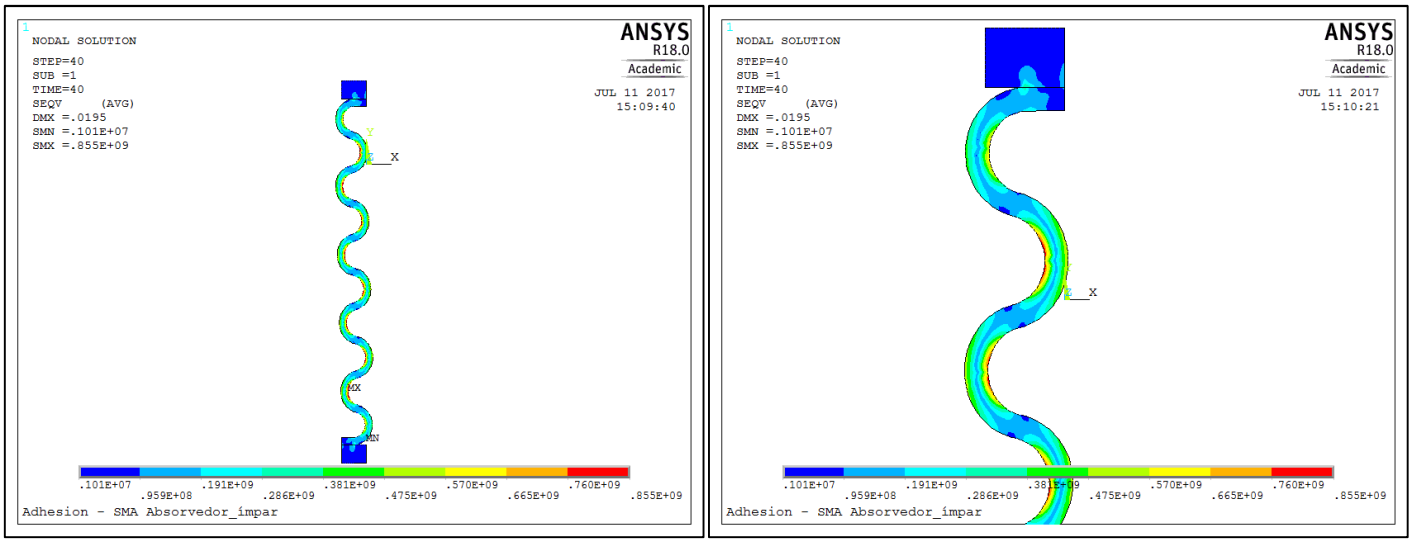


Figura III-28 – *Plots* da distribuição de tensão equivalente segundo *von Mises* para n=10 e i=2.

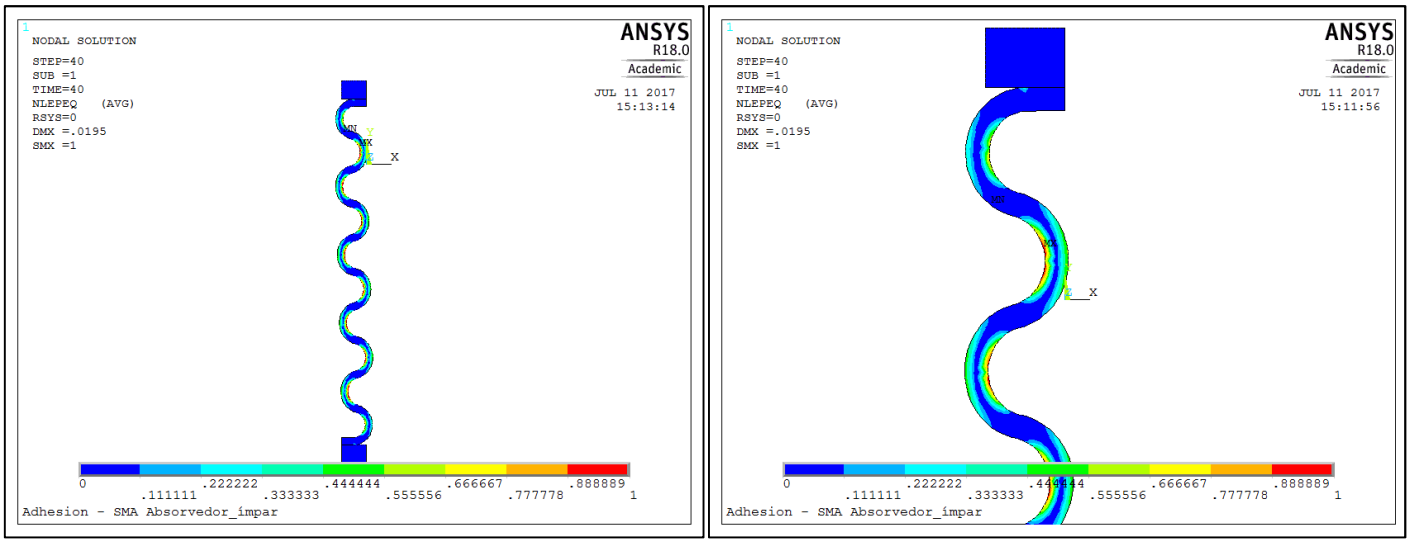


Figura III-29 – *Plots* da distribuição de fração volumétrica de martensita para n=10 e i=2.

A Figura III-30 apresenta a evolução de γ com o número de dobras n para três casos distintos: i=0,75, que implica em geometrias mais rígidas; i=2, que representa um caso de rigidez intermediária; e i=4, que implica em geometrias menos rígidas. Em geral, é possível afirmar que geometrias de índice maior e, portanto, menos rígidas possuem maior capacidade de dissipação de energia por unidade de volume, conforme salientado no item III.4. Além disso, enquanto nas curvas referentes a i=0,75 e i=2 (cores preta e vermelha, respectivamente) o valor de γ tende a estabilizar conforme n aumenta, a curva referente a i=4 (cor azul) apresenta um salto em n=4. Como os deslocamentos aplicados para essas geometrias menos rígidas são maiores do que nas demais, a influência das não linearidades geométricas é maior, o que

propicia uma maior energia dissipada por unidade de volume.

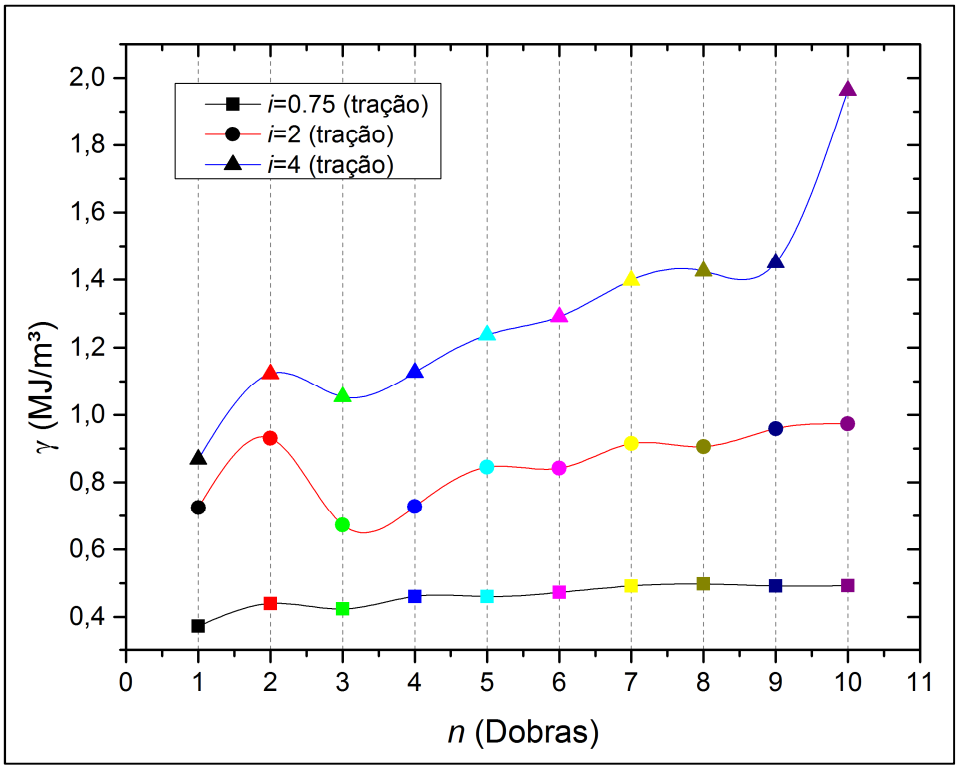


Figura III-30 – Curva γ versus n para as geometrias de i=0,75, i=2 e i=4 no modo de carregamento trativo.

III.6 Estudo da influência do modo de carregamento na rigidez

Esta seção avalia a influência do modo de carregamento (trativo e compressivo) na rigidez. Para cada um dos 5 valores distintos de número de dobras n analisados (n=1, n=2, n=3, n=4 e n=5), são estabelecidos 3 valores de índice i (i=2, i=3 e i=4) em ambos os modos de carregamento, totalizando em 30 casos de simulação. A razão pela qual o sistema do absorvedor em S de *SMA* apresenta comportamentos distintos sob tração e compressão, mesmo que o parâmetro constitutivo de dependência de *Lode, m*, assuma valor nulo, pode ser explicada pela presença das não linearidades geométricas e dos grandes deslocamentos aplicados nas simulações. Caso as não linearidades geométricas não tivessem sido consideradas nas simulações, haveria sobreposição dos laços histeréticos no gráfico $F \times u$ de uma mesma geometria, mesmo que em sentidos de carregamento opostos.

As Figuras III-31 a III-35 apresentam as curvas histeréticas nos gráficos $F \times u$ dos casos de simulação propostos, onde a linha contínua representa o carregamento trativo e a tracejada o compressivo. É possível observar que conforme a estrutura

torna-se menos rígida e os deslocamentos aplicados tornam-se maiores, seja pelo aumento do índice *i* ou do número de dobras *n*, a diferença entre os laços de histerese nos modos trativo e compressivo fica mais expressiva como consequência das não linearidades geométricas.

