CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

TITULO: ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA DISSIPAÇÃO DE ENERGIA EM ELEMENTOS PSEUDOELÁSTICOS

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

Orientadores:

Prof. Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco, D.Sc.

Prof. Marcelo Amorim Savi, D.Sc.

Rio de Janeiro
Agosto de 2015

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA DISSIPAÇÃO DE ENERGIA EM ELEMENTOS PSEUDOELÁSTICOS

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 requisito necessário à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais.

Rodolpho Barbosa da Hora

Aprovado por:

_____

Prof. Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco, D.Sc. (orientador)

_____

Prof. Marcelo Amorim Savi, D.Sc. (co-orientador)

_____

Luciana Loureiro da Silva Monteiro, D.Sc.

_____

Nestor Alberto Zouain Pereira, D.Sc. (COPPE/UFRJ)

Rio de Janeiro
Agosto de 2015

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

H811 Hora, Rodolpho Barbosa da
Análise numérica e experimental da dissipação de energia em elementos pseudoelásticos / Rodolpho Barbosa da Hora.—2015.
ix, 61f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2015.
Bibliografia : f.56-61
Orientadores : Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco
Marcelo Amorim Savi

1. Ligas com memória de forma. 2. Método dos elementos finitos. 3. Molas. 4. Análise numérica. 5. Elasticidade. I. Pacheco, Pedro Manuel Calas Lopes (Orient.). II. Savi, Marcelo Amorim (Orient.). III. Título.

CDD 620.1632

"Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor, mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser"

Martin Luther King (1929-1968)

A Deus Pai criador, ao Seu Filho redentor e ao Espírito que nos santifica;

Aos meus pais, minha fortaleza;

À minha família e amigos, minha estrutura.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde, inspiração e capacidade de realizar este trabalho.

Aos meus Orientadores Marcelo Amorim Savi e, em especial, ao Pedro Manuel Calas Pacheco, pelos ensinamentos, incentivo e confiança creditada em mim.

Agradeço ao amigo de laboratório Vinicius Rodrigues, por toda ajuda e colaboração no desenvolvimento do presente trabalho.

Ao Professor Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, pelas ideias e colaborações na elaboração deste trabalho.

Aos meus pais, agradeço pelo apoio, dedicação, educação, incentivo, paciência e carinho.

Aos meus irmãos, Vinicius e Mariana, obrigado pela paciência, amor e por acreditarem em mim.

A minha namorada, Carolina, obrigado pelo companheirismo, amizade, amor, carinho e inspiração que representa para mim.

Aos meus amigos e familiares, que de certa forma contribuíram para esta conquista.

Ao CEFET/RJ, pelo suporte financeiro durante o curso e pela aquisição de equipamentos indispensáveis para realização deste trabalho.

RESUMO

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA DISSIPAÇÃO DE ENERGIA EM ELEMENTOS PSEUDOELÁSTICOS

Rodolpho Barbosa da Hora

Orientadores:

Prof. Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco, D.Sc.

Prof. Marcelo Amorim Savi, D.Sc.

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida 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 em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

As vibrações mecânicas podem gerar um processo de degradação, reduzindo o tempo de vida útil dos componentes de máquinas, estruturas e a saúde ocupacional dos operadores. Diversas soluções para problemas de vibrações indesejadas em estruturas e máquinas têm sido desenvolvidas. Os materiais inteligentes têm sido aplicados, especialmente nos últimos anos, em vários campos, inclusive em dispositivos que têm como principal função a atenuação de vibrações mecânicas. Entre os materiais inteligentes, as Ligas com Memória de Forma (*Shape Memory Alloys* - SMA) apresentam a capacidade de desenvolver comportamentos pseudoelástico histeréticos associados com a dissipação de energia e a alteração de rigidez. Este trabalho apresenta uma modelagem numérica não-linear baseada no Método de Elementos Finitos para estudar o comportamento de elementos pseudoelásticos de SMA atenuadores de vibrações. O modelo constitutivo utilizado considera a presença de duas fases (martensita e austenita) e grandes deslocamentos, e é utilizado para estudar o comportamento de barras e molas helicoidais de SMA sob carregamento axial e de torção. Análises experimentais são utilizadas para calibrar o modelo numérico desenvolvido. Os resultados indicam que o modelo desenvolvido é capaz de capturar o comportamento dos elementos pseudoelásticos de SMA.

Palavras-chave: Ligas com Memória de Forma; Pseudoelasticidade; Molas Helicoidais; Método de Elementos Finitos

ABSTRACT

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF NONLINEAR HYSTERIC BEHAVIOR OF PSEUDOELASTIC HELICAL SPRINGS

Rodolpho Barbosa da Hora

Advisors:

Prof. Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco, D.Sc.
Prof. Marcelo Amorim Savi, D.Sc

Master's Thesis Summary submitted to the Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, at Federal Center of Technological Education Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ as part of the requirements for obtaining the Master's Degree in Mechanical Engineering and Materials Technology.

Mechanical vibrations can promote a degradation process, reducing the useful life of the machine components, machines, structures, and also can affect the occupational health of operators. Several solutions to problems of unwanted vibrations in structures and machines were developed. Smart materials have been applied, especially in recent years, in mechanical vibrations attenuators. Among intelligent materials, Shape Memory Alloys (Shape Memory Alloys - SMA) have the ability to develop hysteretic pseudoelastic behavior associated to energy dissipation and stiffness variation. This work presents a nonlinear numerical modeling based on the finite element method developed to study the behavior of pseudoelastic elements of SMA vibration attenuators. A constitutive model that considers the presence of two phases (austenite and martensite) and large displacement effects is used to study the behavior of SMA bars under axial and torsional loads and SMA helical springs. Experimental analysis is used to calibrate the numerical model developed. The results indicate that the model is able to capture the main behavior of SMA pseudoelastic elements.

Keywords:

Shape Memory Alloys; Pseudoelasticity; Helical Springs; Finite Element Method

Rio de Janeiro
August 2015

SUMÁRIO

Capítulo I - Introdução 1

I.1 Organização do Trabalho 7

Capítulo II - Redução de Vibrações por Dissipação de Energia 9

II.1 Ligas com Memória de Forma 11

II.1.1 Efeito de Memória de Forma 13

II.1.2 Efeito de Memória de Forma Reversível 13

II.1.3 Pseudoelasticidade ou Superelasticidade 14

II.2 Modelo Constitutivo 16

II.3 Aplicações e Estudos Utilizando SMA 18

Capítulo III – Barras Axiais e Barras de Torção Pseudoelásticas 23

III.1 – Modelo de Elementos Finitos 23

III.2 Resultados Numéricos 26

Capítulo IV – Molas Helicoidais Pseudoelásticas 34

IV.1 - Molas Helicoidais de Material Linear-Elástico 34

IV.1.1. Efeito da Curvatura 37

IV.2 - Modelo de Elementos Finitos 43

IV.3 Resultados Numéricos 44

Capítulo V - Conclusões 54

Capítulo VI – Referências Bibligráficas 56

Capítulo I - Introdução

As crescentes exigências dos padrões de aceitação de disponibilidade, continuidade, qualidade, confiabilidade e segurança de estruturas e máquinas, aliado ao aumento da complexidade produtos desenvolvidos pelas indústrias, cada vez mais enxutos, apresentam um cenário desafiador para a engenharia. A fim de reduzir as ocorrências, as durações e até a probabilidade de defeitos e falhas, a indústria investe em pesquisa e desenvolvimento de produtos que visam impedir a indisponibilidade operacional de equipamentos e estruturas, o que em termo de financeiros, é muita das vezes menor do que após a falha.

A vibração mecânica gera um processo de degradação, reduzindo o tempo de vida útil dos componentes de máquinas, máquinas, estruturas e a saúde ocupacional dos operadores. Cardinale e Pope, (2003) realizaram uma pesquisa extensiva que aponta que a dor lombar é a principal causa de incapacidade na população com idade inferior a 45 anos e tem sido associada à exposição do corpo a vibrações em ambientes industriais.

Nesse contexto, a engenharia vem desenvolvendo soluções para problemas de vibrações indesejadas em estruturas e máquinas. Os materiais inteligentes têm sido aplicados, especialmente nos últimos anos, em vários campos, inclusive em dispositivos que têm como principal função a atenuação de vibrações mecânicas. Atualmente os materiais inteligentes são utilizados em sensores e atenuadores, apresentando como principais características a miniaturização, alta capacidade de carga e velocidade de resposta (AGUIAR, 2011).

Dentre os materiais inteligentes mais utilizados pode-se citar os: piezoelétricos, eletroestrictivos, magnetoestrictivos, fluidos eletro-reológicos, fluidos magneto-reológicos e os materiais com memória de forma (ROGERS, 1995; SAVI *et al.*, 1997).

A vasta aplicabilidade de dispositivos com elementos pseudoelásticos de ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloy* – SMA), em função de suas características dissipativas, resultam em um cenário relevante a ser explorado. Nesse sentido, este trabalho apresenta um estudo utilizando modelos numéricos e procedimentos experimentais, a fim de analisar a capacidade de dissipação de energia de elementos pseudoelásticos de SMA. Inicialmente é explorado o comportamento de uma barra de torção pseudoelástica de SMA para avaliações da capacidade de dissipação da liga. Em seguida, desenvolve-se a análise do comportamento de uma mola helicoidal pseudoelástica de SMA, considerando os efeitos das não-linearidades geométricas e constitutivas.

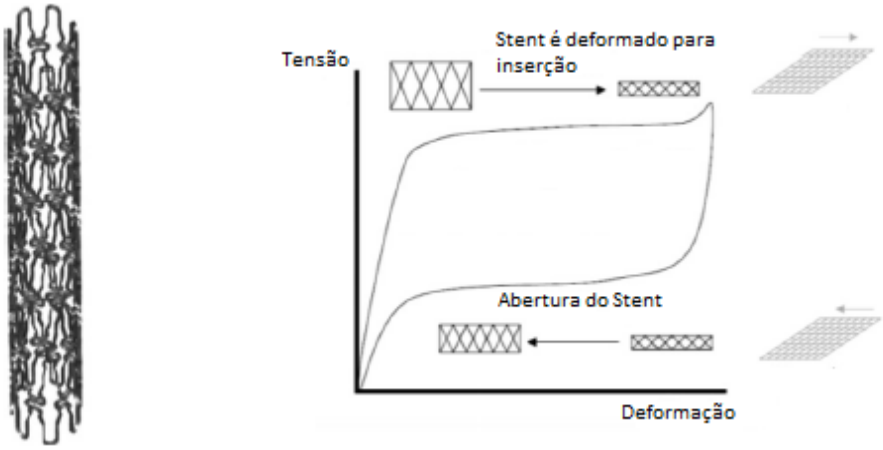
As características pseudoelásticas são exploradas a fim de caracterizar a capacidade de dissipação de energia dos dois elementos. Nesse contexto, devido às não-linearidades presentes e ao acoplamento termomecânico em elementos de SMA, as análises experimentais são de fundamental importância para a validação e calibração dos modelos numéricos propostos.

As propriedades das SMAs são muito atraentes para os interesses tecnológicos, o que vem motivando a sua utilização em diferentes campos da ciência e da engenharia.

Na telefonia, as antenas usualmente fabricadas em aço, agora são fabricadas também utilizando SMA. As SMAs superelásticas de NiTi são amplamente utilizadas devido à sua grande resistência. Utilizando o mesmo princípio, elas também são utilizadas para fabricação de armações de óculos, onde faz-se o uso de sua superelasticidade para manter a geometria desejada.

Na parte médica, as SMAs são amplamente utilizadas nas técnicas de bloqueio e redução dos vasos sanguíneos ou válvulas cardíacas. O *stent*, assim denominado, é também usado extensivamente para tratamento de doenças vasculares a fim de corrigir o fluxo sanguíneo e em tratamentos de doenças coronarianas. O *stent* é colocado na posição aberta e então comprimido é inserido no cateter. Quando o cateter é

posicionado com o *stent* na região vascular desejada, ele pode ser liberado, expandindo sozinho contra o vaso sanguíneo. Os *stents* de SMA podem ser construídos de diferentes maneiras. Eles podem ser feitos de fio, “coiled strip” e em tubos cortados a laser. A superelasticidade do NiTi foi a propriedade que iniciou o interesse desse material em *stents*. Mas o uso desse material nesse tipo de dispositivo vai além da superelasticidade. (MACHADO e SAVI, 2003). A FIG. I.1(a) apresenta a geometria de um *stent* e a FIG. I.1(b) o princípio de funcionamento.



(a) (b)

FIG. I.1: *Stents* cardíacos: (a) geometria e (b) princípio de funcionamento (MORGAN, 2004)

No âmbito da odontologia, os fios de SMA são utilizados em tratamentos com aparelhos ortodônticos. Esses fios, que podem ser de seção transversal circular, quadrada ou retangular, permitem a aplicação de um carregamento de força baixa e constante, o que elimina a necessidade de reapertos (PETRINI e MIGLIAVACCA, 2011).



FIG.I.2: Utilização de SMA na indústria ortodôntica: aparelho fixo (ANDREASEN; HILLEMAN, 1971).

Na robótica, BUNDOO *et al.* (2009) analisaram a possibilidade da utilização de fios de SMA como atuadores unidirecionais, com o objetivo de formar músculos artificiais para reaver os movimentos de membros, como por exemplo, os movimentos de mãos.

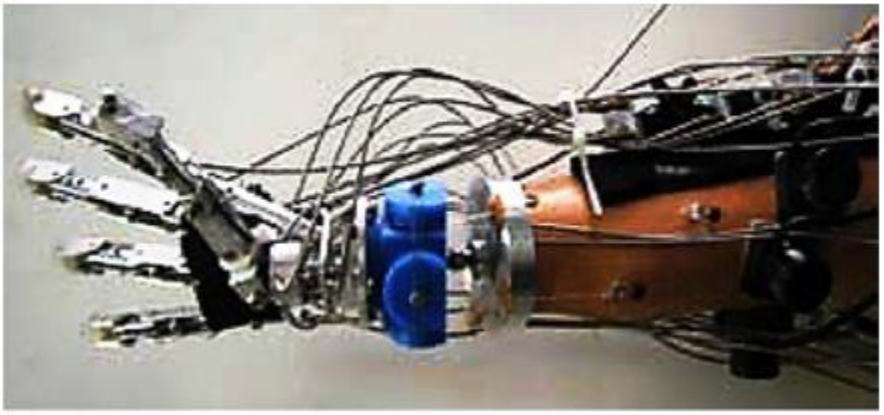


FIG.I.3: Utilização na robótica: protótipo de uma mão (LOH *et al.,* 2005)

Na área automotiva, o número de sensores e atuadores estão aumentando devido à demanda por segurança, conforto e desempenho pelos consumidores. A crescente tecnologia oferece uma larga variedade de oportunidades para o uso de atuadores de SMA como alternativa para atuadores eletromagnéticos em automóveis. A maioria dos atuadores de SMA são utilizados como atuadores lineares (ex.: flap de controle de temperatura, posicionamento de retrovisores, etc.) e atuadores termoativos

(ex.: controle de temperatura do motor, lubrificação do motor, etc.). Todavia, devido à sua atraente capacidade de conformação (estruturas ativas e adaptativas), suas aplicações estão avançando para outras áreas, tais como aerodinâmica e em aplicações estéticas. Sua simplicidade mecânica e compactação com o uso de SMA reduz a escala de tamanho, peso e custo dos atuadores, além de promover um significativo benefício no desempenho quando comparado aos atuadores convencionais (DOLCE *et al.*, 2001).

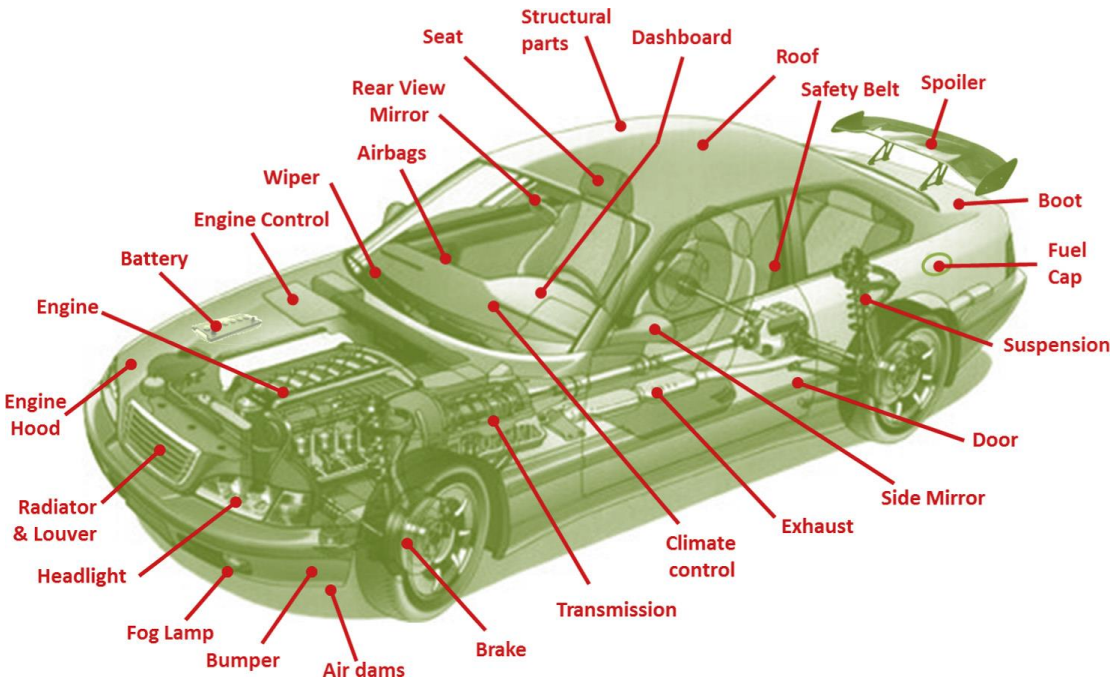


FIG.I.4: Aplicações possíveis e também existentes para SMA na indústria automotiva (STOECKEL, 1990)

Na área aeronáutica, um exemplo é a utilização em “flaps” de avião. Esse sistema necessita somente o uso de corrente elétrica para que seja realizado o movimento desejado (HARTL *et al.*, 2010). Essa aplicação de SMA reduz a utilização de materiais mecânicos e hidráulicos, reduzindo o peso próprio da aeronave, o que aumenta a performance da aeronave de modo geral.

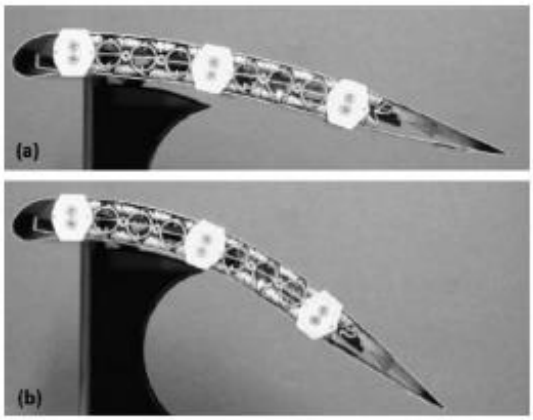


FIG.I.5: Aplicação de SMA na indústria aeroespacial: flaps (SOFLA et al., 2010).

Mesmo havendo vasta gama de aplicação para esse tipo de material, a modelagem numérica não é um campo de conhecimento consolidado, tendo um forte desenvolvimento atualmente. Seu comportamento complexo, que envolve a termodinâmica, mecânica e as suas transformações de fase, demanda o desenvolvimento de modelos numéricos capazes de desenvolver e descrever o comportamento termomecânico do material.

A descrição do comportamento termomecânico das SMAs pode ser realizada por diferentes modelos constitutivos, como exposto por PAIVA e SAVI (2006) que apresentam uma visão geral do tema.

Este trabalho apresenta uma análise do comportamento termomecânico de dispositivos de SMA utilizados para dissipar energia. A motivação central dessa dissipação pode ser a redução de vibração. A modelagem dos elementos de SMA desenvolvida neste trabalho considera o modelo constitutivo proposto por AURICCHIO *et al.* (1997). Este modelo tridimensional é capaz de descrever o comportamento pseudoelástico de SMA. O método dos elementos finitos é utilizado para promover a discretização espacial e analisar os fenômenos físicos envolvidos.

I.1 Organização do Trabalho

Esta dissertação está dividida em quatro capítulos. Neste primeiro capítulo é apresentado uma descrição geral sobre o assunto, motivação e os principais objetivos.

No segundo capítulo é feita uma exposição das principais soluções para redução de vibrações envolvendo dissipação de energia. É dado destaque à utilização de elementos de SMA como absorvedores de energia. Ainda, é desenvolvida uma descrição dos principais comportamentos termomecânicos das SMAs, uma descrição do modelo constitutivo utilizado para a análise numérica e exemplos de aplicações em diversas áreas.

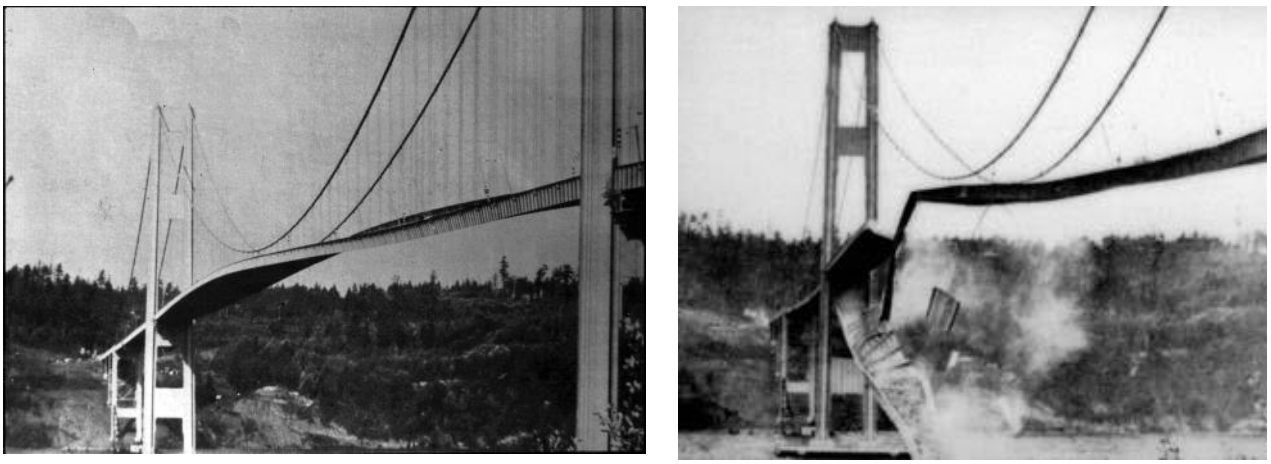
No terceiro capítulo é apresentada uma análise do comportamento de barras de torção pseudoelásticas. As análises desenvolvidas envolvem diversas geometrias, sendo exploradas as distribuições de tensões e de transformação de fase na seção transversal da barra, além das curvas de histerese. O estudo envolve a comparação da capacidade de dissipação em função da geometria, dando enfoque na eficiência dos elementos em termos da relação capacidade de dissipação/peso.

O quarto capítulo aborda um estudo numérico e experimental sobre molas helicoidais pseudoelásticas. Inicialmente são apresentadas características básicas das molas helicoidais, como os esforços, tensões envolvidas, as relações força-deslocamento, os efeitos não-lineares promovidos pela curvatura da mola e os efeitos de grandes deslocamentos. As etapas da análise experimental envolvem a fabricação de molas helicoidais pseudoelásticas, procedimentos de construção e tratamentos térmicos adotados, e ensaios de tração cíclicos realizados em laboratório. Assim como para o caso das barras de torção analisadas no Capítulo III, a análise numérica das molas helicoidais pseudoelásticas é desenvolvida utilizando um pacote comercial de elementos finitos que considera os efeitos de transformação de fase através de um modelo tridimensional. Nesse contexto, a geometria, propriedades mecânicas, condições de contorno e hipótese adotadas são escolhidas de modo a reproduzir as

condições presentes nos ensaios experimentais cíclicos de tração. Em seguida, é realizada uma comparação do comportamento das análises experimentais e numéricas para fins de calibração do modelo desenvolvido. E por último, é realizada a análise dos resultados da distribuição de tensão e da transformação de fase na seção transversal, curvas de histerese, comparação da capacidade de dissipação em função da carga e os efeitos combinados das não-linearidades geométrica e constitutiva.

Capítulo II - Redução de Vibrações por Dissipação de Energia

O projeto de máquinas, fundações, estruturas, motores, turbinas, sistemas de controle e acionamento requer a análise de vibrações mecânicas para que o funcionamento ocorra de forma esperada. A presença de vibrações mecânicas pode promover problemas no funcionamento de diversos equipamentos. Problemas comuns observados são o desgaste acelerado de mancais e engrenagens ou o desgaste de componentes do maquinário. Além disso, a presença de vibrações pode resultar em falhas catastróficas de equipamentos e estruturas. Um exemplo clássico é o caso da ponte de Tacoma nos Estados Unidos, que colapsou devido à ressonância induzida por vento. A FIG. II.1 mostra o registro de dois instantes do processo de colapso da ponte.



(a) (b)

FIG. II.1: Ponte Tacoma (EUA) que colapsou devido à ação de ventos de 64 km/h em 1940 (ELLIOTT, 1940).

A ressonância ocorre quando a frequência de excitação externa se aproxima da frequência natural do sistema, resultando em grandes deslocamentos e deformações que provocam comportamentos críticos causando falhas estruturais e/ou mecânicas. Não-linearidades tendem a tornar o fenômeno ainda mais crítico, resultando em situações como saltos dinâmicos.

Nesse contexto, dispositivos com capacidade de dissipar energia e/ou alterar as frequências de ressonância do sistema têm sido vastamente explorados para evitar

situações críticas. Em aplicações comuns são normalmente utilizados elementos como calços, amortecedores e molas de aço. Esses elementos são classificados como elementos passivos uma vez que as suas características operacionais permanecem inalteradas durante o processo. Uma abordagem normalmente mais eficiente consiste na utilização de elementos ativos que permitem a alteração das suas características em função de estímulos externos (DOLCE *et al.*, 2001). O uso de materiais inteligentes é uma alternativa interessante para produzir sistemas ativos ou passivos-adaptativos. O uso de elementos de SMAs tem se destacado em aplicações envolvendo a dissipação de energia para redução de vibrações. Nesse contexto, vale destacar as pesquisas de atuadores estruturais que visam a preservação de edificações em situações de terremoto (CORBI, 2003; DESROCHES e DELEMONT, 2002; DYKE *et al.*, 1998; FUGAZZA, 2003; HAN *et al.*, 2003; JOHNSON *et al.*, 2008; OZBULUT *et al.*, 2010).

A Basílica de San Francesco na Itália é um exemplo do uso de SMAs para evitar os efeitos do terremoto. No ano de 1997, um terremoto separou partes do telhado. Após a restauração, dispositivos de SMA foram utilizados na estrutura (INDIRLI *et al.*, 2001). Cada dispositivo, constituído por fios de SMA, foi dimensionado para suportar forças de tração e compressão. O dispositivo, mostrado na FIG. II.2, apresenta um comportamento linear e pequenos deslocamentos para pequenos carregamentos horizontais, como os provocados pelo vento. Entretanto, caso ocorra um terremoto de grande magnitude, a tensão crítica dos fios de SMA é excedida induzindo o início de transformação de fase.



FIG.II.2: Dispositivos utilizados no telhado da Basílica de San Francesco (INDIRLI *et al.*, 2001)

Em seguida são apresentadas as principais características das SMAs e uma revisão sobre a sua utilização em diversas áreas da engenharia, principalmente sua utilização na atenuação de vibrações.

II.1 Ligas com Memória de Forma

As SMAs são materiais que apresentam duas fases macroscópicas: austenita e martensita. A fase martensítica possui diferentes variantes: martensita maclada e martensita não-maclada que é induzida por tensão. A austenita é uma fase estável em temperaturas elevadas e a martensita é uma fase estável em temperaturas baixas. As transformações de fase podem ser induzidas tanto por carregamentos mecânicos ou térmicos.

Em um estado livre de tensão a baixas temperaturas, a fase martensíticas é estável. O aquecimento provoca a transformação para a fase austenítica, chamada de transformação direta. No resfriamento, ocorre a transformação reversa onde a fase austenítica resulta na fase martensítica. O processo de transformação de fase envolve 4 temperaturas: temperaturas de início e término da transformação austenita $\rightarrow$ martensita (A_s e A_f, respectivamente) e temperaturas de início e término da transformação martensita $\rightarrow$ austenita (M_s e M_f, respectivamente).

A transformação de fase direta também pode ser induzida através da aplicação de um carregamento mecânico. No entanto este processo não é possível para temperaturas superiores a M_d, denominada temperatura limite para transformação direta. Acima desta temperatura a SMA sofre diretamente um processo de plastificação, característica das ligas metálica comuns (JANI *et al*., 2014).

A FIG.II.3 ilustra os 3 efeitos associados às SMAs, os quais são descritos a seguir:

i. Efeito de Memória de Forma (*one-way*);

ii. Efeito de Memória de Forma Reversível (*two-way*); e

iii. Pseudoelasticidade ou Superelasticidade.