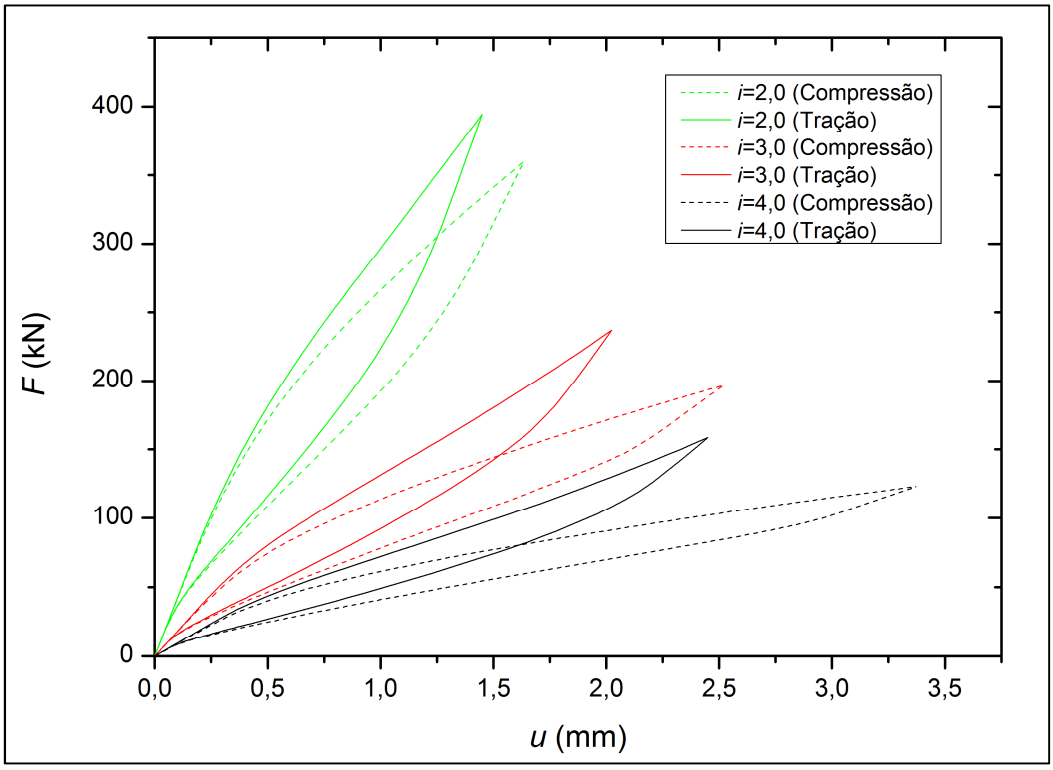


Figura III-31 – Curva força-deslocamento para as geometrias de *n*=1 nos modos de carregamento trativo e compressivo.

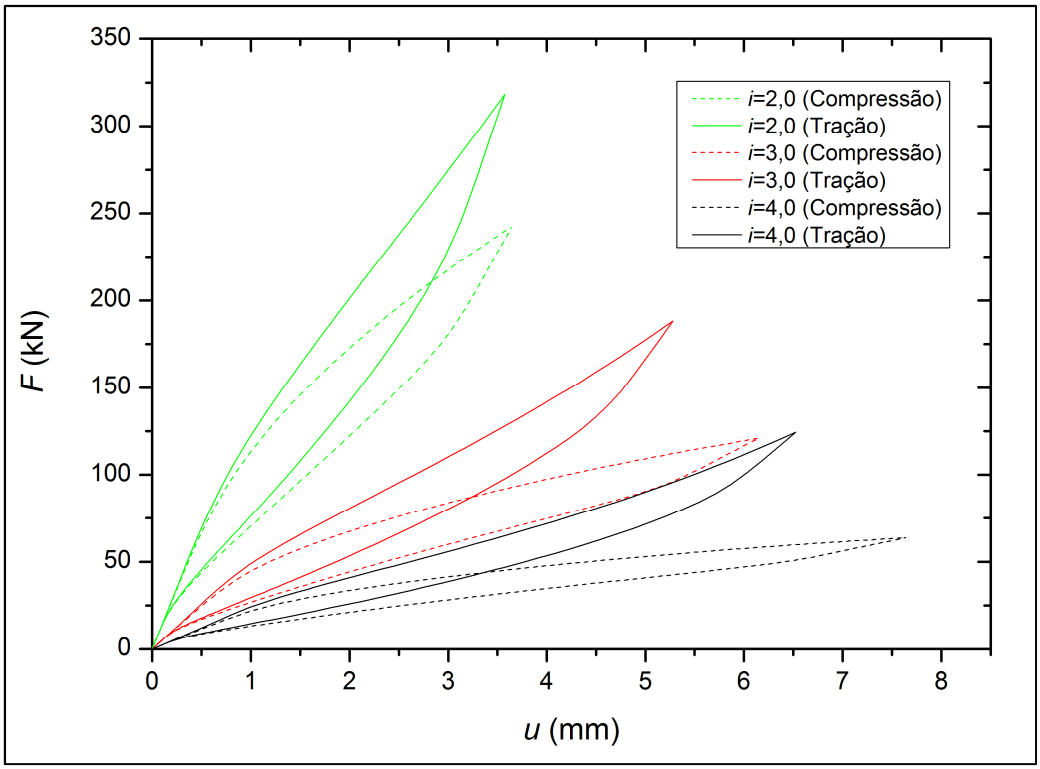


Figura III-32– Curva força-deslocamento para as geometrias de *n*=2 nos modos de carregamento trativo e compressivo.

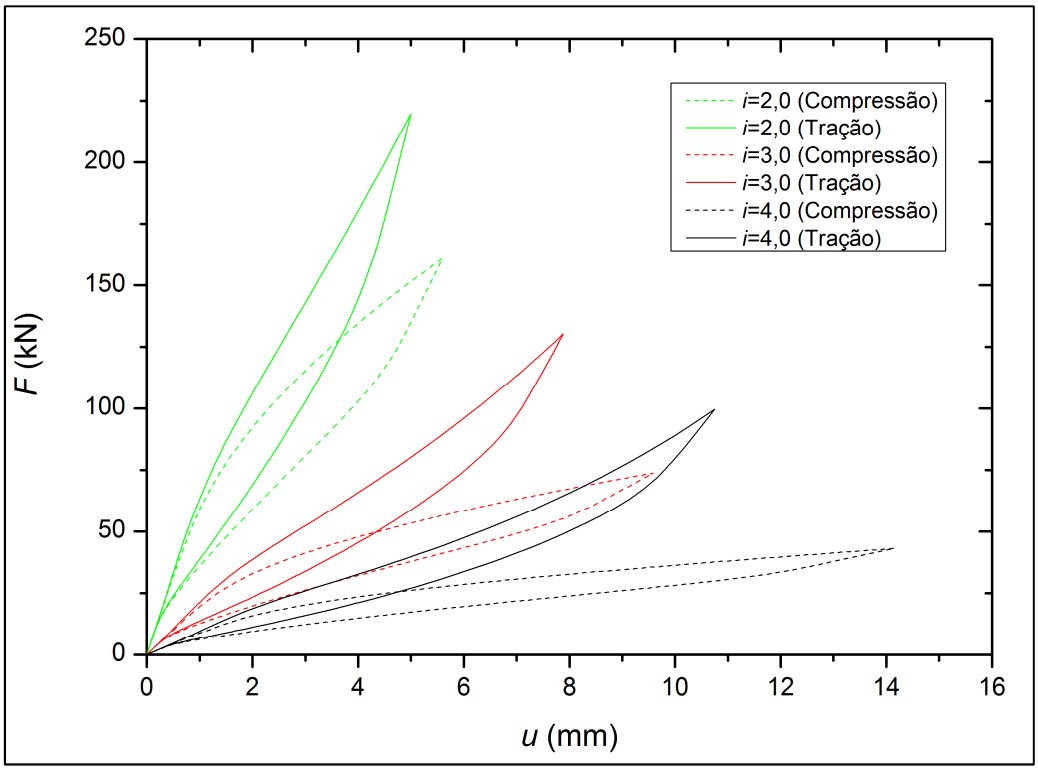


Figura III-33– Curva força-deslocamento para as geometrias de *n*=3 nos modos de carregamento trativo e compressivo.

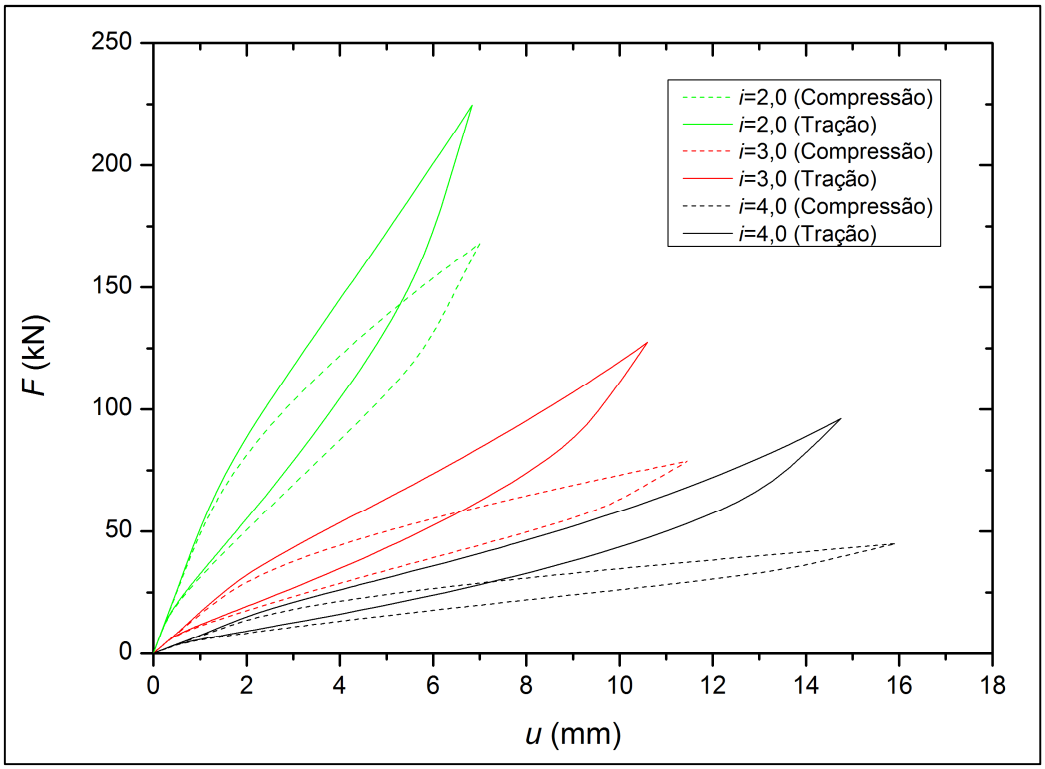


Figura III-34 – Curva força-deslocamento para as geometrias de *n*=4 nos modos de carregamento trativo e compressivo.

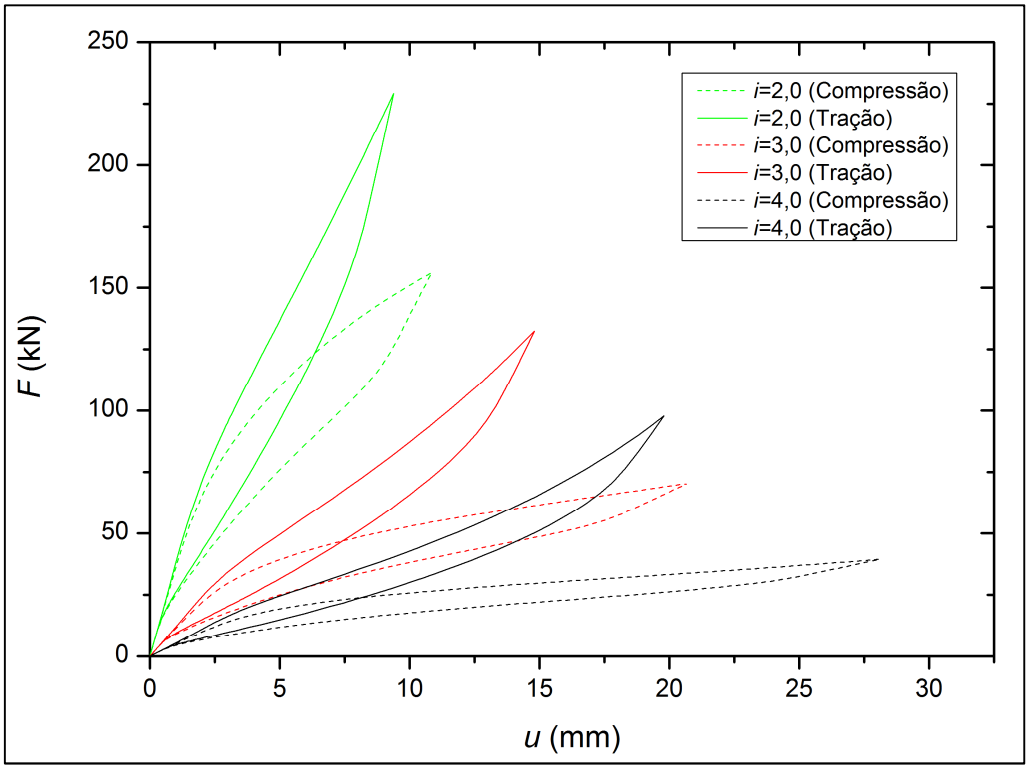
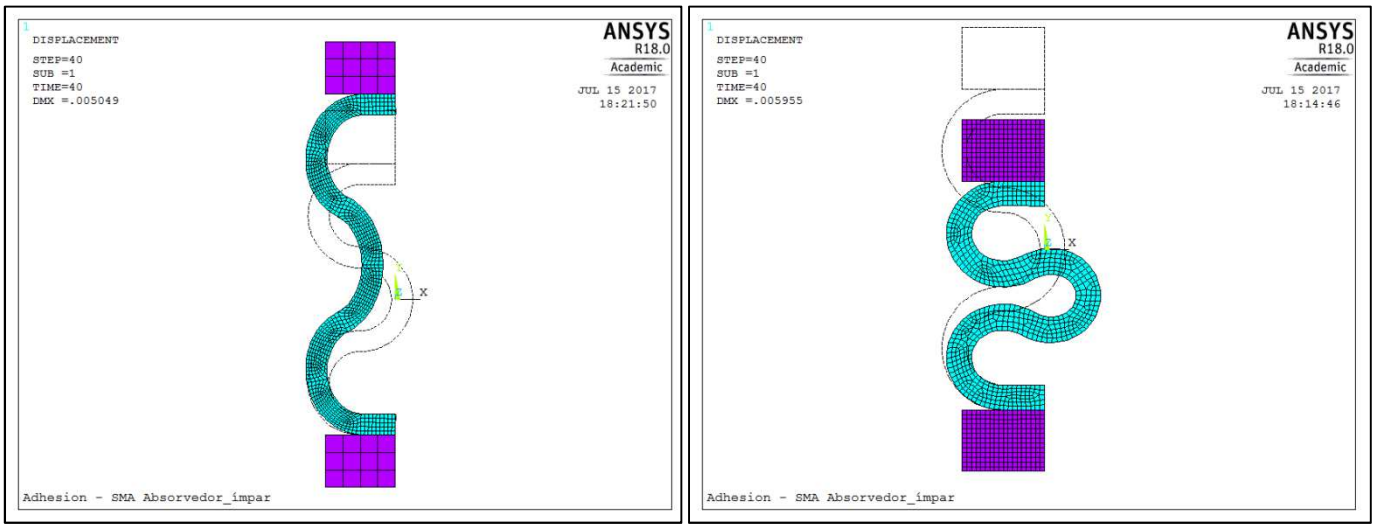


Figura III-35 - Curva força-deslocamento para as geometrias de n=5 nos modos de carregamento trativo e compressivo.

A influência das não linearidades geométricas no modo de carregamento pode

ser melhor entendida pela análise das configurações deformadas finais da estrutura, conforme ilustra a Figura III-36. É possível observar que a configuração final no modo de carregamento trativo tende a reproduzir o comportamento de uma barra, que é muito mais rígida do que a configuração final no modo compressivo, que tende a reproduzir o comportamento de uma mola. Isso explica a translação dos laços de histerese em todos aos casos nas Figuras III-31 a III-35.



(a) (b)

Figura III-36 – Configuração deformada final sob o modo de carregamento trativo (a) e compressivo (b).

III.7 Comparação da capacidade dissipativa do absorvedor em S com uma barra sob carregamento axial puro

O estudo a seguir propõe uma comparação entre os valores de energia dissipada por unidade de volume γ apresentados pelo absorvedor em S de *SMA* e por uma barra de mesmo material sujeita a um carregamento axial trativo puro. Para tal, é utilizado o conceito de coeficiente de forma C_f, abordado por Collins (2004) para representar o armazenamento de energia elástica de deformação. Segundo o autor, “o coeficiente de forma C_f é definido para caracterizar a influência das geometrias nas expressões de energia de deformação armazenada por unidade de volume”. A máxima eficiência de armazenamento de energia de um componente é alcançada quando todo o volume está solicitado com valores máximos de tensão, como por exemplo, a tensão admissível do material. Sendo assim, pode-se definir como um caso ideal o de uma barra sujeita a um carregamento axial puro, uma vez que o

material está igualmente solicitado em todo seu volume. Para esse caso, atribui-se o valor C_f igual a 1, de maneira que o coeficiente de forma para um caso geral seja calculado através da expressão:

$$C_f = \frac{\gamma}{\gamma_{BA}} \tag{6}$$

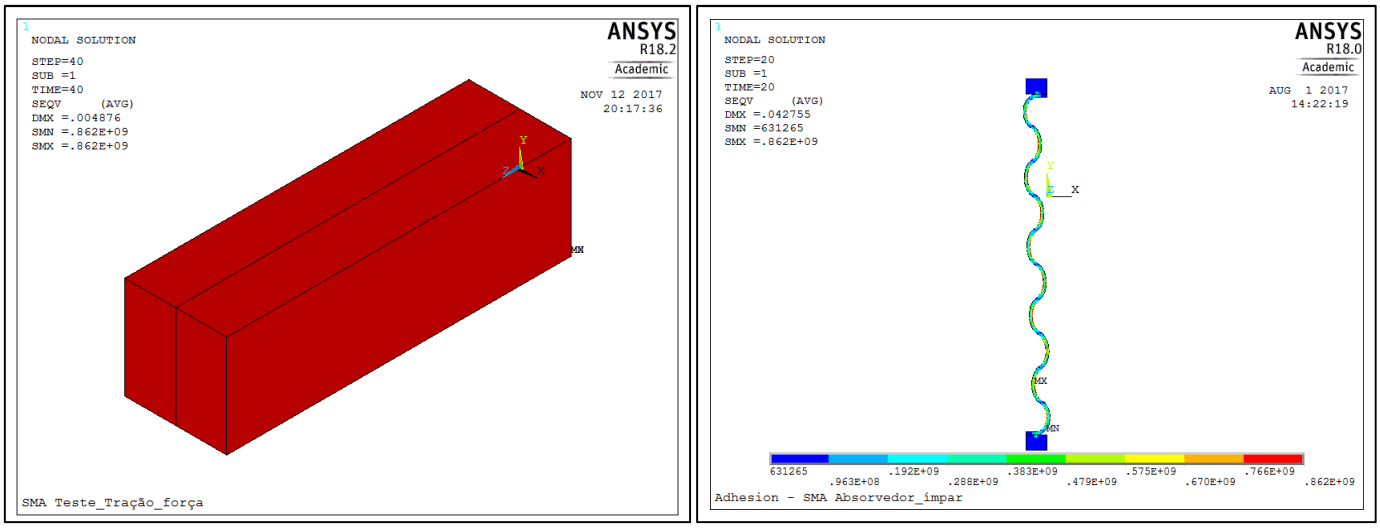
onde:

γ – Energia dissipada por unidade de volume para o caso particular. Unidade: *Joule* por metro cúbico (J/m³).

γ_{BA} – Energia dissipada por unidade de volume da barra. Unidade: *Joule* por metro cúbico (J/m³).

O presente estudo aborda o fator de forma C_f por uma perspectiva de dissipação de energia. A fim de calcular o valor de γ_{BA}, retoma-se o modelo numérico do item II.4. Como o carregamento axial puro produz uma distribuição homogênea de tensões em todo o volume da geometria, utiliza-se novamente apenas um único elemento (BEAM188) para modelo numérico.

Dentre todas as geometrias geradas para o absorvedor em S de *SMA,* aquela que apresentou o maior valor de γ corresponde a de *n*=10 e *i*=4 no modo de carregamento trativo, o que representa o sistema em sua configuração de dissipação de energia mais eficiente. Para fins de comparação entre essa geometria e o caso da barra axial, são aplicadas em ambas as simulações deslocamentos prescritos que gerem o mesmo valor saída de tensão equivalente de *von Mises*, conforme pode ser visto na Figura III-37. A Figura III-38 apresenta os laços de histerese na curva *F*×*u* gerados por ambas as simulações.



(a) (b)

Figura III-37 – *Plot* da distribuição de tensão equivalente segundo *von Mises* para a barra axial (a) e o absorvedor em S com *n*=6 e *i*=4 (b).