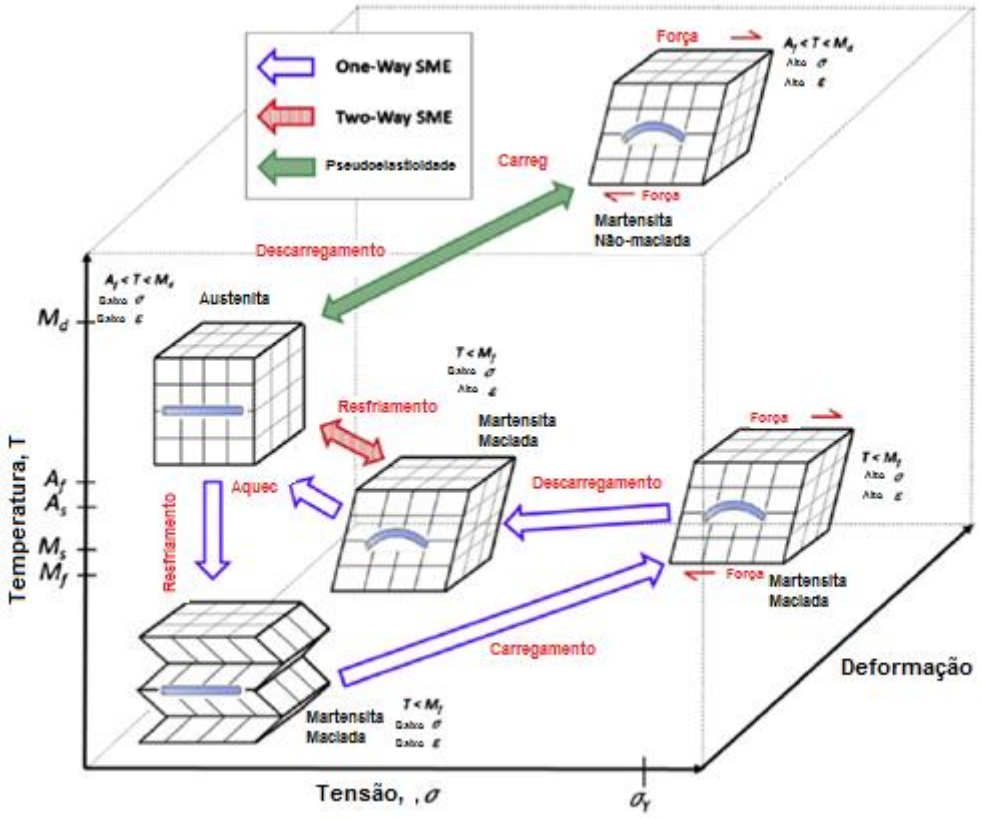


FIG.II.3: Fases das Ligas com Memória de Forma e suas estruturas cristalinas (JANI *et al*., 2014)

II.1.1 Efeito de Memória de Forma

Quando uma SMA martensítica no estado maclado livre de tensão é submetida a um carregamento mecânico trativo ocorre uma reorientação que resulta na transformação de fase macroscópica de martensita maclada para martensita não-maclada. Este processo produz uma deformação associada à transformação de fase macroscópica (trecho *OAB* na Fig. II.4). Se o carregamento mecânico for retirado, permanece uma deformação residual (trecho *BC* na Fig. II.4). Se o material for aquecido a uma temperatura acima de A_s, a deformação residual começa a ser recuperada até obter-se completa recuperação quando a temperatura atingir A_f (trecho *OC* na Fig. II.4). O material experimenta uma transformação de fase para uma estrutura austenítica, recuperando a sua forma original. Este processo recebe o nome de Efeito de Memória de Forma (*one-way* ou OWSME) e está associado a elevadas densidades de energia de atuação (JANI et al., 2014).

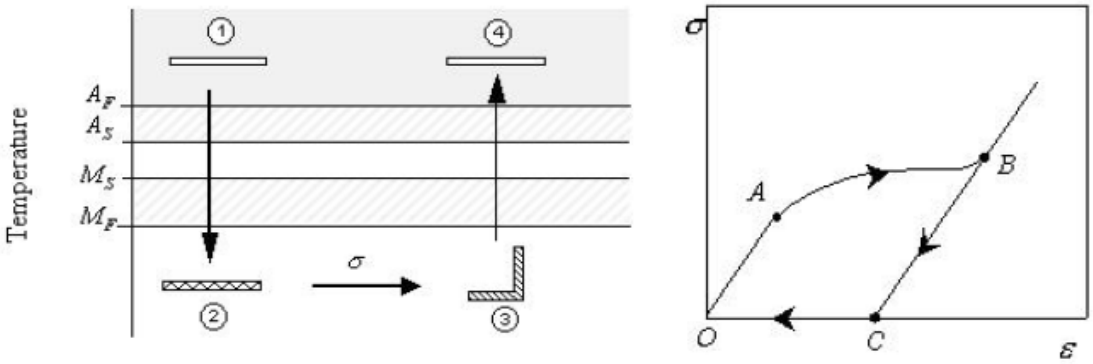


FIG.II.4: Efeito de memória de forma (OWSME) e sua respectiva curva tensão-deformação (PAIVA e SAVI, 2006)

II.1.2 Efeito de Memória de Forma Reversível

O Efeito de Memória de Forma Reversível (*two-way* ou TWSME) é baseado no Efeito de Memória de Forma (OWSME) e permite que em uma peça de SMA possua duas formas diferentes associadas a dois níveis de temperatura. O efeito requer um treinamento prévio de diversos ciclos envolvendo o desenvolvimento de deformações

plásticas, que ocorrem após a transformação completa em processo direto de transformação de martensita maclada em martensita não-maclada. Após o treinamento, a peça passa a “recordar” sua forma, tanto a alta quanto à baixa temperatura. No entanto, o TWSME é menos usado comercialmente devido à complexidade no treinamento do material e pelo fato de produzir valores de recuperação da deformação inferiores às oferecidas pelo OWSME. A FIG. II.5 ilustra o processo de treinamento.

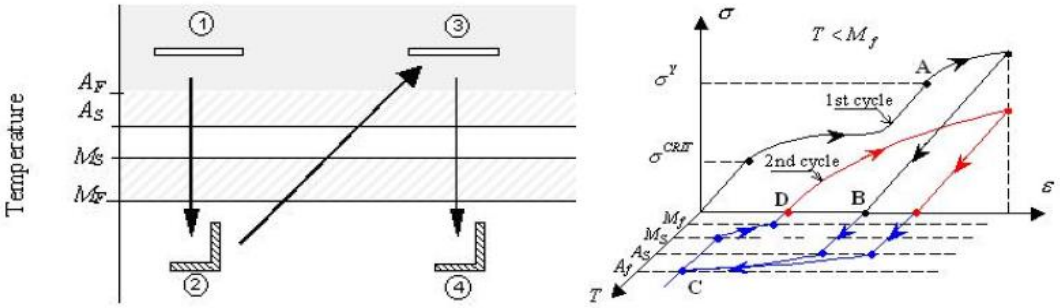
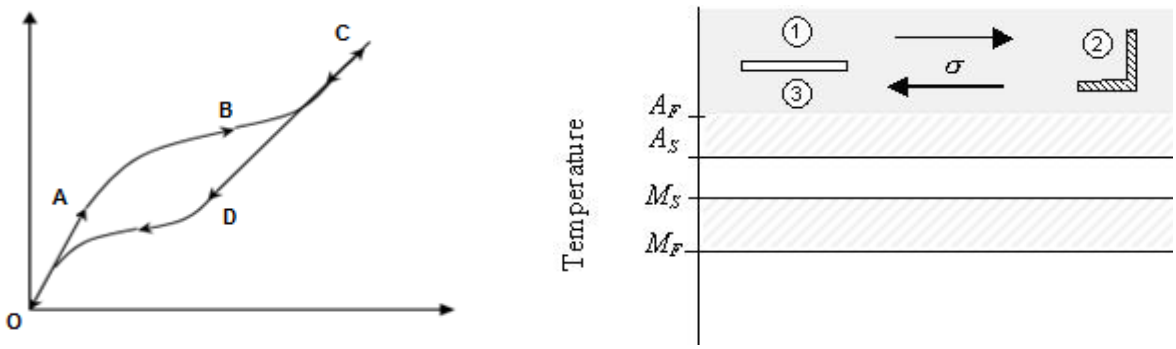


FIG.II.5: Efeito de memória de forma (TWSMA) e sua respectiva curva tensão-deformação-temperatura. (PAIVA e SAVI, 2006)

II.1.3 Pseudoelasticidade ou Superelasticidade

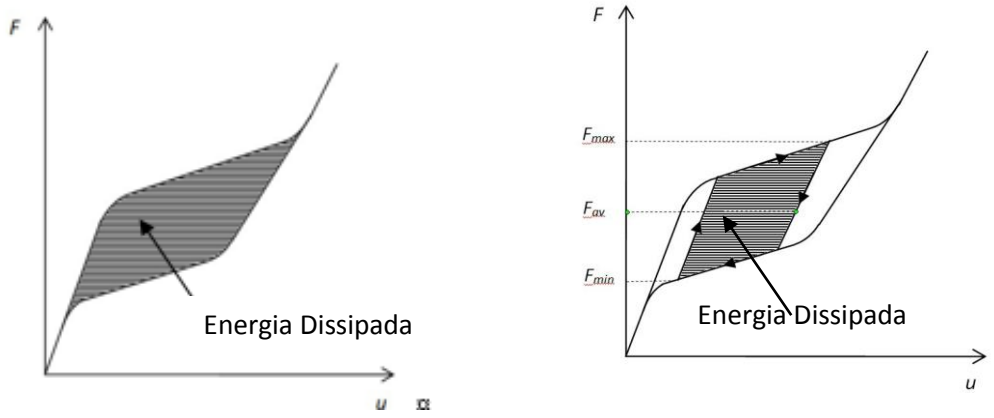
O efeito de pseudoelasticidade ocorre em altas temperaturas, acima da temperatura critica (A_f), onde a austenita é a única fase estável em um estado livre de tensões. A FIG.II.6(a) apresenta uma curva tensão-deformação para o efeito pseudoelástico a uma temperatura constante. No processo de carregamento, um comportamento linear (*AO*) é primeiramente observado, seguido por um comportamento não-linear (*AB*) associado à transformação de fase (austenita $\rightarrow$ martensita). Após o ponto *B*, a presença de 100% de fase martensítica revela um comportamento linear. No processo de descarregamento, um comportamento linear é observado até alcançar o ponto *C*. Após isso, um comportamento não-linear (*CD*) associado à transformação de fase (martensita $\rightarrow$ austenita) é observado, seguido por um comportamento linear associado à uma presença de 100% de austenita. FIG. II.6(b) apresenta um diagrama que ilustra o comportamento pseudoelástico.



(a) (b)

FIG. II.6: Efeito pseudoelástico. Curva tensão-deformação (a) e um diagrama que ilustra o efeito da pseudoelasticidade.(PEREIRA, 2009).

A histerese observada nas SMAs pode ser usada para dissipar energia, o que faz deles um material apropriado para aplicações de atenuação de vibração (AGUIAR *et al.*, 2012; ASGARIAN e MORADI, 2011; CASCIATI e FARAVELLI, 2009; DESROCHES e DELEMONT, 2002; FUGAZZA, 2003; JOHNSON *et al.*, 2008; LAGOUDAS, 2008; OZBULUT *et al.*, 2007, 2010; SAVI *et al.*, 2011; SHOOK et al., 2007; ZHANG *et al.*, 2008; ZUO e LI, 2011). Além disso, como a austenita e a martensita têm diferentes módulos de elasticidade, durante a transformação de fase a rigidez do elemento da SMA varia, o que afeta o comportamento dinâmico do sistema (PUGLIESE e CASEY, 2012). Devido a esse efeito combinado, os elementos pseudoelásticos podem ser utilizados como eficientes elementos mecânicos de atenuação de vibração. A FIG. II.7(a) apresenta uma curva tensão-deformação para um elemento de SMA sujeito a um carregamento axial, onde a área interna do laço de histerese representa o valor máximo de energia dissipada durante um ciclo de carregamento-descarregamento. A FIG. II.7(b) mostra um ciclo de carregamento onde ocorre oscilações entre os valores de carregamento máximos e mínimos ($F_{máx}$ e $F_{mín}$). A energia dissipada em cada ciclo é associada à área hachurada da FIG. II.7.



(a) (b)

FIG. II.7: Energia dissipada em elementos pseudoelásticos. (a) (b) energia dissipada em vibrações (HORA *et al.*, 2013).

II.2 Modelo Constitutivo

O comportamento termomecânico das SMAs pode ser descrito por diferentes modelos constitutivos. PAIVA e SAVI (2006) apresentam uma descrição geral dos diversos modelos constitutivos para SMAs. Dentre os modelos constitutivos disponíveis aplicados a análises numéricas baseadas no método de elementos finitos para análise do comportamento pseudoelástico de elementos de SMA, o modelo constitutivo proposto por AURICCHIO et al. (1997) tem bastante utilização, tendo sido implementado no pacote comercial ANSYS (ANSYS, 2012). Este modelo tridimensional é capaz de descrever o comportamento pseudoelástico e considera a presença de duas fases macroscópicas: austenita (*A*) e martensita (*M*). As variáveis internas ξ_A e ξ_M são introduzidas para representar, respectivamente, as frações de volume de austenita e martensita que satisfaçam a seguinte relação: $\xi_A + \xi_M = 1$. O material é considerado isotrópico e a transformação de fase obedece à função de escoamento Drucker-Prager. O comportamento elástico da austenita e martensita está relacionado com o módulo de elasticidade (*E*) e coeficiente de Poisson (ν). O processo de transformação de fase é controlado por quatro tensões críticas σ_s^{AM}, σ_f^{AM}, σ_s^{MA}, σ_f^{MA}, onde os subscritos "*s*" e "*f*"

são utilizados para descrever o "início" e "término", respectivamente dos processos de transformação de fase, e o sobrescrito "*AM*" representa a transformação de austenita em martensita, enquanto que o sobrescrito "*MA*" representa a transformação de martensita para austenita. ε_L representa um parâmetro associado à deformação recuperável resultante da transformação martensítica. A FIG II.8 apresenta uma curva de tensão-deformação unidimensional idealizada para o comportamento pseudoelástico para o modelo utilizado.

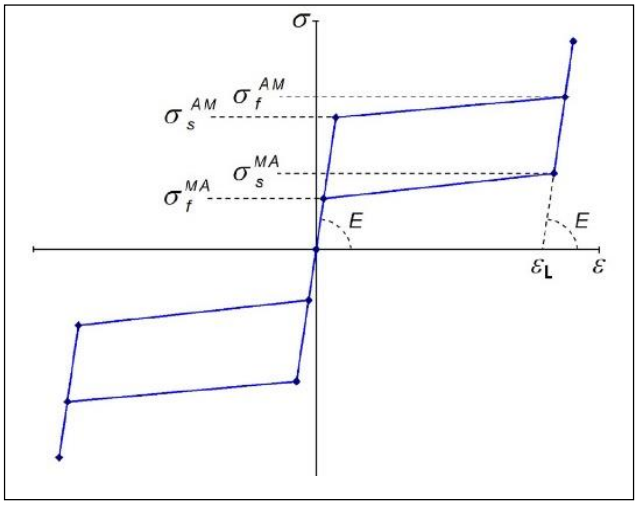


FIG. II.8: Curva tensão-deformação unidimensional ideal para um comportamento pseudoelástico. (AURICCHIO *et al.*, 1997).

É importante ressaltar que este modelo constitutivo utilizado não considera a diferença dos módulos de elasticidade para as fases estudadas: austenita e martensita. Portanto, o modelo não captura a mudança de rigidez esperada para o sistema analisado.

Dentro das considerações acima, as relações constitutivas são dadas por

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_{tr}) \qquad (1)$$

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{tr} = \dot{\xi}\, \varepsilon_L \frac{\partial P}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \qquad (2)$$

onde $\boldsymbol{\sigma}$ é o tensor de tensão, $\boldsymbol{\varepsilon}$ é o tensor de deformação total, **E** o tensor elástico, $\boldsymbol{\varepsilon}_{tr}$ é o tensor relacionado a deformação de transformação e ε_L é o parâmetro associado com a deformação recuperável associada à transformação martensítica.

Ainda, as seguintes relações definem as transformações de fase (AURICCHIO *et al.*, 1997):

$$\dot{\xi} = \begin{cases} -H^{AM}(1-\xi)\dfrac{\dot{P}}{P - R_f^{AM}} \\ H^{MA}\xi\dfrac{\dot{P}}{P - R_f^{MA}} \end{cases} \tag{3}$$

onde $R_f^{AM} = \sigma_f^{AM}(1+\alpha)$ $R_f^{MA} = \sigma_f^{MA}(1+\alpha)$.

Os parâmetros escalares H^{AM} e H^{MA} consideram as condições de ativação das transformações de fase e são definidos por:

$$H^{AM} = \begin{cases} 1 \; se \; R_s^{AM} < P < R_f^{AM} \; e \; \dot{P} > 0 \\ se\tilde{a}o \; 0 \end{cases} \tag{4}$$

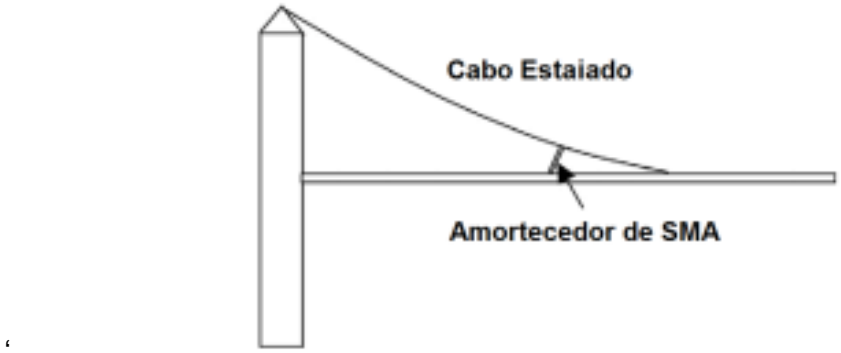
$$H^{MA} = \begin{cases} 1 \; se \; R_s^{MA} < P < R_f^{MA} \; e \; \dot{P} > 0 \\ se\tilde{a}o \; 0 \end{cases} \tag{5}$$

onde ξ é uma variável interna que representa a quantidade de martensita. *R* e α são parâmetros do material. Os subíndices *s* e *f* estão associados ao início e término da mudança de fase para um estado livre de tensões.

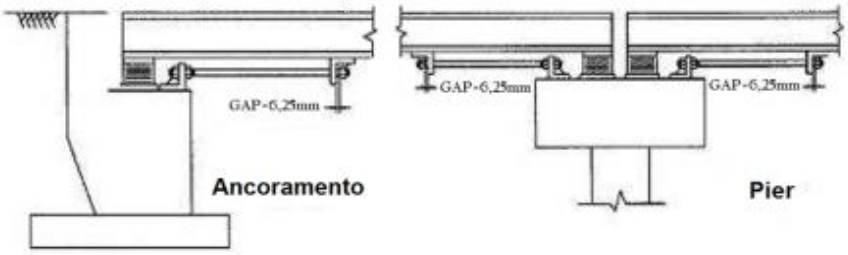
II.3 Aplicações e Estudos Utilizando SMA

As ligas com memória de forma são elementos mecânicos que podem ser utilizados em sistemas de atenuação de vibrações, devido à sua grande capacidade de dissipação de energia mecânica combinada à capacidade de alterar a rigidez do elemento, decorrente da diferença dos módulos de elasticidade para a austenita e martensita que pode chegar a duas vezes (ŠITTNER *et al.*, 2014). A seguir são apresentados alguns trabalhos e aplicações relativos à utilização do efeito de pseudoelasticidade das SMAs na redução de vibrações mecânicas.

Atuadores que restringem abalos sísmicos de aço são largamente empregados para limitar a abertura de juntas de pontes. Entretanto, em alguns terremotos se mostraram que esses dispositivos possuem limitações quanto à atenuação das vibrações sísmicas (PUGLIESE e CASEY, 2012). Uma alternativa é a utilização de SMAs nos dispositivos de limitação de movimento das juntas. Outra aplicação para o mesmo dispositivo é em pontes submetidas às vibrações induzidas por vento. A FIG II.9 mostra um exemplo de um atenuador de SMA para pontes estaiadas, utilizando cabos de SMA.



(a)



(b)

FIG. II.9: (a) Atenuador de SMA para ponte estaiada (PUGLIESE e CASEY, 2012), e (b)Dispositivo com cabos superelásticos de SMA para pontes (DESROCHES e DELEMONT, 2002).

(DEZFULI e ALAM, 2014) desenvolveram um estudo sobre duas novas gerações de acoplamentos inteligentes à base de borracha com incorporação de fios de SMA

(SMA-HDRB, sigla em inglês) utilizando o histórico de terremotos de Vancouver (Canadá). Devido ao efeito superelástico das SMAs, a deformação residual do dissipador a base de SMA é reduzida. Os resultados mostraram que o uso de fios de SMA com 13,5% de deformação na região superelástica leva a um melhor desempenho. O estudo mostrou que a configuração em forma de cruz proporciona dissipação de energia mais alta durante um terremoto. Dentre as conclusões do estudo, verificou-se que a utilização deste dispositivo no terremoto em Vancouver está associada a uma redução da aceleração do deck (parte suspensa da ponte onde se encontra a pista) que pode alcançar até 55%.

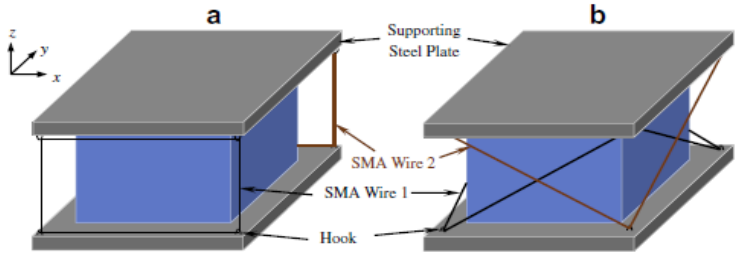


FIG. II.10: Acoplamento a base de borracha com fios de SMA (a) fios à 90 graus (b) fios em forma de cruz (DEZFULI e ALAM, 2014).

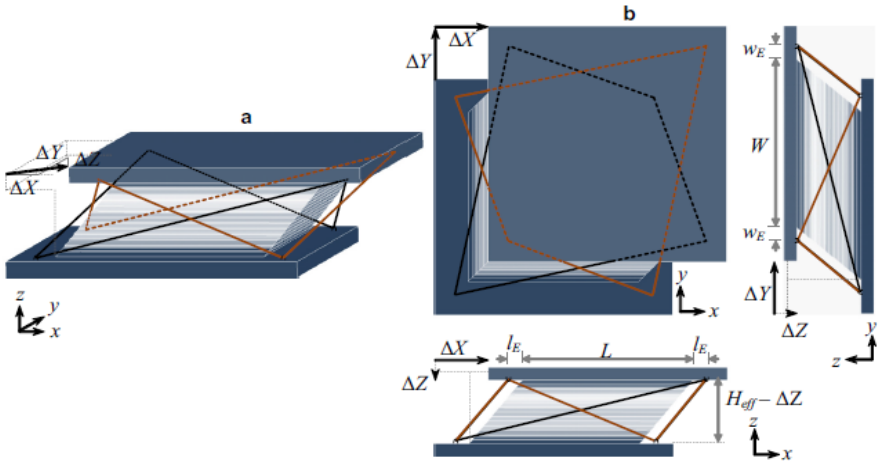


FIG. II.11: SMA-HDRB com configuração dos fios de SMA em forma de cruz dos fios sujeitos à carregamentos laterais: (a) vista em 3D, (b) Vistas ortográficas (topo, frontal e lateral

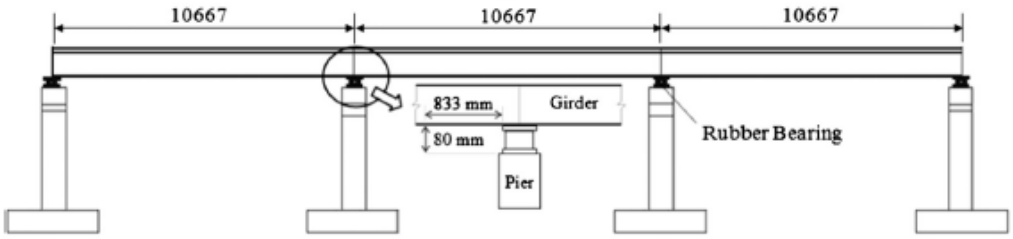
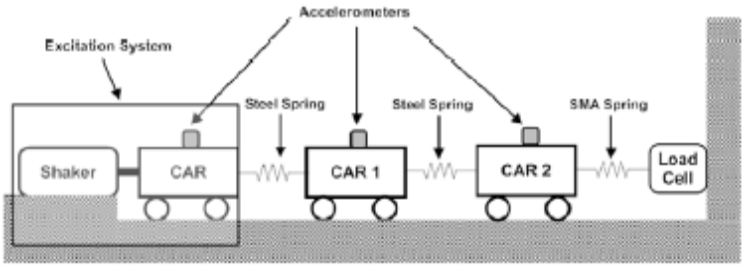


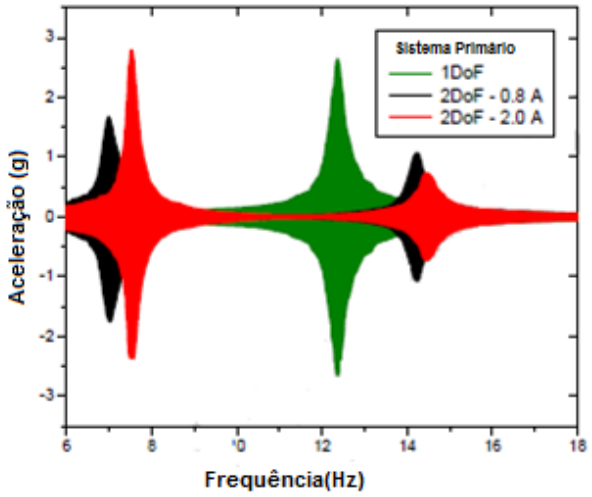
FIG. II.12: Disposição do aparato na estrutura analisada

(DEZFULI e ALAM, 2014)

AGUIAR *et al.* (2012) desenvolveram um aparato com dois graus de liberdade (2DOF) composto por carros livres para se movimentar por trilhos, um dispositivo elétrico capaz de controlar a variação de temperatura da mola de SMA, e um “shaker” para prover uma excitação do sistema. A FIG II.13(b) apresenta o gráfico de aceleração para um e dois graus de liberdade em função da variação de corrente elétrica: 0,8 e 2,0A. Esse resultado mostra como a mudança de temperatura altera a resposta do sistema, conferindo uma característica adaptativa.



(a)



(b)

FIG. II.13: Aparato experimental de um absorvedor dinâmico de vibrações (a), e (b): Variação do comportamento do sistema em função da variação de corrente elétrica (AGUIAR *et al.*, 2012)

Capítulo III – Barras Axiais e Barras de Torção Pseudoelásticas

As ligas de memória de forma vêm sendo utilizadas como elementos atenuadores de vibrações em função de sua capacidade de dissipar energia. A capacidade está diretamente associada ao processo de transformação de fase devido a um comportamento histerético. Além disso, as características dinâmicas dos atenuadores podem ser ajustadas variando a temperatura e/ou tensão no elemento, de modo a induzir transformações de fase que vão modificar a rigidez através da alteração do módulo de elasticidade (AGUIAR, 2011).

Barras axiais e barras de torção são elementos normalmente utilizados em diversos sistemas como suspensões automotivas e base de equipamentos. Usualmente, utilizam-se materiais convencionais como o aço e a função das barras é alterar as frequências naturais do sistema, alterando a rigidez do sistema. Elementos pseudoelásticos podem representar soluções interessantes para redução de vibrações permitindo que se explore as características das SMAs.