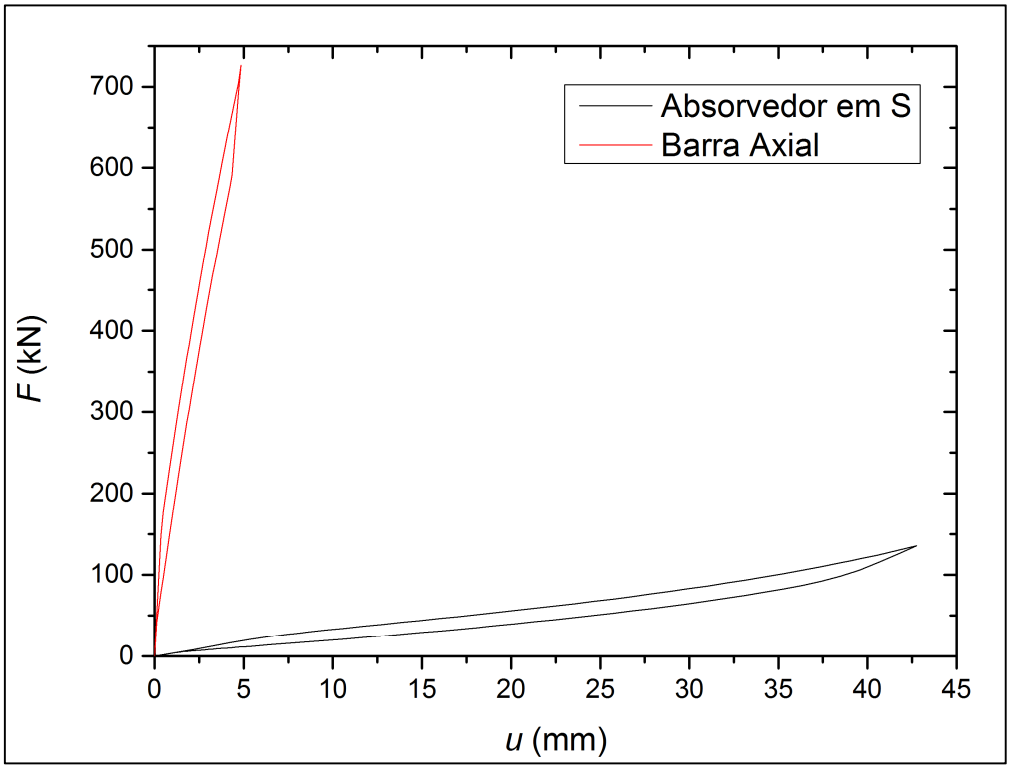


Figura III-38 – Comparação dos laços de histerese no gráfico *F*×*u* da barra axial e do absorvedor em S com *n*=10 e *i*=4 no modo de carregamento trativo.

A Tabela III-5 apresenta diferentes valores de coeficiente de forma e energia armazenada para diversos tipos de mola presentes na literatura. Aplicando a Equação (6), o valor do coeficiente de forma C_f atribuído ao absorvedor em S de *SMA* em sua configuração mais eficiente é de aproximadamente 0,31, o que representa um valor

relativamente baixo ao compará-lo com os demais coeficientes de forma apresentados na Tabela III-5. É preciso levar em conta, no entanto, que apesar da capacidade dissipativa do absorvedor em S de *SMA* em sua configuração mais eficiente não ser tão significativa, ele exige menores esforços para dissipar energia do que a barra axial. Pela análise da Figura III-38, nota-se que enquanto o absorvedor em S apresenta seu ciclo de carregamento completo a esforços ligeiramente inferiores a 150 kN, a barra axial está a um patamar de início de transformação de fase, onde a energia dissipada ainda é pequena. Caso fosse considerada a mesma força prescrita para ambas as simulações, os valores de γ para o modelo do absorvedor em S seriam superiores ao da barra axial.

Tabela III-5 – Coeficientes de forma e capacidade de armazenamento de energia para diversos tipos de mola.

Fonte: Collins (2004).

Tipo de Mola	C_f
Barra axial	1,00
Tubo em torção, circular ou de paredes finas	≅0,90
Barra de torção, circular ou sólida	0,50
Mola helicoidal, de arame redondo, de compressão ou tração	0,36
Espiral de torção	0,28
Mola helicoidal de torção, de arame redondo	0,20
Mola tipo viga biapoiada ou engastada ou de seção transversal retangular	0,11
Mola de múltiplos feixes biapoiada ou engastada de resistência constante, ou tira plana	0,38
Molla Bellevile	≅0,05-0,20

III.8 Comparação da capacidade dissipativa do absorvedor em S com outros tipos de molas

O estudo que segue apresenta uma comparação da capacidade dissipativa do absorvedor em S de *SMA* com outros tipos de molas de mesmo material existentes na literatura. Portanto, comparam-se os modelos da barra de torção e da mola helicoidal aplicadas como elementos pseudoelásticos para atenuação de vibração, abordados por da Hora (2015). O presente estudo utiliza o conceito de fator de forma C_f para avaliar a influência das geometrias propostas na dissipação de energia.

O estudo numérico apresentado por da Hora (2015) compara a energia dissipada por unidade de volume γ de barras cilíndricas de torção de *SMA* com a de barras uniformes de mesmo material sujeitas a um carregamento axial puro. Para avaliar a influência da geometria da barra de torção na capacidade de dissipação de energia, foram analisadas barras vazadas de diferentes razões entre o raio interno e o raio externo ($\frac{R_i}{R_e}$), incluindo a barra cheia, onde essa razão é nula. Dentre os casos de barras de torção analisados, aquele que apresenta o maior valor de γ corresponde à barra de torção com $\frac{R_i}{R_e} = 0{,}75$, cujo valor de fator de forma chega a aproximadamente 0,9. Este valor é quase três vezes maior do que aquele apresentado pelo Absorvedor em S de maior capacidade dissipativa (C_f=0,31)

da Hora (2015) conduziu também uma análise numérica e experimental de molas helicoidais pseudoeslásticas, onde compara seus valores de energia dissipada por unidade de volume com os de uma barra uniforme sujeita a um carregamento axial com as mesmas propriedades do material. Segundo os dados apresentados pelo autor, o coeficiente de forma C_f calculado, com base tanto nos resultados experimentais, quanto numéricos, da mola em sua condição de dissipação de energia mais eficiente (maior deslocamento prescrito aplicado) não ultrapassa o valor 0,14. Esse valor é cerca de 45% inferior ao coeficiente de forma do Absorvedor em S em sua configuração mais eficiente.

A Tabela III-6 apresenta um resumo de todos os valores de coeficiente de forma abordados neste trabalho.

Tabela III-6 – Resumo dos valores dos coeficientes de forma de molas com elementos pseudoelásticos.

Tipo de Mola	C_f
Barra axial	1,00
Barra de torção	0,90
Absorvedor em S	0,31
Mola helicoidal	0,14

IV. Conclusão

Ligas com memória de forma são materiais inteligentes que possuem a habilidade de modificar sua forma em resposta a um estímulo externo, seja ele um campo de tensão ou uma variação de temperatura (Lagoudas, 2008). Devido a seu comportamento histerético, as *SMAs* dissipam energia mecânica a cada ciclo de carregamento-descarregamento, o que torna apropriado seu uso como elementos atenuadores de vibração. O modelo proposto é utilizado como uma ferramenta para analisar a distribuição de transformação de fase de modo a estabelecer geometrias de absorvedores de vibração com elementos de *SMA* de elevada capacidade de dissipação de energia mecânica.

No presente estudo é criada uma metodologia que utiliza o método de elementos finitos para avaliar a capacidade de dissipação de energia e rigidez de um atenuador de vibrações com elementos de *SMA* conectados a placas para formar uma estrutura do tipo *honeycomb*. Sendo assim, faz-se uma análise da influência da alteração de dois parâmetros geométricos distintos, o número de dobras e o índice, definido pela razão entre o raio de curvatura e a espessura do elemento de *SMA*.

Os resultados obtidos revelam que as geometrias propostas oferecem uma alternativa para a construção de absorvedores de vibração com elementos pseudoelásticos de *SMA* de peso reduzido e com uma ampla gama de valores de energia dissipada e rigidez. Além disso, geometrias com um maior número de dobras e de maior índice tendem a sofrer maior influência das não linearidades geométricas, uma vez que estão sujeitas a maiores deformações. As não linearidades geométricas são também responsáveis pela notável diferença de comportamento da estrutura quando sujeita a tração e compressão, evidenciada pelos desvios dos laços de histerese no gráfico força-deslocamento. As análises conduzidas revelam uma competição entre a capacidade dissipativa e a rigidez do sistema do absorvedor em S, que deve ser considerada na seleção da geometria mais apropriada para a dada aplicação.

Através da definição do coeficiente de forma, abordado por Collins (2004), pode-se comparar a capacidade de dissipação do modelo proposto em sua configuração energética mais eficiente com a de demais tipos de molas presentes na literatura. Apesar da capacidade dissipativa do absorvedor em S de *SMA* em sua configuração mais eficiente não ser tão significativa, ele exige menores esforços para dissipar energia do que a barra axial, que representa o caso ideal

Como sugestões de trabalhos futuros estão:

1) O aprimoramento da obtenção dos parâmetros constitutivos para a calibração do modelo através de métodos experimentais. A construção de um aparato experimental do absorvedor com elementos em S de *SMA* seria interessante para comparar seus resultados com aqueles obtidos numericamente, apresentados no presente estudo, a fim de validar e melhorar o modelo numérico.
2) A aplicação de carregamentos em outras direções para testar diferentes configurações geométricas do absorvedor com elementos em S de *SMA* em arranjos múltiplos. São esperados diferentes comportamentos do modelo proposto quando os elementos em S são posicionados lado a lado orientados no mesmo sentido e em sentidos opostos. Além disso, seria interessante simular carregamentos combinados, resultantes da aplicação de carregamentos no plano e laterais.
3) A realização de uma análise do comportamento dinâmico do modelo proposto. Uma análise dinâmica permitiria investigar a influência de diversos outros parâmetros de interesse no comportamento do modelo, como a frequência forçada e o perfil de onda do carregamento aplicado.

Referências Bibliográficas

Aguiar, R., Savi, M. A., Pacheco, P. (2013). Experimental investigation of vibration reduction using shape memory alloys*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, *Vol. 24*, pp. 247-261.

Auricchio, F., Petrini, L. (2004). A three-dimensional model describing stress temperature induced solid phase transformations. Part I: solution algorithm and boundary value problem. *International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.61*, pp. 807- 836.