III.1 – Modelo de Elementos Finitos

Neste capítulo apresenta-se um estudo utilizando modelos numéricos tridimensionais baseados no método de elementos finitos para avaliar a capacidade de dissipação de barras axiais e barras de torção pseudoelásticas. Os modelos foram desenvolvidos utilizando o pacote computacional de elementos finitos ANSYS (2012) e utilizam o elemento PLANE 186 para discretização espacial. Este elemento possui 20 nós e a capacidade para descrever o comportamento pseudoelástico através da incorporação do modelo constitutivo de AURICCHIO *et al.* (1997) descrito no capítulo anterior, que considerada a presença de duas fases macroscópicas (austenita e martensita). A análise considera a presença de grandes deslocamentos. A incorporação dos efeitos de não-linearidade geométrica nas análises é feita através da ativação do comando NLGEOM dos ANSYS (2012). O modelo é aplicado ao estudo de barras cilíndricas sob carregamentos axiais e torcionais. Algumas condições são analisadas

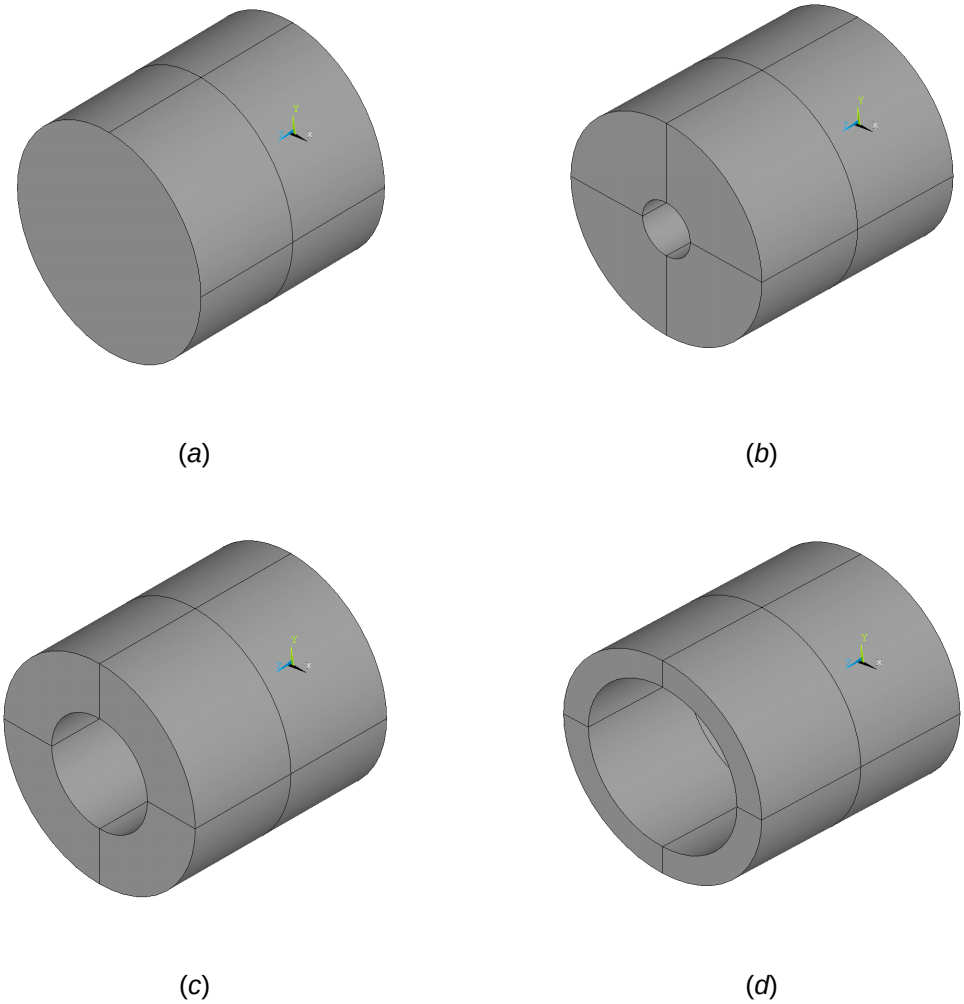
com o modelo proposto a fim de obter a capacidade de dissipação de energia de elementos pseudoelásticos de SMA. As simulações numéricas desenvolvidas consideram as propriedades listadas na TABELA III.1, descritas no capítulo anterior, com exceção de S_y que representa o limite de escoamento do material. O modelo de AURICCHIO *et al.* (1997) não considera a diferença entre os módulos de elasticidade para a martensita e austenita. Nas simulações desenvolvidas considera-se o módulo de elasticidade da austenita.

TABELA III.1: Propriedades mecânicas da SMA (RIAGUSOFF, 2012)

Propriedades Mecânicas	**Valor**
E (GPa)	45
ν	0,30
σ_s^{AM} (MPa)	620
σ_f^{AM} (MPa)	750
σ_s^{MA} (MPa)	200
σ_f^{MA} (MPa)	100
S_y (GPa)	1,6
ε_L	0,07

As FIGS. III.1 e III.2 apresentam, respectivamente, as geometrias e as malhas obtidas após uma análise de convergência, para quatro elementos de SMA analisados: uma barra cilíndrica cheia e três vazadas (com as seguintes razões de raio externo e raio interno R_i /R_e = 0,25, 0,5 e 0,75) submetidas a carregamentos axiais e de torção. Todos os cilindros têm um diâmetro externo e comprimento 5 mm. Para o carregamento axial, considera-se um carregamento de pressão aplicado em uma das extremidades, enquanto a outra apresenta a prescrição de deslocamento nulo em todos os graus de liberdade. Para o carregamento de torção, um momento torçor é aplicado em uma das extremidades, enquanto a outra extremidade possui prescrição de deslocamento nulo

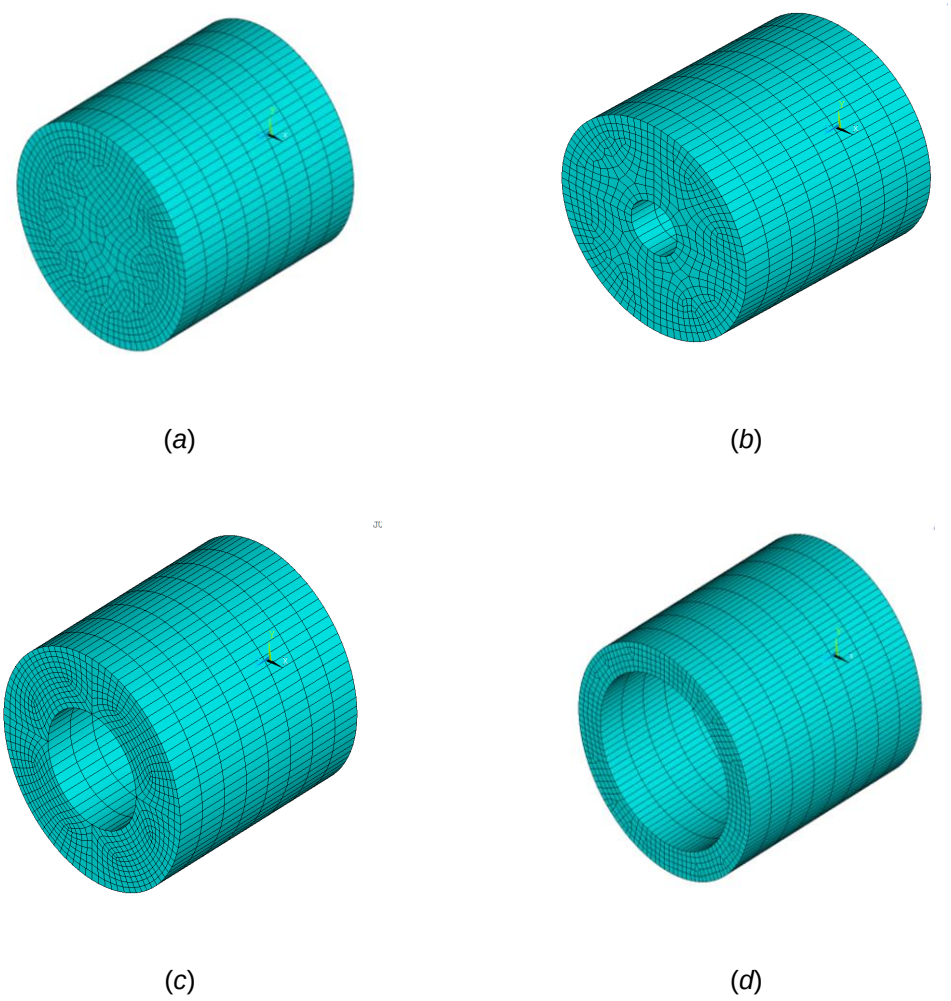
em todos os graus de liberdade. As variáveis são analisadas em uma seção central do cilindro a fim de evitar os efeitos da aplicação do carregamento mecânico e das condições de contorno prescritas nas extremidades dos cilindros.



(*a*) (*b*)

(*c*) (*d*)

FIG. III.1: Geometria analisada: (a) barra cilíndrica, (b) barra cilíndrica vazada R_i / R_e = 0,25, (c) barra cilíndrica vazada R_i / R_e = 0,50, (d) barra cilíndrica vazada R_i / R_e = 0,75.



(*a*) (*b*)

(*c*) (*d*)

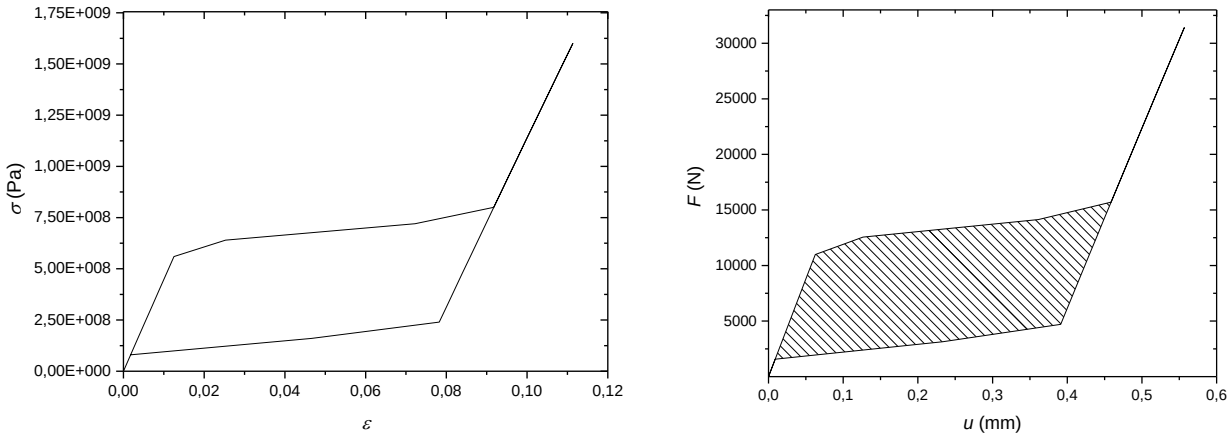
FIG.III.2: Malha das geometrias analisadas: (a) barra cilíndrica, (b) barra cilíndrica vazada R_i / R_e = 0,25, (c) barra cilíndrica vazada R_i / R_e = 0,50, (d) barra cilíndrica vazada R_i / R_e = 0,75

III.2 Resultados Numéricos

Para permitir uma comparação direta de desempenho entre as geometrias estudadas, todas as barras são submetidas a carregamentos mecânicos (axial e de torção) que promovem uma tensão máxima equivalente de *von Mises* de 1,6 GPa. Este valor é considerado uma tensão limite, sendo inferior ao limite de escoamento do material, evitando que o material desenvolva deformação plástica.

As barras uniformes submetidas a carregamentos axiais são eficientes elementos de absorção de energia quando experimentam um estado uniaxial de tensão,

uma vez que, considerando-se que ocorre uma distribuição homogênea da tensão e da transformação de fase e desprezando-se efeitos de extremidades, toda a barra experimenta o mesmo ciclo completo de histerese. Essa condição é associada a uma densidade teórica máxima de absorção de energia que pode ser estimada através de uma integração da curva tensão-deformação da histerese do material pseudoelástico. A FIG III.3 apresenta as curvas tensão (σ) versus deformação (ε) e carregamento (F) versus deslocamento (u) obtidas através de simulação numérica da barra cilíndrica submetida a carregamentos axiais para a barra de seção cheia. Os resultados envolvem um ciclo completo de carregamento seguido de descarregamento. Resultados similares são obtidos para as outras três geometrias das barras vazadas submetidas a carregamentos axiais. A curva da histerese do material pseudoelástico é apresentada na FIG III.3*b* hachurada e tem uma área igual a 39,2 J/m^3.

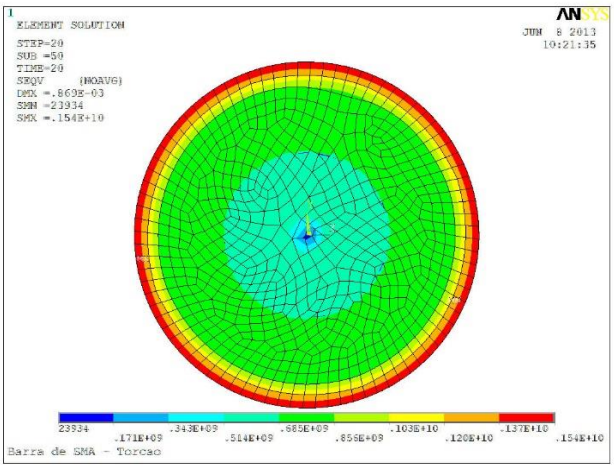


(*a*) (*b*)

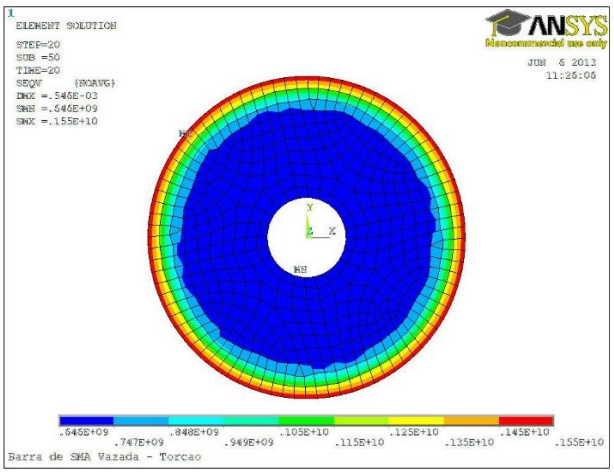
FIG.III.3: Curva tensão-deformação (a) e força-deslocamento (b) para carregamentos axiais

Agora o carregamento de torção é considerado para as quatro geometrias descritas na FIG.III.4. A FIG.III.5 mostra a distribuição da tensão equivalente de *von Mises*, enquanto a FIG.III.6 mostra a distribuição volumétrica da fração de fase martensítica, no instante da aplicação do carregamento máximo. Neste contexto, o carregamento de torção promove uma distribuição de tensões de cisalhamento

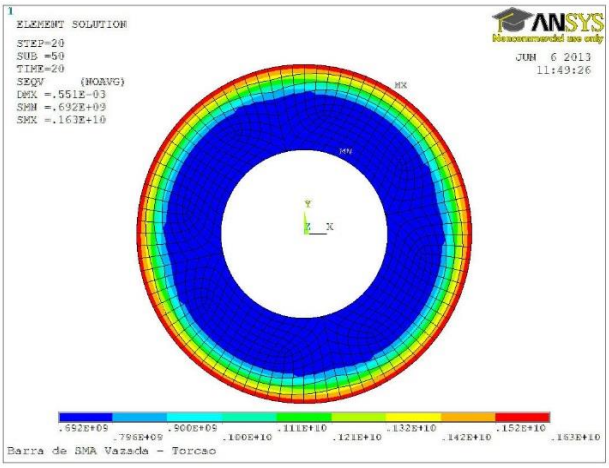
circunferencial com valor nulo no centro e máximo na superfície. Assim, os valores máximos de tensão equivalente de *von Mises* e de distribuição volumétrica de fase de martensita ocorrem na superfície.



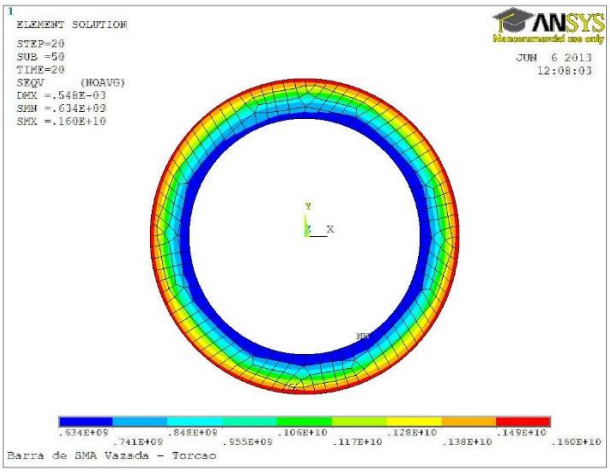
(*a*)



(*b*)

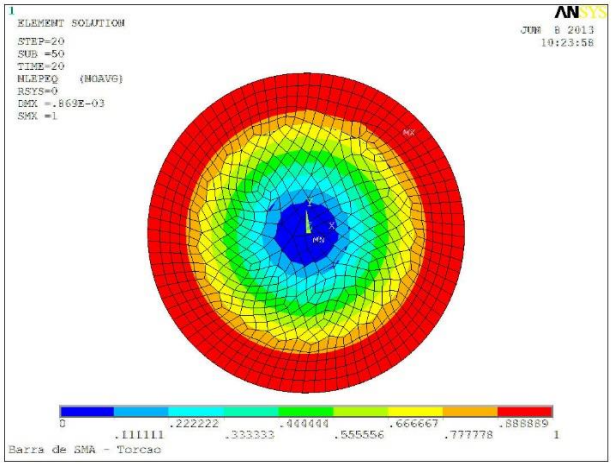


(c)

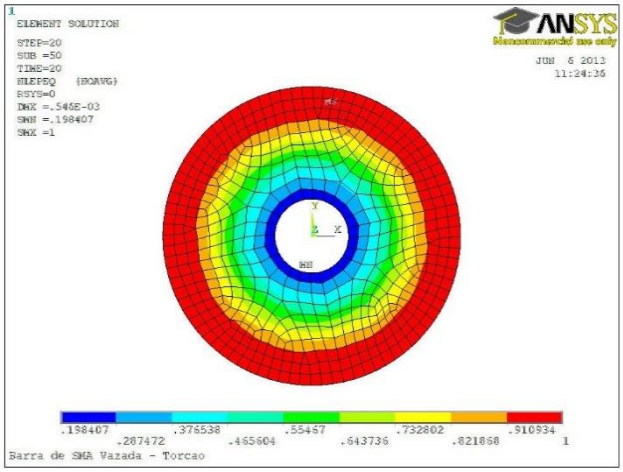


(d)

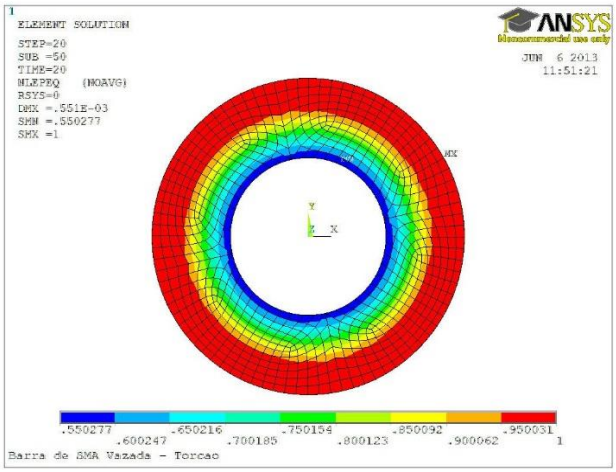
FIG III.5: Distribuição da tensão equivalente de *von Mises*: (a) barra cilíndrica, (b) barra cilíndrica vazada R_i / R_e = 0,25, (c) barra cilíndrica vazada R_i / R_e = 0,50, (d) barra cilíndrica vazada R_i / R_e = 0,75



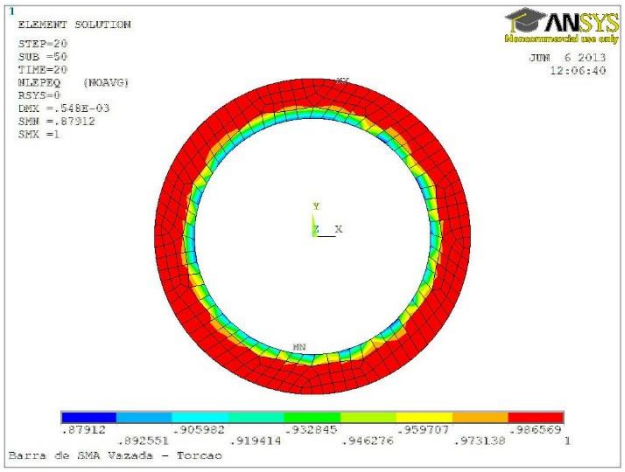
(*a*)



(*b*)



(*c*)

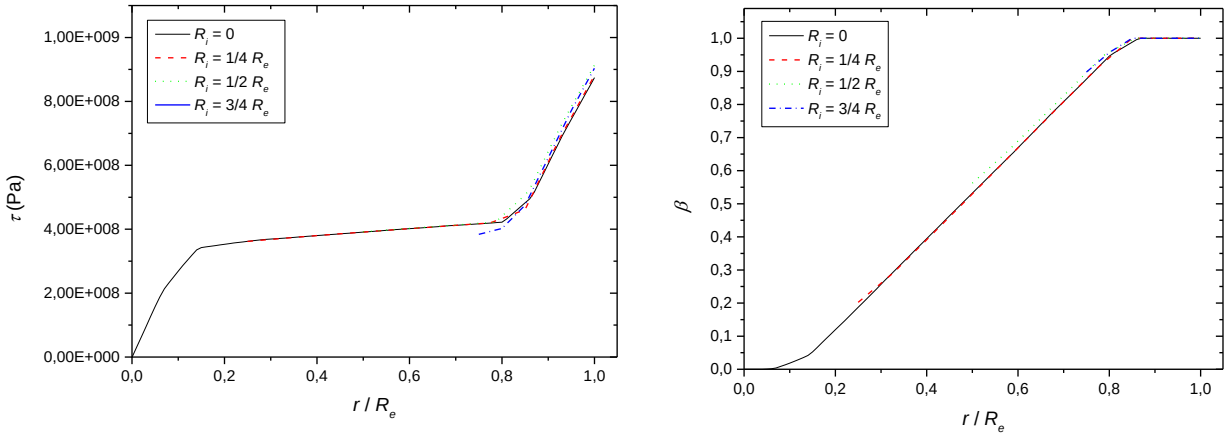


(*d*)

FIG.III.6: Distribuição da fração volumétrica de fase martensítica (a) barra cilíndrica, (b) barra cilíndrica vazada R_i / R_e = 0,25, (c) barra cilíndrica vazada R_i / R_e = 0,50, (d) barra cilíndrica vazada R_i / R_e = 0,75

A FIG.III.7 mostra a tensão de cisalhamento e a fração volumétrica de fase martensítica na seção transversal em função do raio (*r*) para os quatro cilindros, no instante da aplicação do carregamento máximo. Como previsto, os resultados mostram que distribuições similares são obtidas e a região central experimenta baixa tensão e baixos valores de fração volumétrica de fase martensítica. Dessa forma, essa região central apresenta uma baixa contribuição para dissipação de energia. Para cilindro com

a razão igual a Ri / Re = 0,75, quase toda sua região apresenta um valor da fração volumétrica de fase martensítica próxima a 100% (entre 87,9 e 100%).



(*a*) (*b*)

FIG.III.7: Distribuição de tensão de cisalhamento (a) e (b) distribuição de fração volumétrica de fase martensitica na seção transversal

A FIG.III.8 apresenta a curva torque (*T*) versus o ângulo de torção (*Θ*) para as quatro geometrias diferentes de barras cilíndricas submetidas a um carregamento de torção, envolvendo as etapas de carregamento e descarregamento. A área interna hachurada representa o laço de histerese e está associada à energia dissipada em cada ciclo de carregamento-descarregamento. O torque aplicado diminuiu de 18 N.m para aproximadamente 12 N.m. As respectivas áreas hachuradas também diminuem, indicando uma redução da energia dissipada.

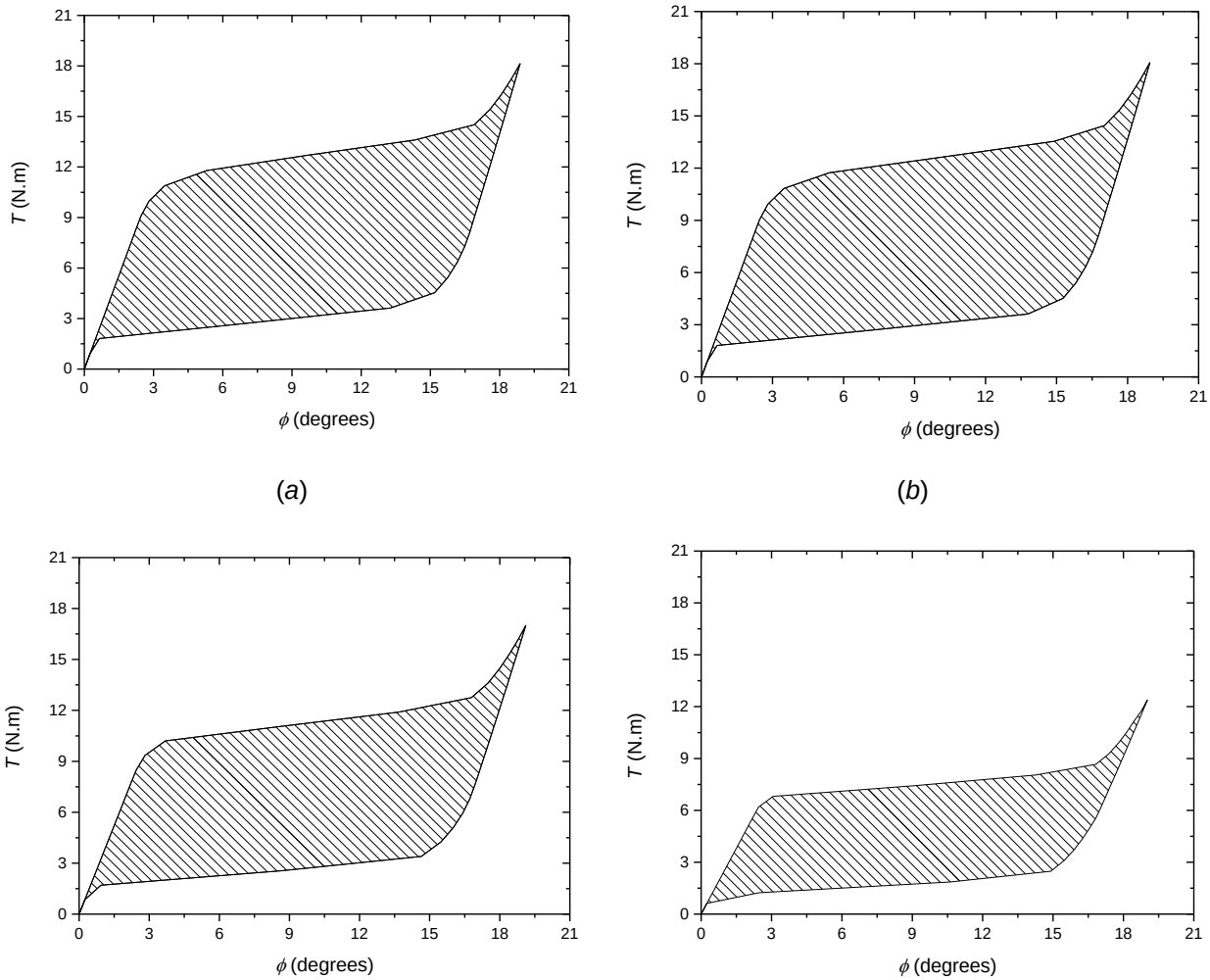


FIG.III.8: Curva torque versus ângulo: (a) barra cilíndrica cheia, (b) barra cilíndrica vazada Ri / Re = 0,25, (c) barra cilíndrica vazada Ri / Re = 0,50, (d) barra cilíndrica vazada Ri / Re = 0,75.

A TABELA IV.1 apresenta a energia de dissipação, volume e densidade de dissipação para os quartos cilindros. Na FIG.III.9, a informação associada aos quatro cilindros é normalizada para seção transversal cilíndrica cheia. Os resultados mostram que quando o raio interno do cilindro aumenta, a energia de dissipação e o volume diminuem. No entanto, a densidade de energia dissipada (energia/volume) aumenta, indicando que os cilindros vazados são mais eficientes para absorver energia (R_i / R_e = 0,50 a R_i / R_e = 0,75) e é observado que a energia de dissipação é igual a 38,1%. Assim, a redução da massa é maior do que a redução da energia dissipada.

TABELA IV.1. A energia de dissipação, volume e densidade de dissipação de energia para cilindros submetidos a carregamento torsional.

Geometria do cilindro (R_i/R_e)	**Energia de Dissipação (J)**	**Volume (mm^3)**	**Densidade de Energia de Dissipação (J/m^3)**
0	144,7	98,0	25,7
0,25	144,2	92,0	27,3
0,50	131,6	73,6	31,2
0,75	87,5	43,0	35,5

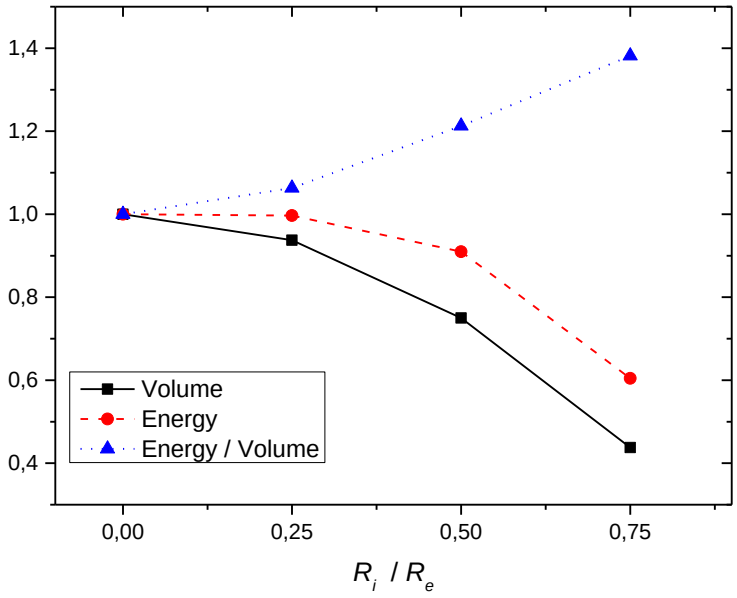


FIG.III.9: Valores normalizados para carregamento de torção de barras cilíndricas. Influência do diâmetro do furo.