Auricchio, F., Taylor, R., Lubliner, J. (1997). Shape-Memory Alloys: Macromodeling and Numerical Simulations of the Superelastic Behavior. *Computational Methods in Applied Mechanical Engineering, Vol. 146*, pp. 281-312.

Azevedo, A. J. (2016). Análise de Fadiga em Fios com Memória de Forma Submetidos a Ciclos Termomecânicos. *Dissertação de Mestrado*. CEFET/RJ

Chopra, I., Irohi, J. (2014). *Mechanical Design of Machine Elements and Machines: a Failure. Smart Structures Theory.* Nova Yorke: Cambridge University Press.

Collins, A. J.

da Hora, R. (2015). Análise Numérica e Experimental da Dissipação de Energia em Elementos Pseudoelásticos. *Dissertação de Mestrado*. CEFET/RJ.

da Hora, R., Adeodato, A., Riagusoff, I., Aguiar, R., Pacheco, P. (2013). Modeling Pseudoelastic Vibration Attenuators Elements Using the Finite Element Method. *COBEM 2013*, (pp. 3-7). Ribeirão Preto SP.

Du, Y. (2003). Internal Resonances in Vibration Isolators and Their Control Using Passive and Hybrid Dynamic Vibration Absorbers. *Doctor of Philosophy Dissertation*. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.

Ivanovitsch, I. (2012). Estudo de dispositivos pseudoelásticos para a aplicação em atenuadores de vibração. *Dissrtação de Mestrado*. CEFET/RJ.

Lagoudas, D. C. (2008). *Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications.* Texas: Springer.

Low, C. Y., Kasim., M. A., Mansur, M. F., Jaffar, A., Ng, K. M. (2012). Design of a Hybrid- Actuated Finger Prosthesis with Tactile Sensing. *Recent Researches in Communications, Electronics, Signal Processing and Automatic Control, Vol.11*, pp. 155-160.

Matsuzaki, Y., Ikeda, T., Boller, B. (2005). New technological development of

passive and active vibration control: analysis and test. *Smart Materials and Structures, Vol. 14*, pp. 343-348.

Michailidis, P., Triantafyllidis, N., Shaw, J., Grummon, D. (2009). Superelasticity and stability of a shape memory alloy hexagonal honeycomb. *International Journal of Solids and Structures, Vol. 49*, pp. 2724-2738.

Nava, N., Collado, M., Cabás, R. (2014). New Pin Puller Based on SMA Technology for Space Applications. *Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 23(7)*, pp. 2712- 2718.

Olabi, A., Morris, E., Hashmi, M. (2007). Metallic tube type energy absorbers: A synopsis. *Thin-Walled Structures, Vol.45*, pp. 706-726.

Otsuka, K., Wayman, C. M. (1998). *Shape Memory Alloys.* Cambridge: Cambridge University Press.

Pacheco, P., Oliveira, P., Aguiar, R., de Barros, S. (2015). Modelling Bonded Shape Memory Alloy Vibration Attenuators Elements Using the Finite-Element Method. *The Journal of Adhesion, Vol.91*, pp. 883-908.

Paiva, A. (2004). Modelagem do Comportamento Termomecânico das Ligas com Memória de.Forma. *Tese de Doutorado*. Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio.

Paiva, A., Savi, M. A. (2006). An Overview of Constitutive Models for Shape Memory Alloys. *Mathematical Problems in Engineering*, Vol.2006, pp. 1-30.

Petrini, L., Migliavacca, F. (2011). Biomedical Applications of Shape Memory Alloys. *Journal of Metallurgy*, *Vol. 2011*, pp. 1-15.

Pugliese, G., Casey, D. (2012). Analysis of Shape Memory Alloy and Their Application for Reducing Damage Due to Seismic Activity. *University of Pittsburgh - Swanson School of Engineering.*

Rao, S. (2008). *Mechanical Vibrations.* Prentice Hall.

Saadat, S., Noori, M., Davoodi, H., Hou, Z., Suzuki, Y., Masuda, A. (2001). Using NiTi SMA tendons for vibration control of coastal structures. *Smart Materials and Structures, Vol. 10*, pp. 695-704.

Savi, M., de Paula, A., Lagoudas, D. (2011). Numerical investigation of an adaptive vibration absorber using shape memory alloys. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 22*, pp. 67-80.

Savi, M., Pacheco, P. G., Aguiar, R., Souza, L., da Hora, R. (2015). Nonlinear geometric influence on the mechanical behavior of shape memory alloy helical springs. *Smart Materials and Structures, Vol. 24*, pp. 1-13.

Shaw, J., Grummon, D., Foltz, J. (2007). Superelastic NiTi honeycombs:

fabrication and experiments. *Smart Materials and Structures, Vol. 16*, pp. 170-178.

Song, D. K., Yu, C., Zhang, C. (2014). The effect of martensite plasticity on the cyclic deformation of super-elastic NiTi shape memory alloy. *Smart Materials, Vol. 23*, pp. 1- 7.

Torra, V., Isalgue, A., Carreras, G., Lovey, F., Soul, H., Terriault, P.(2009). The SMA properties in civil engineering applications. The SMARTeR project: Use of SMA in damping of stayed cables for bridges. *ESOMAT, Vol. 2009*, pp. 1-6.

Xie, X., Kan, Q., Kang, G., Lu, F., Chen, K. (2016). Observation on rate-dependent cyclic transformation domain of super-elastic NiTi shape memory alloy. *Materials Science and Engineering A*, Vol.671, pp. 32-47.

Apêndice I

Código em ANSYS do arquivo-mãe

```
finish
/clear,nostart
/REP,FAST
/COLOR,PBAK,OFF
/REPLOT

/FILNAME,SMA_Absorvedor_ímpar,1

/PREP7

/TITLE,Adhesion - SMA Absorvedor_ímpar

C*** ===CONSTANTES GEOMÉTRICAS ====

N=1        !(1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11)

indice=0.75        !(4,3,2,1.5,1.0,0.75)

R=6e-3

tSMA=R/indice

L=5.0e-3

tPlaca=7.5e-3

C*** === PARÂMETROS DE ENTRADA ====

Carregamento=1              ! Axial - y


!TipoAnalise=0              ! Análise Linear
        Elástica
TipoAnalise=1               ! Análise SMA

Amp_u=(4.5e-3)/1! Deslocamento Uy da
        extremidade

nDiv=20

fator=10.0

PI=ACOS(-1)

C*** === DEFINICAO DOS TIPOS DE
        ELEMENTOS ===

ET,1,PLANE182 !Elemento estrutural sólido 2D
        com 8 nós
KEYOPT,1,1,0 !Método B de integração completa
KEYOPT,1,3,0 !Estado plano de tensão
KEYOPT,1,6,0 !Formulação de puro
        deslocamento

C*** ==== DEFINICAO DAS PROPRIEDADES
        ====

epsi_L= 0.046 !%, Máxima deformação residual
E_A = 27.51e9 !MPa, Módulo de elasticidade da
        austenita (Young)
E_M = 21.61e9 !MPa, Módulo de elasticidade da
        martensita (Young)
Poiss = 0.30 !adimensional, Constante de Poisson
u_T = 296.15  !T, K - ORIGINAL
u_h = 11.5e9 !h, MPA [HARDENING
        PARAMETER]
u_To = 273.95 !To, K [REFERENCE
        TEMPERATURE]
u_R = 60.5e6 !R, MPA [ELASTIC LIMIT]
u_beta= 4.2E6!beta, MPA/K [TEMPERATURE
        SCALING PARAMETER]
u_m = 0 !m = 0, simétrico [LODE DEPENDENCY
        PARAMETER]
tref, u_To !indicação da temperatura de referência
MPTEMP,,,,,,,, !inicialização da função
MPTEMP,1,u_To !associação da temperatura dos
        parâmetros
MPDATA,EX,1,,E_A !EX, MPa, módulo de
        elasticidade da austenita (Young)
MPDATA,PRXY,1,,Poiss !PRXY, adimensional,
        constante de Poisson

C1=u_h !h, MPA [HARDENING PARAMETER]
C2=u_To !To, K [REFERENCE TEMPERATURE]
C3=u_R !R, MPA [ELASTIC LIMIT]
C4=u_beta !beta, MPA [TEMPERATURE
        SCALING PARAMETER]
C5=epsi_L !epsilonL, [MAXIMUM
        TRANSFORMATION STRAIN]
C6=E_M !E_M, MPA [MARTENSITE MODULUS]
C7=0 !m = 0, simétrico [LODE DEPENDENCY
        PARAMETER]

MP,EX,2,64e9      ! Material da placa rígida

MP,NUXY,2,0.32

*IF,TipoAnalise,EQ,1,THEN
TB,SMA,1,,7,MEFF !Material com formulação da
        liga com memória de forma
TBTEMP, u_To !Temperatura de referência para o
        material
TBDATA,1,C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7 !indicação das
        constantes
*ENDIF

C*** ==== GEOMETRIA E MALHA  (SECAO
        INTERMEDIARIA) =====

*IF,MOD(n,2),EQ,0,THEN    !Geometrias pares

!N=2

x1=-(L)
y1=0

x2=-(L)-(R-tSMA/2)
y2=y1

x3=-(L)
y3=R-tSMA/2

x4=0
y4=R-tSMA/2

x5=x1+L
y5=R+tSMA/2

x6=x1
```

```
y6=y5

x7=x2-tSMA
y7=y1

x8=x1
y8=y1-(R-tSMA/2)

x9=x1
y9=y1-(R+tSMA/2)

x10=x1
y10=y1-2*R

x11=x10+(R-tSMA/2)
y11=y10

x12=x10+(R+tSMA/2)
y12=y10

x13=x10
y13=y10-(R-tSMA/2)

x14=x10
y14=y10-(R+tSMA/2)

*IF,N,EQ,2,THEN
x15=x13-L
y15=y13

x16=x14-L
y16=y14
*ENDIF

!N=4

x17=x10
y17=y10-2*R

x18=x17-(R+tSMA/2)
y18=y17

x19=x17-(R-tSMA/2)
y19=y17

x20=x17
y20=y17-(R+tSMA/2)

x21=x17
y21=y17-(R-tSMA/2)

x22=x17
y22=y17-2*R

x23=x22+(R+tSMA/2)
y23=y22

x24=x22+(R-tSMA/2)
y24=y22

x25=x22
y25=y22-(R+tSMA/2)

x26=x22
y26=y22-(R-tSMA/2)

*IF,N,EQ,4,THEN
x27=x25-L
y27=y25

x28=x26-L
y28=y26
*ENDIF

!N=6

x47=x22
y47=y22-2*R

x48=x47-(R+tSMA/2)
y48=y47

x49=x47-(R-tSMA/2)
y49=y47

x50=x47
y50=y47-(R+tSMA/2)

x51=x47
y51=y47-(R-tSMA/2)

x52=x47
y52=y47-2*R

x53=x52+(R+tSMA/2)
y53=y52

x54=x52+(R-tSMA/2)
y54=y52

x55=x52
y55=y52-(R+tSMA/2)

x56=x52
y56=y52-(R-tSMA/2)

*IF,N,EQ,6,THEN
x57=x55-L
y57=y55

x58=x56-L
y58=y56
*ENDIF

!N=8

x59=x48
y59=y48-4*R

x60=x49
y60=y49-4*R

x61=x47
y61=y47-4*R

x62=x51
y62=y51-4*R

x63=x50
y63=y50-4*R

x64=x52
y64=y52-4*R

x65=x54
y65=y54-4*R

x66=x53
y66=y53-4*R

x67=x56
y67=y56-4*R

x68=x55
y68=y55-4*R

*IF,N,EQ,8,THEN
x69=x67-L
```

```
y69=y67

x70=x68-L
y70=y68
*ENDIF

!N=10

x71=x48
y71=y48-8*R

x72=x49
y72=y49-8*R

x73=x47
y73=y47-8*R

x75=x51
y75=y51-8*R

x74=x50
y74=y50-8*R

x78=x52
y78=y52-8*R

x76=x54
y76=y54-8*R

x77=x53
y77=y53-8*R

x79=x56
y79=y56-8*R

x80=x55
y80=y55-8*R

*IF,N,EQ,10,THEN
x81=x79-L
y81=y79

x82=x80-L
y82=y80
*ENDIF

!== PLACA SUPERIOR

x31=-(2*L)
y31=y5

x32=-(L)
y32=y31

x33=x5
y33=y5

x38=x33
y38=y31+tPlaca

x39=x32
y39=y31+tPlaca

x40=x31
y40=y31+tPlaca

!== PLACA INFERIOR

*IF,N,EQ,2,THEN
x41=x14
y41=y16

x42=x16
y42=y16

x43=x42
y43=y42-tPlaca

x44=x41
y44=y41-tPlaca

x45=x44+L
y45=y44

x46=x45
y46=y41
*ENDIF

*IF,N,EQ,4,THEN
x41=x14
y41=y14-4*R

x42=x14-L
y42=y14-4*R

x43=x42
y43=y42-tPlaca

x44=x41
y44=y41-tPlaca

x45=x44+L
y45=y44

x46=x45
y46=y41
*ENDIF

*IF,N,EQ,6,THEN
x41=x14
y41=y14-8*R

x42=x14-L
y42=y14-8*R

x43=x42
y43=y42-tPlaca

x44=x41
y44=y41-tPlaca

x45=x44+L
y45=y44

x46=x45
y46=y41
*ENDIF

*IF,N,EQ,8,THEN
x41=x14
y41=y14-12*R

x42=x14-L
y42=y14-12*R

x43=x42
y43=y42-tPlaca

x44=x41
y44=y41-tPlaca

x45=x44+L
y45=y44

x46=x45
y46=y41
*ENDIF
```

```
*IF,N,EQ,10,THEN
x41=x14
y41=y14-16*R

x42=x14-L
y42=y14-16*R

x43=x42
y43=y42-tPlaca

x44=x41
y44=y41-tPlaca

x45=x44+L
y45=y44

x46=x45
y46=y41
*ENDIF

K,1,x1,y1
K,2,x2,y2
K,3,x3,y3
K,4,x4,y4
K,5,x5,y5
K,6,x6,y6
K,7,x7,y7

!N=2
K,8,x8,y8
K,9,x9,y9
K,10,x10,y10
K,11,x11,y11
K,12,x12,y12
K,13,x13,y13
K,14,x14,y14
K,15,x15,y15
K,16,x16,y16

!N=4
K,17,x17,y17
K,18,x18,y18
K,19,x19,y19
K,20,x20,y20
K,21,x21,y21
K,22,x22,y22
K,23,x23,y23
K,24,x24,y24
K,25,x25,y25
K,26,x26,y26
K,27,x27,y27
K,28,x28,y28

K,31,x31,y31
K,32,x32,y32
K,33,x33,y33
K,38,x38,y38
K,39,x39,y39
K,40,x40,y40
K,41,x41,y41
K,42,x42,y42
K,43,x43,y43
K,44,x44,y44
K,45,x45,y45
K,46,x46,y46

!N=6
K,47,x47,y47
K,48,x48,y48
K,49,x49,y49
K,50,x50,y50
K,51,x51,y51
K,52,x52,y52
K,53,x53,y53
K,54,x54,y54
K,55,x55,y55
K,56,x56,y56
K,57,x57,y57
K,58,x58,y58

!N=8
K,59,x59,y59
K,60,x60,y60
K,61,x61,y61
K,62,x62,y62
K,63,x63,y63
K,64,x64,y64
K,65,x65,y65
K,66,x66,y66
K,67,x67,y67
K,68,x68,y68
K,69,x69,y69
K,70,x70,y70

!N=10
K,71,x71,y71
K,72,x72,y72
K,73,x73,y73
K,74,x74,y74
K,75,x75,y75
K,76,x76,y76
K,77,x77,y77
K,78,x78,y78
K,79,x79,y79
K,80,x80,y80
K,81,x81,y81
K,82,x82,y82

LARC,2,3,1,R-(tSMA/2)
LARC,7,6,1,R+(tSMA/2)

LARC,8,2,1,R-(tSMA/2)
LARC,9,7,1,R+(tSMA/2)

LARC,8,12,10,R+(tSMA/2)
LARC,9,11,10,R-(tSMA/2)
LARC,11,13,10,R-(tSMA/2)
LARC,12,14,10,R+(tSMA/2)

A,9,8,2,7
A,11,12,8,9
A,14,12,11,13
A,7,2,3,6
A,3,4,5,6

A,31,32,39,40
A,32,33,38,39

A,41,42,43,44
A,44,45,46,41

*IF,N,EQ,2,THEN
A,13,15,16,14
*ENDIF

*IF,N,EQ,4,THEN
LARC,18,13,17,R+(tSMA/2)
LARC,19,14,17,R-(tSMA/2)

LARC,21,19,17,R-(tSMA/2)
LARC,20,18,17,R+(tSMA/2)

LARC,20,24,22,R-(tSMA/2)
LARC,21,23,22,R+(tSMA/2)

LARC,24,26,22,R-(tSMA/2)
LARC,23,25,22,R+(tSMA/2)
```

```
A,19,14,13,18
A,21,19,18,20
A,23,21,20,24
A,25,23,24,26
A,27,25,26,28
*ENDIF

*IF,N,EQ,6,THEN

LARC,18,13,17,R+(tSMA/2)
LARC,19,14,17,R-(tSMA/2)

LARC,21,19,17,R-(tSMA/2)
LARC,20,18,17,R+(tSMA/2)

LARC,20,24,22,R-(tSMA/2)
LARC,21,23,22,R+(tSMA/2)

LARC,24,26,22,R-(tSMA/2)
LARC,23,25,22,R+(tSMA/2)

A,19,14,13,18
A,21,19,18,20
A,23,21,20,24
A,25,23,24,26

LARC,48,26,47,R+(tSMA/2)
LARC,49,25,47,R-(tSMA/2)

LARC,51,49,47,R-(tSMA/2)
LARC,50,48,47,R+(tSMA/2)

LARC,50,54,52,R-(tSMA/2)
LARC,51,53,52,R+(tSMA/2)

LARC,54,56,52,R-(tSMA/2)
LARC,53,55,52,R+(tSMA/2)

A,49,25,26,48
A,51,49,48,50
A,53,51,50,54
A,55,53,54,56
A,55,56,58,57
*ENDIF

*IF,N,EQ,8,THEN

LARC,18,13,17,R+(tSMA/2)
LARC,19,14,17,R-(tSMA/2)

LARC,21,19,17,R-(tSMA/2)
LARC,20,18,17,R+(tSMA/2)

LARC,20,24,22,R-(tSMA/2)
LARC,21,23,22,R+(tSMA/2)

LARC,24,26,22,R-(tSMA/2)
LARC,23,25,22,R+(tSMA/2)

A,19,14,13,18
A,21,19,18,20
A,23,21,20,24
A,25,23,24,26

LARC,48,26,47,R+(tSMA/2)
LARC,49,25,47,R-(tSMA/2)

LARC,51,49,47,R-(tSMA/2)
LARC,50,48,47,R+(tSMA/2)

LARC,50,54,52,R-(tSMA/2)
LARC,51,53,52,R+(tSMA/2)

LARC,54,56,52,R-(tSMA/2)
LARC,53,55,52,R+(tSMA/2)

A,49,25,26,48
A,51,49,48,50
A,53,51,50,54
A,55,53,54,56

LARC,56,59,61,R+(tSMA/2)
LARC,55,60,61,R-(tSMA/2)

LARC,60,62,61,R-(tSMA/2)
LARC,59,63,61,R+(tSMA/2)

LARC,65,63,64,R-(tSMA/2)
LARC,66,62,64,R+(tSMA/2)

LARC,67,65,64,R-(tSMA/2)
LARC,68,66,64,R+(tSMA/2)

A,56,59,60,55
A,59,63,62,60
A,62,66,65,63
A,66,68,67,65
A,68,70,69,67

*ENDIF

*IF,N,EQ,10,THEN

LARC,18,13,17,R+(tSMA/2)
LARC,19,14,17,R-(tSMA/2)

LARC,21,19,17,R-(tSMA/2)
LARC,20,18,17,R+(tSMA/2)

LARC,20,24,22,R-(tSMA/2)
LARC,21,23,22,R+(tSMA/2)

LARC,24,26,22,R-(tSMA/2)
LARC,23,25,22,R+(tSMA/2)

A,19,14,13,18
A,21,19,18,20
A,23,21,20,24
A,25,23,24,26

LARC,48,26,47,R+(tSMA/2)
LARC,49,25,47,R-(tSMA/2)

LARC,51,49,47,R-(tSMA/2)
LARC,50,48,47,R+(tSMA/2)

LARC,50,54,52,R-(tSMA/2)
LARC,51,53,52,R+(tSMA/2)

LARC,54,56,52,R-(tSMA/2)
LARC,53,55,52,R+(tSMA/2)

A,49,25,26,48
A,51,49,48,50
A,53,51,50,54
A,55,53,54,56

LARC,56,59,61,R+(tSMA/2)
LARC,55,60,61,R-(tSMA/2)

LARC,60,62,61,R-(tSMA/2)
LARC,59,63,61,R+(tSMA/2)

LARC,65,63,64,R-(tSMA/2)
LARC,66,62,64,R+(tSMA/2)

LARC,67,65,64,R-(tSMA/2)
LARC,68,66,64,R+(tSMA/2)
```

```
A,56,59,60,55
A,59,63,62,60
A,62,66,65,63
A,66,68,67,65

LARC,67,71,73,R+(tSMA/2)
LARC,68,72,73,R-(tSMA/2)

LARC,72,75,73,R-(tSMA/2)
LARC,71,74,73,R+(tSMA/2)

LARC,74,76,78,R-(tSMA/2)
LARC,75,77,78,R+(tSMA/2)

LARC,76,79,78,R-(tSMA/2)
LARC,77,80,78,R+(tSMA/2)

A,67,71,72,68
A,71,74,75,72
A,74,76,77,75
A,76,79,80,77
A,79,81,82,80

*ENDIF

!/eof

*ELSE                !Geometrias ímpares

x1=-(L)
*IF,N,EQ,1,THEN
y1=0
*ENDIF

*IF,N,EQ,3,THEN
y1=2*R
*ENDIF

*IF,N,EQ,5,THEN
y1=4*R