A FIG.III.10 apresenta um resumo das densidades de dissipação de energia para todos os casos analisados envolvendo as 4 geometrias analisadas submetidas a carregamentos axiais e torcionais. O carregamento axial apresenta o máximo de energia dissipada pelo fato de toda a seção transversal experimentar a transformação de fase a cada ciclo. Os cilindros submetidos ao carregamento de torção apresentam uma transformação de fase máxima na superfície e o centro apresenta uma baixa contribuição devido aos baixos valores de transformação de fase obtidos nessa região.

Conforme indica a Figura III.8, a remoção região central contribui para reduzir o peso do elemento e aumentar a densidade de dissipação de energia. Dessa forma, em relação à utilização de barras de torção, cilindros vazados submetidos a carregamentos de torção podem ser considerados eficientes elementos dissipadores de energia.

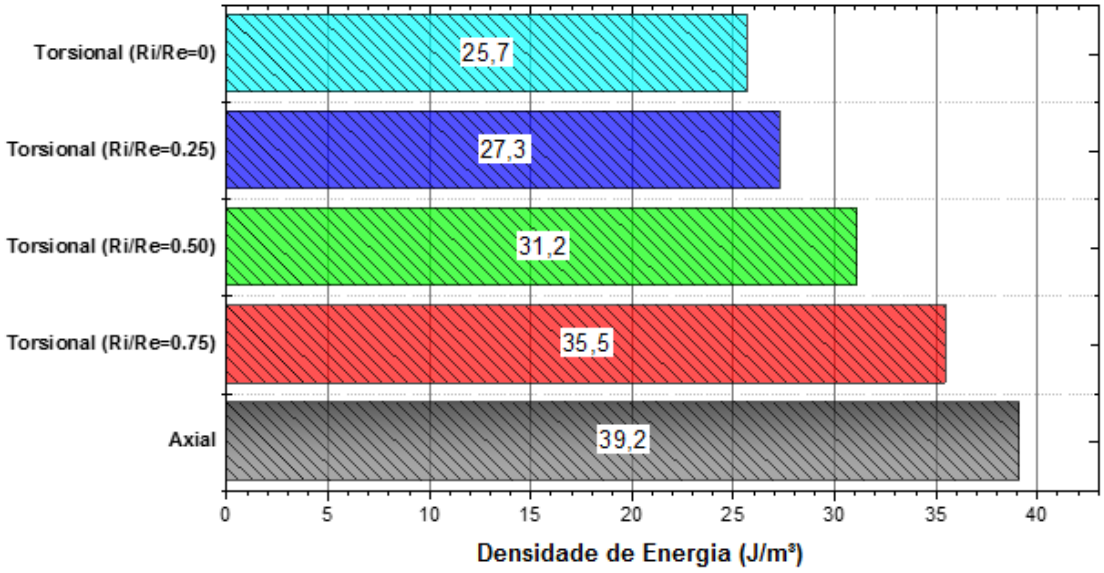


FIG.III.10: Densidade de dissipação de energia para os casos analisados. Barras Axiais e Barras de Torção.

Capítulo IV – Molas Helicoidais Pseudoelásticas

Assim como as barras axiais e as barras de torção, as molas helicoidais são normalmente utilizadas como elementos para redução de vibrações. Molas de materiais convencionais como o aço são incorporadas a sistemas mecânicos para definir as características desejadas de projeto.

As molas helicoidais caracterizam-se por apresentar deslocamentos relativamente grandes em comparação a elementos como barras axiais, sem que o limite de escoamento do material seja ultrapassado (SCHMID *et al.*, 1999). Elas são utilizadas em uma grande gama de aplicações, tais como: (i) armazenamento de energia, como por exemplo, nos mecanismos de relógios, de brinquedos; (ii) amortecimento de choques, como por exemplo, as molas da suspensão dos automóveis; (iii) distribuição de cargas, como por exemplo, o colchão de molas; e (iv) preservação de junções ou contatos, usados em sistemas de cames onde mantém o rolete sobre a superfície do came.

Este capítulo apresenta uma análise numérica e experimental de molas helicoidais com memória de forma. Apresenta-se inicialmente uma análise do comportamento linear das molas helicoidais, expondo as principais equações e relações geométricas desse tipo elemento de máquinas.

IV.1 - Molas Helicoidais de Material Linear-Elástico

Para fins de calibração das análises experimentais e numéricas é realizado um estudo sobre as molas helicoidais clássicas utilizadas em aplicações regulares. Essas molas operam em um regime linear elástico e apresentam uma distribuição linear da tensão de cisalhamento na seção transversal do fio (SHIGLEY *et al.*, 2007).

A FIG. IV.1(*a)* mostra uma mola helicoidal de compressão de fio com seção transversal circular carregada por uma força *F*. Denomina-se *D* o diâmetro médio da espira e *d* o diâmetro do fio. A FIG.IV.1(*b)* mostra os esforços internos presentes em

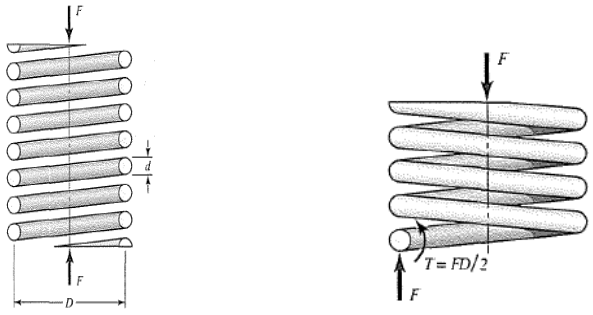
uma seção transversal do fio da mola que são compostos por uma força de cortante *F* e um momento torçor $T = \frac{FD}{2}$ (SHIGLEY *et al.*, 2007).

A distribuição da tensão de cisalhamento na seção transversal do fio pode ser calculada pela superposição da tensão de cisalhamento causada pelo esforço cortante ($\tau = \frac{F}{A}$) com a tensão de cisalhamento causada pelo esforço de torção ($\tau = \frac{Tr}{J}$):

$$\tau(r) = \frac{Tr}{J} + \frac{F}{A} \tag{6}$$

onde *r* representa a distância radial ao centroide da seção, *J* o momento polar de inércia e *A* a área da seção transversal do fio. O valor da tensão de cisalhamento máxima, $\tau_{máx}$, ocorre na superfície e pode ser obtida substituindo-se *r* por *d*/2:

$$\tau_{máx} = \frac{8FD}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2} \tag{7}$$



(a) (b)

FIG.IV.1: Mola Helicoidal carregada longitudinalmente; (b) diagrama de corpo livre mostrando que o fio está sujeito a um cisalhamento direto e a um cisalhamento de torção (SHIGLEY *et al.*, 2007)

A relação entre o diâmetro médio da espira da mola (*D*) e o diâmetro do fio (*d*) é chamada de Índice de Mola (*C*). Esse valor indica o quanto o fio deve ser curvado para

formar o diâmetro médio da espira *D*. Fios com menores índices de mola têm maiores curvaturas. A curvatura em uma mola promove o aumento das tensões que estariam presentes em um fio reto. Os fios têm maior rigidez no lado interno do que no lado externo, já que o comprimento a ser torcido é menor internamente. Dessa forma, o aumento da rigidez causa um aumento da tensão e assim, a composição do aumento da rigidez com o fato de que as tensões devidas aos esforços se somam no lado interno dos fios é levada em conta através do fator de Wahl. Para solicitação estática, o fator k_s, que é o fator de correção de tensão de cisalhamento, deve ser usado (SHIGLEY *et al.*, 2007).

$$ks = \frac{2C + 1}{2C} \tag{8}$$

Dessa forma, o valor da deflexão longitudinal (δ) de uma mola helicoidal sob ação de uma força longitudinal *F* é função do número de espiras ativas, *N*, é dado por:

$$\delta = \frac{8D^3N}{d^4G}\, F\left(1 + \frac{1}{2C^2}\right) \tag{9}$$

onde *G* é o módulo de cisalhamento do material, dado por:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \tag{10}$$

sendo *E* é o módulo de elasticidade e ν é o coeficiente de Poisson. Note que a expressão da Eq. 9 não considera efeitos de não-linearidade geométrica, importantes neste tipo de elemento que pode experimentar deslocamentos elevados.

A rigidez de uma mola elástica é representada por:

$$k = \frac{Gd^4}{8D^3N\left(1 + \frac{1}{2C^2}\right)} \tag{11}$$

IV.1.1. Efeito da Curvatura

O projeto de molas helicoidais normalmente utiliza uma abordagem simplificada que não considera efeitos não-lineares presentes nas molas helicoidais, apresentando resultados confiáveis para a maioria das aplicações de engenharia. No entanto, diversos autores (ANCKER JR; GOODIER, 1958; WAHL, 1944) desenvolveram abordagens mais precisas que consideram a presença desses efeitos. Um desses efeitos é a curvatura do fio da mola. Sabe-se que, devido ao efeito de curvatura do fio da mola, a distribuição da tensão de cisalhamento ao longo da seção transversal da mola não é axissimétrica. A Fig IV.2 apresenta diagramas da distribuição da tensão de cisalhamento na seção transversal do fio da mola considerando os esforços internos envolvidos e o efeito da curvatura do fio da mola.

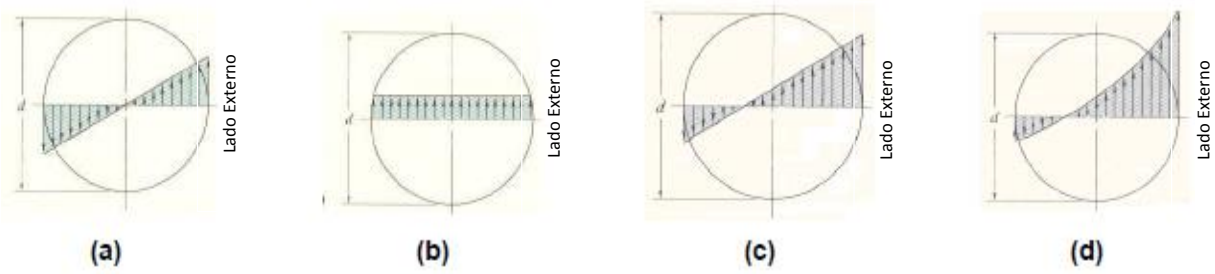
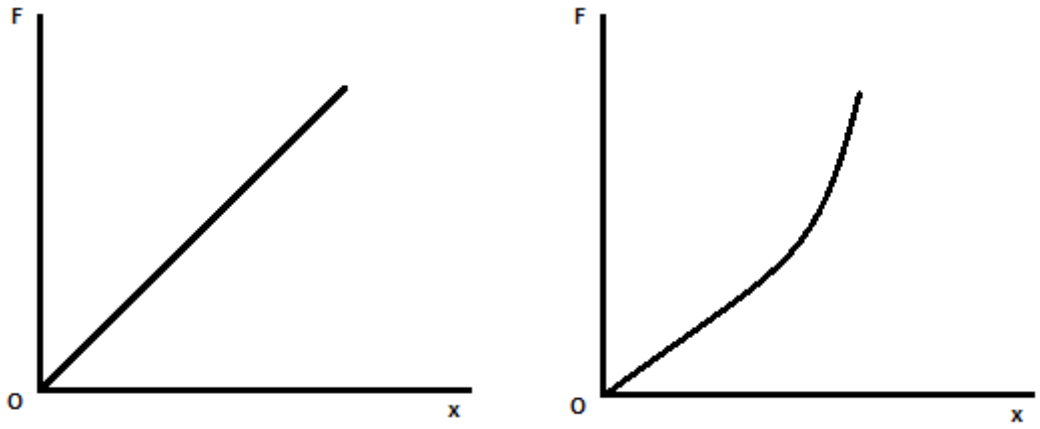


FIG.IV.2: Distribuição da tensão de cisalhamento na seção transversal de um fio da mola em função dos esforços envolvidos. Sem efeitos da curvatura: (a) momento torçor, (b) esforço cortante, (c) momento torçor e esforço cortante. Com efeitos da curvatura: (d) momento torçor e esforço cortante (WAHL, 1944).

A correção da curvatura é importante para molas helicoidais com índices de mola elevados e passos angulares pequenos (WAHL, 1944).

IV.1.2. Efeito da Não-Linearidade Geométrica

Dependendo da faixa de operação, as molas de um material linear-elástico podem apresentar um comportamento não-linear. Deste modo, diz-se que as molas possuem um comportamento linear quando a sua deformação é diretamente proporcional à carga aplicada. O fenômeno similar a um “endurecimento” pode ser observado em molas elásticas, na qual à medida que aumenta a solicitação, a rigidez também aumenta. A FIG.IV.3 apresenta os dois tipos de comportamentos.



(a) (b)

FIG.IV.3: Tipos de comportamentos das molas: (a) mola linear e (b) mola não-linear com fenômeno similar a um “endurecimento”.

As molas helicoidais apresentam um comportamento linear para faixas envolvendo baixos níveis de deflexão e um comportamento não-linear com endurecimento para o caso de deflexões elevadas. Esta mudança de comportamento está associada à alteração da geometria original da mola que tende de uma configuração de uma helicoide para uma configuração de um fio reto. Nesse sentido, ao longo das análises realizadas no presente trabalho com molas helicoidais pseudoelásticas, os efeitos dos grandes deslocamentos serão considerados na modelagem numérica.

IV.2. Análise Experimental

Ensaios experimentais foram desenvolvidos com molas helicoidais de SMA aplicando carregamentos cíclicos de deslocamento prescrito. As molas de NiTi foram fabricadas a partir de um mesmo fio austenítico 1,7 milímetros de diâmetro. O processo de fabricação consiste em uma fase de conformação mecânica, seguida por um processo de tratamento térmico do fio enrolado para manter as características austeníticas e a forma desejada à temperatura ambiente. O sistema de fixação de mola desenvolvido está representado na FIG.IV.4(a).

Em primeiro lugar, o fio é enrolado em uma barra de fuso com um diâmetro de 5/8 polegada utilizando um torno mecânico (FIG. IV.5(b)). Um furo radial de 2 mm na barra de parafuso é usado para fixar a extremidade do fio. Para evitar o desenrolamento e manter a mola com a forma desejada, uma luva de aço é posicionada sobre a mola em espiral e o sistema é preso através de duas porcas no parafuso nas extremidades da barra. O conjunto permanece durante 40 minutos em um forno pré-aquecido a uma temperatura de 530 °C. Após este período de tempo o conjunto é resfriado em água agitada. A mola helicoidal de SMA, produto final do processo, mostrada na FIG.IV.5 (d) após a têmpera em água, tem as seguintes dimensões: (i) diâmetro da mola de 15 mm, (ii) passo de 4 mm, 6 espiras ativas e o comprimento total de 23 mm.