*ENDIF

*IF,N,EQ,7,THEN
y1=6*R
*ENDIF

*IF,N,EQ,9,THEN
y1=8*R
*ENDIF

*IF,N,EQ,11,THEN
y1=10*R
*ENDIF

x2=-(L)-(R-tSMA/2)
y2=y1

x3=-(L)
y3=y1+R-tSMA/2

x4=0
y4=y1+R-tSMA/2

x5=x1+L
y5=y1+R+tSMA/2

x6=x1
y6=y5

x7=x2-tSMA
y7=y1

x8=-L
y8=y1-R+tSMA/2

x9=x8
y9=y1-R-tSMA/2

x10=x1
y10=y1-2*R

x11=x10+(R-tSMA/2)
y11=y10

x12=x10+(R+tSMA/2)
y12=y10

x13=-L
y13=y10-(R-tSMA/2)

x14=-L
y14=y10-(R+tSMA/2)

x15=-L
y15=y1-4*R

x16=x2
y16=y15

x17=x7
y17=y15

x18=x1
y18=y1-6*R

x19=x18+(R-tSMA/2)
y19=y18

x20=x18+(R+tSMA/2)
y20=y18

x21=x18
y21=y18+(R-tSMA/2)

x22=x18
y22=y18+(R+tSMA/2)

x23=x1
y23=y1-8*R

x24=x23-(R-tSMA/2)
y24=y23

x25=x23-(R+tSMA/2)
y25=y23

x26=x23
y26=y23+(R-tSMA/2)

x27=x23
y27=y23+(R+tSMA/2)

x41=x1
y41=y1-10*R

x42=x41+(R-tSMA/2)
y42=y41

x43=x41+(R+tSMA/2)
y43=y41

x44=x41
y44=y41+(R-tSMA/2)

x45=x41
y45=y41+(R+tSMA/2)
```

```
x31=-(2*L)
y31=y5

x32=-(L)
y32=y31

x33=x5
y33=y5

x38=x33
y38=y31+tPlaca

x39=x32
y39=y31+tPlaca

x40=x31
y40=y31+tPlaca

K,1,x1,y1
K,2,x2,y2
K,3,x3,y3
K,4,x4,y4
K,5,x5,y5
K,6,x6,y6
K,7,x7,y7

K,8,x8,y8
K,9,x9,y9
K,10,x10,y10
K,11,x11,y11
K,12,x12,y12

K,13,x13,y13
K,14,x14,y14
K,15,x15,y15
K,16,x16,y16
K,17,x17,y17

K,18,x18,y18
K,19,x19,y19
K,20,x20,y20
K,21,x21,y21
K,22,x22,y22

K,23,x23,y23
K,24,x24,y24
K,25,x25,y25
K,26,x26,y26
K,27,x27,y27


K,41,x41,y41
K,42,x42,y42
K,43,x43,y43
K,44,x44,y44
K,45,x45,y45

K,31,x31,y31
K,32,x32,y32
K,33,x33,y33

K,38,x38,y38
K,39,x39,y39
K,40,x40,y40

!/eof

*IF,N,EQ,1,THEN
LARC,2,3,1,R-(tSMA/2)
LARC,7,6,1,R+(tSMA/2)

A,7,2,3,6
A,3,4,5,6
A,31,32,39,40
A,32,33,38,39

ARSYM,Y,ALL,,,,0,0          !Epelha áreas em
          torno de X

*ENDIF

*IF,N,EQ,3,THEN

LARC,2,3,1,R-(tSMA/2)
LARC,7,6,1,R+(tSMA/2)

LARC,2,8,1,R-(tSMA/2)
LARC,7,9,1,R+(tSMA/2)
LARC,11,9,10,R-(tSMA/2)
LARC,12,8,10,R+(tSMA/2)

C***======== TESTE =========

A,33,4,3,2,8,12,11,9,7,6,33
A,32,31,40,39,32
A,32,39,38,33,32

C***======== TESTE =========

ARSYM,Y,ALL,,,,0,0          !Epelha áreas em
          torno de X

*ENDIF

*IF,N,EQ,5,THEN

LARC,2,3,1,R-(tSMA/2)
LARC,7,6,1,R+(tSMA/2)

A,7,2,3,6
A,3,4,5,6

LARC,2,8,1,R-(tSMA/2)
LARC,7,9,1,R+(tSMA/2)
LARC,11,9,10,R-(tSMA/2)
LARC,12,8,10,R+(tSMA/2)

A,7,9,8,2
A,8,9,11,12

LARC,13,11,10,R-(tSMA/2)
LARC,14,12,10,R+(tSMA/2)
LARC,16,14,15,R-(tSMA/2)
LARC,13,17,15,R+(tSMA/2)

A,11,12,14,13
A,17,13,14,16

A,31,32,39,40
A,32,33,38,39


ARSYM,Y,ALL,,,,0,0          !Epelha áreas em
          torno de X

*ENDIF

*IF,N,EQ,7,THEN

LARC,2,3,1,R-(tSMA/2)
LARC,7,6,1,R+(tSMA/2)

A,7,2,3,6
A,3,4,5,6

LARC,2,8,1,R-(tSMA/2)
LARC,7,9,1,R+(tSMA/2)
LARC,11,9,10,R-(tSMA/2)
```

```
LARC,12,8,10,R+(tSMA/2)

A,7,9,8,2
A,8,9,11,12

LARC,13,11,10,R-(tSMA/2)
LARC,14,12,10,R+(tSMA/2)
LARC,16,14,15,R-(tSMA/2)
LARC,13,17,15,R+(tSMA/2)

A,11,12,14,13
A,17,13,14,16

LARC,16,22,15,R-(tSMA/2)
LARC,17,21,15,R+(tSMA/2)
LARC,21,19,18,R-(tSMA/2)
LARC,22,20,18,R+(tSMA/2)

A,16,22,21,17
A,22,20,19,21

A,31,32,39,40
A,32,33,38,39


ARSYM,Y,ALL,,,,0,0          !Epelha áreas em
        torno de X

*ENDIF

*IF,N,EQ,9,THEN

LARC,2,3,1,R-(tSMA/2)
LARC,7,6,1,R+(tSMA/2)

A,7,2,3,6
A,3,4,5,6

LARC,2,8,1,R-(tSMA/2)
LARC,7,9,1,R+(tSMA/2)
LARC,11,9,10,R-(tSMA/2)
LARC,12,8,10,R+(tSMA/2)

A,7,9,8,2
A,8,9,11,12

LARC,13,11,10,R-(tSMA/2)
LARC,14,12,10,R+(tSMA/2)
LARC,16,14,15,R-(tSMA/2)
LARC,13,17,15,R+(tSMA/2)

A,11,12,14,13
A,17,13,14,16

LARC,16,22,15,R-(tSMA/2)
LARC,17,21,15,R+(tSMA/2)
LARC,21,19,18,R-(tSMA/2)
LARC,22,20,18,R+(tSMA/2)

A,16,22,21,17
A,22,20,19,21

LARC,19,27,18,R-(tSMA/2)
LARC,20,26,18,R+(tSMA/2)
LARC,26,24,23,R-(tSMA/2)
LARC,27,25,23,R+(tSMA/2)

A,19,27,26,20
A,27,25,24,26

A,31,32,39,40
A,32,33,38,39


ARSYM,Y,ALL,,,,0,0          !Epelha áreas em
        torno de X

*ENDIF

*IF,N,EQ,11,THEN

LARC,2,3,1,R-(tSMA/2)
LARC,7,6,1,R+(tSMA/2)

A,7,2,3,6
A,3,4,5,6

LARC,2,8,1,R-(tSMA/2)
LARC,7,9,1,R+(tSMA/2)
LARC,11,9,10,R-(tSMA/2)
LARC,12,8,10,R+(tSMA/2)

A,7,9,8,2
A,8,9,11,12

LARC,13,11,10,R-(tSMA/2)
LARC,14,12,10,R+(tSMA/2)
LARC,16,14,15,R-(tSMA/2)
LARC,13,17,15,R+(tSMA/2)

A,11,12,14,13
A,17,13,14,16

LARC,16,22,15,R-(tSMA/2)
LARC,17,21,15,R+(tSMA/2)
LARC,21,19,18,R-(tSMA/2)
LARC,22,20,18,R+(tSMA/2)

A,16,22,21,17
A,22,20,19,21

LARC,19,27,18,R-(tSMA/2)
LARC,20,26,18,R+(tSMA/2)
LARC,26,24,23,R-(tSMA/2)
LARC,27,25,23,R+(tSMA/2)

A,19,27,26,20
A,27,25,24,26

LARC,24,45,23,R-(tSMA/2)
LARC,25,44,23,R+(tSMA/2)
LARC,44,42,41,R-(tSMA/2)
LARC,45,43,41,R+(tSMA/2)

A,24,45,44,25
A,44,42,43,45

A,31,32,39,40
A,32,33,38,39


ARSYM,Y,ALL,,,,0,0          !Epelha áreas em
        torno de X

*ENDIF

*ENDIF


!/eof

*IF,MOD(N,2),EQ,0,THEN

TYPE,1
                ! Aplicação da Malha na Seção
        Transversal
MAT,1
ASEL,S,LOC,y,1.01*y41,0.99*y6
```

```
ESIZE,(tSMA*indice)/(fator)
AMESH,ALL

TYPE,1

MAT,2
ASEL,S,LOC,y,y44,0.99*y41
ESIZE,(tSMA*indice)/(fator)
AMESH,ALL

ASEL,S,LOC,y,1.01*y6,y40
ESIZE,(tSMA*indice)/(fator)
AMESH,ALL

ALLSEL,ALL,ALL

*ELSE

TYPE,1 ! Aplicação da Malha na Seção
       Transversal
MAT,1
ASEL,S,LOC,y,-y6,0.99*y6
ESIZE,(tSMA*indice)/(fator)
AMESH,ALL

TYPE,1

MAT,2
ASEL,S,LOC,y,1.01*y6,y40
ESIZE,(tSMA*indice)/(fator)
AMESH,ALL


TYPE,1

MAT,2
ASEL,S,LOC,y,-y40,-1.01*y6
ESIZE,(tSMA*indice)/(fator)
AMESH,ALL

ALLSEL,ALL,ALL

*ENDIF

!/eof

ALLSEL,ALL,ALL
/PNUM,KP,0
/PNUM,LINE,0
/PNUM,AREA,0
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,0
/PNUM,TABN,0
/PNUM,SVAL,0
/PNUM,DOMA,0
/NUMBER,1
!*
/PNUM,MAT,1
/REPLOT

!/eof

C***  === CONDIÇÕES DE CONTORNO E
       CARREGAMENTOS  ====

*IF,MOD(N,2),EQ,0,THEN

NSEL,S,LOC,Y,y33,y33
            !Contato do SMA com a plca de
       Al
NUMMRG,ALL,1E-5
ALLSEL,ALL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,y41,y41 !Contato do SMA com a
       plca de Al
NUMMRG,ALL,1E-5
ALLSEL,ALL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,y44,y44
D,ALL,UY,0

NSEL,S,LOC,Y,y44+tplaca,y44
NSEL,R,LOC,X,x31,x31
D,ALL,UX,0

NSEL,S,LOC,Y,y40-tplaca,y40
NSEL,R,LOC,X,x31,x31
D,ALL,UX,0

*ELSE

NSEL,S,LOC,Y,y33,y33 !Contato do SMA com a
       plca de Al
NUMMRG,ALL,1E-5
ALLSEL,ALL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,-y33,-y33M!Contato do SMA com
       a plca de Al
NUMMRG,ALL,1E-5
ALLSEL,ALL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,0,0 !Contato do SMA com o SMA
NUMMRG,ALL,1E-5
ALLSEL,ALL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,-y40,-y40
D,ALL,UY,0

NSEL,S,LOC,Y,-y6,-y40
NSEL,R,LOC,X,x31,x31
D,ALL,UX,0

NSEL,S,LOC,Y,y6,y40
NSEL,R,LOC,X,x31,x31
D,ALL,UX,0

*ENDIF

!/eof
C*** ==== SOLUCAO ====

/SOLUTION

ANTYPE,STATIC, !Indicação de análise estática
       (evolução no tempo quasi-estática)
NLGEOM, ON !Grandes deformações habilitada
!*
tref, u_To !Indicação da temperatura de referência
tunif,u_T !Indicação da temperatura de análise
!*
OUTRES,ALL,ALL !Salvar todos os resultados
NROPT,UNSYM !Usar matriz assimétrica dos
       elementos para cálculos complestos por
! Newton-Raphson
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 núm máx de iterações
       de esquilíbro para análises não linear
!*
TIME,1 !Especifica o tempo ao final da solução

*DIM,v_u_Ext,ARRAY,2*nDiv          ! Vetores de
       armazenamento
*DIM,v_F_Ext,ARRAY,2*nDiv
```

```
NSEL,S,LOC,y,y40,y40
cm,extremidade_u,node

*IF,Carregamento,EQ,0,THEN ! Acoplamento -
        Carregamento em x
        cp,1,UX,extremidade_u
*ENDIF

*IF,Carregamento,EQ,1,THEN ! Acoplamento -
        Carregamento em y
        cp,1,UY,extremidade_u
*ENDIF

*GET, nExt, NODE, 0, num, MIN,
ALLSEL,ALL,ALL

*DO,ii,1,nDiv,1

! Load Steps - Carregamento


        u_amp=Amp_u*(ii/nDiv)
        cmsel,s,extremidade_u,node
        *IF,Carregamento,EQ,0,THEN
                D,nExt,UX,u_amp
        *ENDIF
        *IF,Carregamento,EQ,1,THEN
                D,nExt,UY,u_amp
        *ENDIF

        ALLSEL,ALL,ALL

        SOLVE

        *IF,Carregamento,EQ,0,THEN
                        ! recupera força e
        deslocamento da extremidade
                *GET, u_Ext,NODE,nExt,U,X

                *GET, F_Ext,NODE,nExt,RF,FX
        *ENDIF
        *IF,Carregamento,EQ,1,THEN
                *GET, u_Ext,NODE,nExt,U,Y

                *GET, F_Ext,NODE,nExt,RF,FY
        *ENDIF

        v_u_Ext(ii)=u_Ext
        v_F_Ext(ii)=F_Ext

*ENDDO

!/eof

*DO,ii,1,nDiv,1

! Load Steps - Descarregamento

        u_amp=Amp_u*(nDiv-ii)/(nDiv)
        cmsel,s,extremidade_u,node

        *IF,Carregamento,EQ,0,THEN
                D,nExt,UX,u_amp
        *ENDIF
        *IF,Carregamento,EQ,1,THEN
                D,nExt,UY,u_amp
        *ENDIF
        ALLSEL,ALL,ALL

        SOLVE

        *IF,Carregamento,EQ,0,THEN
                        ! recupera força e
        deslocamento da extremidade
                *GET, u_Ext,NODE,nExt,U,X

                *GET, F_Ext,NODE,nExt,RF,FX
        *ENDIF
        *IF,Carregamento,EQ,1,THEN
                *GET, u_Ext,NODE,nExt,U,Y

                *GET, F_Ext,NODE,nExt,RF,FY
        *ENDIF

        v_u_Ext(ii+nDiv)=u_Ext
        v_F_Ext(ii+nDiv)=F_Ext

*ENDDO


C*** ==== PÓS-PROCESSAMENTO ====

/POST1
/DSCALE,1,1.0


/POST26

*IF,Carregamento,EQ,0,THEN
        RFORCE,2,nExt,F,x, Fx_2
        STORE,MERGE

        NSOL,3,nExt,U,x, Ux_3
        STORE,MERGE
*ENDIF

*IF,Carregamento,EQ,1,THEN
        RFORCE,2,nExt,F,y, Fy_2
        STORE,MERGE

        NSOL,3,nExt,U,y, Uy_3
        STORE,MERGE
*ENDIF


XVAR,3
PLVAR,2,

/REPLOT

!/EXPAND,1,RECT,HALF,,1e-
        005,,1,RECT,HALF,,,1e-005,
        ,RECT,FULL,,,,
/REPLOT
!/eof
```

Anexo I

Folha de dados

Material Data Sheet

Superelastic Nitinol Alloys*

	SE508ELI	SE508	SE506	SE510
PHYSICAL PROPERTIES				
Melting Point:	1310℃	1310℃	1310℃	1310℃
Density:	6.5 g/cm^3	6.5 g/cm^3	6.5 g/cm^3	6.5 g/cm^3
Electrical Resistivity:	82 µohm-cm	82 µohm-cm	82 µohm-cm	82 µohm-cm
Modulus of Elasticity:	41 – 75 GPa	41 – 75 GPa	41 – 75 GPa	41 – 75 GPa
Coefficient of Thermal Expansion:	11 x 10^{-6} / ℃	11 x 10^{-6} / ℃	11 x 10^{-6} / ℃	11 x 10^{-6} / ℃
MECHANICAL PROPERTIES				
Ultimate Tensile Strength:	≥ 1070 MPa	≥ 1070 MPa	≥ 1070 MPa	≥ 1070 MPa
Total Elongation:	≥ 10%	≥ 10%	≥ 10%	≥ 10%
SUPERELASTIC PROPERTIES				
Loading Plateau Stress @ 3%	≥ 380 MPa	≥ 380 MPa	~25% lower than SE508	~25% higher than SE508
Permanent Set (after 6% strain)	≤ 0.3%	≤ 0.3%	≤ 0.3%	≤ 0.3%
TRANSFORMATION TEMPERATURE				
Ingot Austenite Finish (A_f)	-25 to 5℃	-25 to 5℃	5℃ to 25℃	-65 to -25℃
Finished Product A_f	-25 to 30℃	-25 to 30℃	10℃ to 45℃	-65 to 10℃
COMPOSITION (Meets ASTM F2063 requirements)				
Nickel (nominal):	55.8 wt.%	55.8 wt.%	55.6 wt.%	56.0 wt.%
Titanium:	Balance	Balance	Balance	Balance
Oxygen:	≤ 0.01 wt.%	≤ 0.05 wt.%	≤ 0.05 wt.%	≤ 0.05 wt.%
Carbon:	≤ 0.005 wt.%	≤ 0.02 wt.%	≤ 0.02 wt.%	≤ 0.02 wt.%
Inclusion Area Fraction:	≤ 1.0%	≤ 2.8%	≤ 2.8%	≤ 2.8%
APPLICATIONS				
	SE508ELI is our ultrapure material for your most safety-critical applications. ELI has the fewest and smallest inclusions of any commercial Nitinol material.	SE508 is our flagship material with over two decades of proven success as the world's most implanted Nitinol material.	SE506 has a higher transformation temperature that results in a softer feel compared to SE508. Typical application is orthodontic archwires for a mild chronic force.	SE510 has a lower transformation temperature that results in a stiffer feel compared to SE508. Typical application is guidewires with enhanced kink resistance.

* These values should only be used as guidelines for developing material specifications. Properties of Nitinol Alloys are strongly dependent on processing history and ambient temperature. The mechanical and superelastic properties shown here are typical for standard superelastic straight Nitinol at room temperature tested in uniaxial tension. Bending properties differ, and depend on specific geometries and applications. Modulus is dependent on temperature and strain. Certain shapes or product configurations may require custom specifications. Materials are also available in the cold-worked or annealed conditions.

ndc

Nitinol Devices & Components • 47533 Westinghouse Drive • Fremont, California 94539
(510)683-2000 • Fax: (510)683-2001 • sales@nitinol.com • www.nitinol.com

We are Nitinol.™