(a)



(b)



(c)



(d)

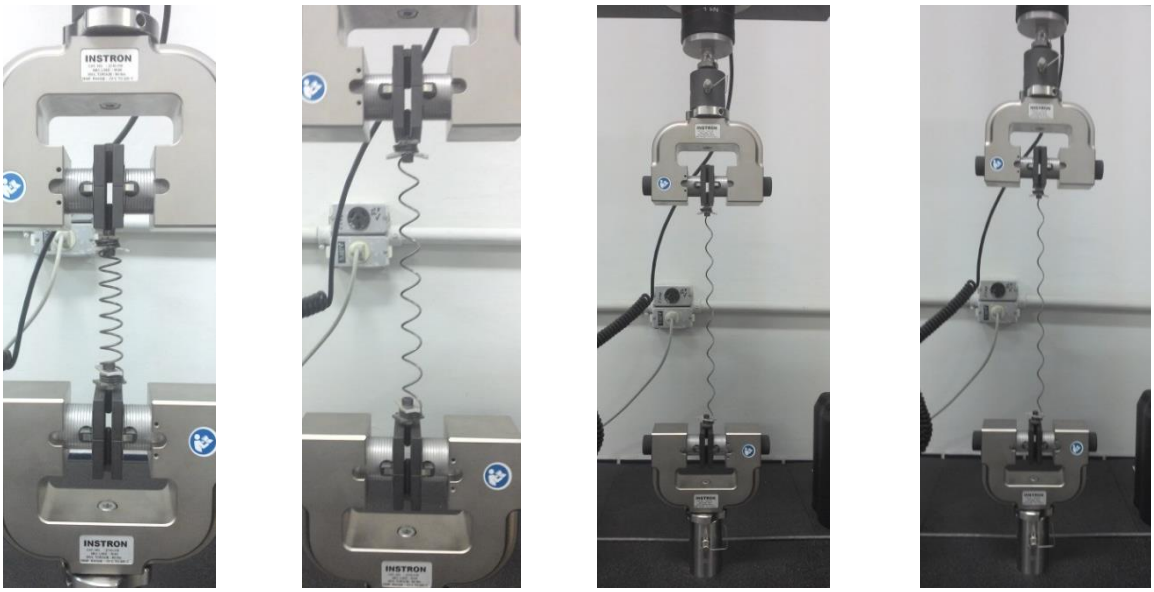
FIG.IV.4: Processo de confecção de uma mola helicoidal pseudoelástica de SMA. Sistema de Fixação da mola (a), sistema após o tratamento térmico (b), montagem do fio de SMA sobre o parafuso (c) e a mola helicoidal obtida

Ensaios de tração cíclicos com deslocamento prescrito foram desenvolvidos utilizando um sistema de teste da Instron 5966 com 10 kN capacidade, equipado com uma célula de carga de 1 kN para caracterizar o comportamento pseudoelástico das molas helicoidais. O deslocamento de carga prescrita varia de um valor próximo a zero (suficiente para garantir que a mola permaneça em tração) para um valor máximo de deslocamento utilizando uma onda de forma triangular com uma taxa de carregamento de 50 mm/min. Nove amplitudes de deslocamento são consideradas: 15, 30, 40, 60, 80, 120, 160, 200 e 280 mm. A FIG. IV.6 mostra os ensaios para quatro condições de carga na sua extensão máxima. Para obtenção dessas curvas foram realizadas foi realizado o treinamento da mola até sua estabilização. Em seguida, foram realizados 5 (cinco)

ciclos de carregamento e deslocamento para cada amplitude de deslocamento supracitado.

A FIG.IV.5 mostra que as molas pseudoelásticas podem atingir deslocamentos bastante elevados quando comparados ao comprimento inicial da mola, sem desenvolver deformação permanente. Para a maior amplitude de deslocamento testada na mola helicoidal de SMA o deslocamento máximo atingiu aproximadamente 12 vezes o seu comprimento inicial. Para deslocamentos maiores, a mola altera consideravelmente da forma inicial de uma helicoide para uma forma próxima à de um fio reto. Durante a deformação da mola helicoidal, a transformação de fase de austenita para martensita ocorre e dois efeitos concorrentes estão presentes simultaneamente: um aumento da rigidez do elemento devido ao efeito da não-linearidade geométrica (mudança de uma geometria de uma forma de uma helicoide para uma forma próxima à de um fio reto) e uma redução da rigidez devido à transformação martensítica (devido ao fato da martensita apresentar um módulo de elasticidade inferior ao da austenita).

A FIG.IV.6 mostra as curvas força-deslocamento para as nove condições de carregamento analisadas. Os resultados mostram que a área dentro do ciclo de histerese cresce consideravelmente para deslocamentos maiores. Para uma mola, que opera num ciclo de carregamento e descarregamento, esta área está associada com a energia dissipada em cada ciclo.



(a) (b) (c) (d)

FIG.IV.5: Testes cíclicos com carregamento máximo com (a) 40 (b) 120 (c) 200 e (d) 280mm

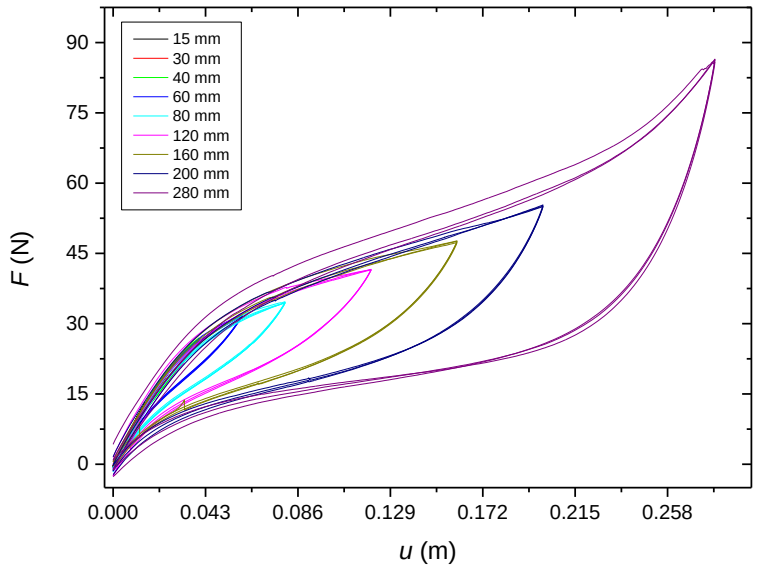


FIG.IV.6: Curvas força *versus* deslocamento para as nove condições de carregamento estudadas

IV.2 - Modelo de Elementos Finitos

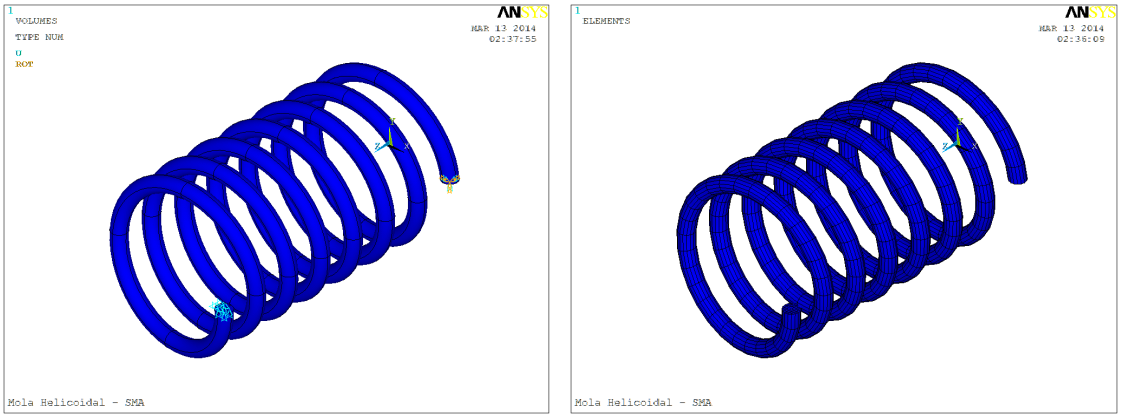
O modelo de elementos finitos tridimensional e o modelo constitutivo pseudoelástico, descrito no capítulo anterior, foram utilizados para estudar o comportamento das molas helicoidais de SMA pseudoelásticas submetidas a carregamentos axiais, sendo considerada a hipótese de grandes deslocamentos. As simulações numéricas foram realizadas com o código comercial de Elementos Finitos ANSYS (ANSYS 2012), empregando o elemento SOLID 186 para discretização espacial. É um elemento tridimensional com 20 nós que possui a capacidade de descrever o comportamento pseudoelástico através da incorporação do modelo constitutivo de AURICCHIO *et al.* (1997). As simulações numéricas apresentadas consideram componentes mecânicos com as propriedades dos materiais representados na TABELA IV.2. As propriedades foram ajustadas utilizando os dados experimentais descritos na seção anterior.

TABELA IV.2. Propriedades da Liga de Memória de Forma.

Propriedades Mecânicas	**Valor**
E (GPa)	45
ν	0,30
σ_s^{AM} (MPa)	365
σ_f^{AM} (MPa)	441
σ_s^{MA} (MPa)	235
σ_f^{MA} (MPa)	78
S_y (GPa)	1,6
ε_L	0,07

As Figuras IV.7 (a) e IV.7 (b) apresentam, respectivamente, a geometria com as condições de contorno prescritas e a malha obtida após uma análise de convergência. Para simular as condições de carregamento observadas na análise experimental, uma das extremidades da espira é fixada com deslocamentos nulos para todos os graus de

liberdade na sua área de seção transversal, enquanto a outra extremidade é submetida a um deslocamento cíclico carregamento-descarregamento (onda triangular) prescrito na direção longitudinal da mola. As variáveis são analisadas em uma seção transversal central da mola para evitar os efeitos das cargas e das condições de contorno prescritas nas duas extremidades da mola. A incorporação dos efeitos de não-linearidade geométrica nas análises é obtida através da ativação do comando NLGEOM do ANSYS (2012).



(a) (b)

FIG.IV.7: Modelo da mola helicoidal com SMA com as condições de contorno (a) e com a malha (b).

IV.3 Resultados Numéricos

Em primeiro lugar, um processo de verificação do modelo é desenvolvido comparando-se o comportamento de uma mola de um material linear-elástico considerando os parâmetros elásticos do modelo apresentados na TABELA IV.2 com a solução analítica dada pela Eq. 9. Dois casos são considerados para o modelo de elemento finitos proposto: com e sem o efeito da não-linearidade geométrica. A FIG IV.8 mostra uma comparação entre os dados numéricos e analíticos. Os resultados mostram que o modelo apresenta boa concordância entre o modelo analítico e a análise numérica que não considera o efeito da não-linearidade geométrica. Os resultados numéricos da análise que considera a presença da não-linearidade geométrica (NGL) mostram um

comportamento similar aos outros em uma região de pequenos deslocamentos, seguindo uma região com aumento da rigidez.

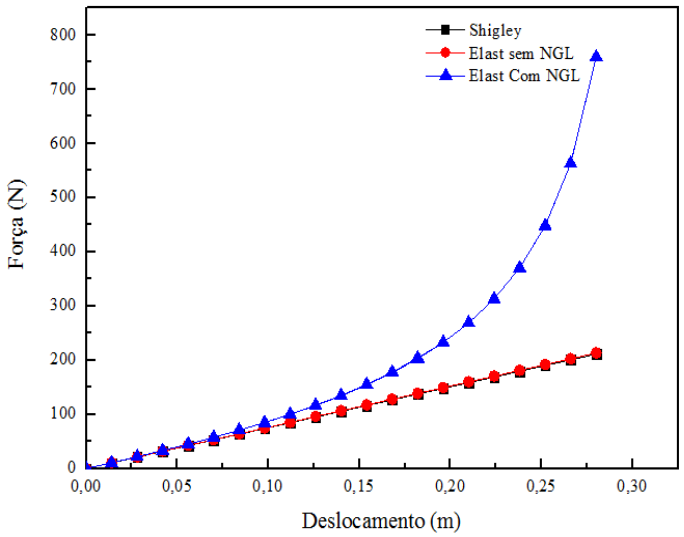


FIG.IV.8: Comparação entre resultados numéricos e analíticos para uma mola helicoidal de um material linear-elástico

Em seguida, apresenta-se uma análise do comportamento de uma mola helicoidal de SMA com e sem o efeito da não-linearidade geométrica, para um processo de carregamento e descarregamento triangular. A FIG.IV.9 mostra que há um aumento significativo da rigidez da mola devido à influência da alteração da sua geometria original, associado aos efeitos de grandes deslocamentos que promovem a não-linearidade geométrica.

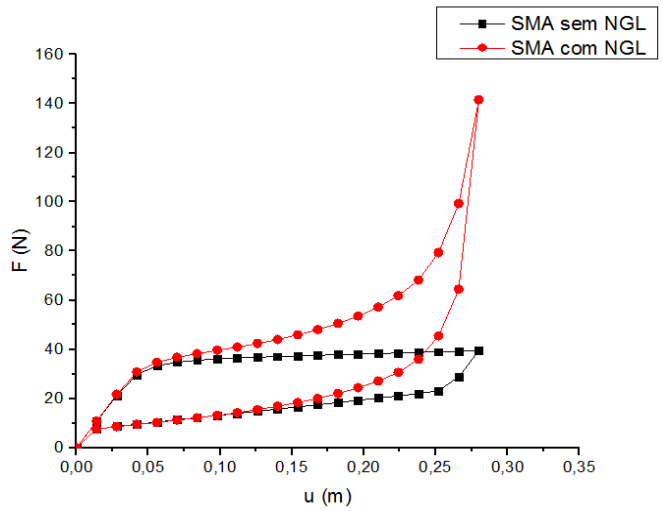


FIG.IV.9: Influência da não-linearidade geométrica em molas helicoidais elásticas sem SMA.

Um processo de calibração é desenvolvido para ajustar os parâmetros do modelo apresentados na TABELA IV.2. A FIG.IV.10 mostra uma comparação entre as curvas força-deslocamento para as análises numéricas e experimentais considerando as condições de carregamento de deslocamento prescrito.

As maiores diferenças são observadas para o deslocamento prescrito de 280 mm, onde grande quantidade de transformação de fase ocorre e o modelo numérico prevê um elemento com uma rigidez equivalente mais elevada e um maior valor de força máxima. O material utilizado nas molas de SMA apresenta um módulo de elasticidade da austenita cerca de duas vezes maior do que o da martensita (SAVI *et al.*, 2015). Uma vez que o modelo constitutivo utilizado para representar o comportamento pseudoelástico da SMA considera o mesmo valor para as duas fases, adota-se o valor de austenita. Por conseguinte, as simulações numéricas preveem uma rigidez equivalente superior à que se observa experimentalmente. No entanto, os resultados mostram que o modelo proposto é capaz de representar adequadamente o comportamento do elemento de mola helicoidal SMA.

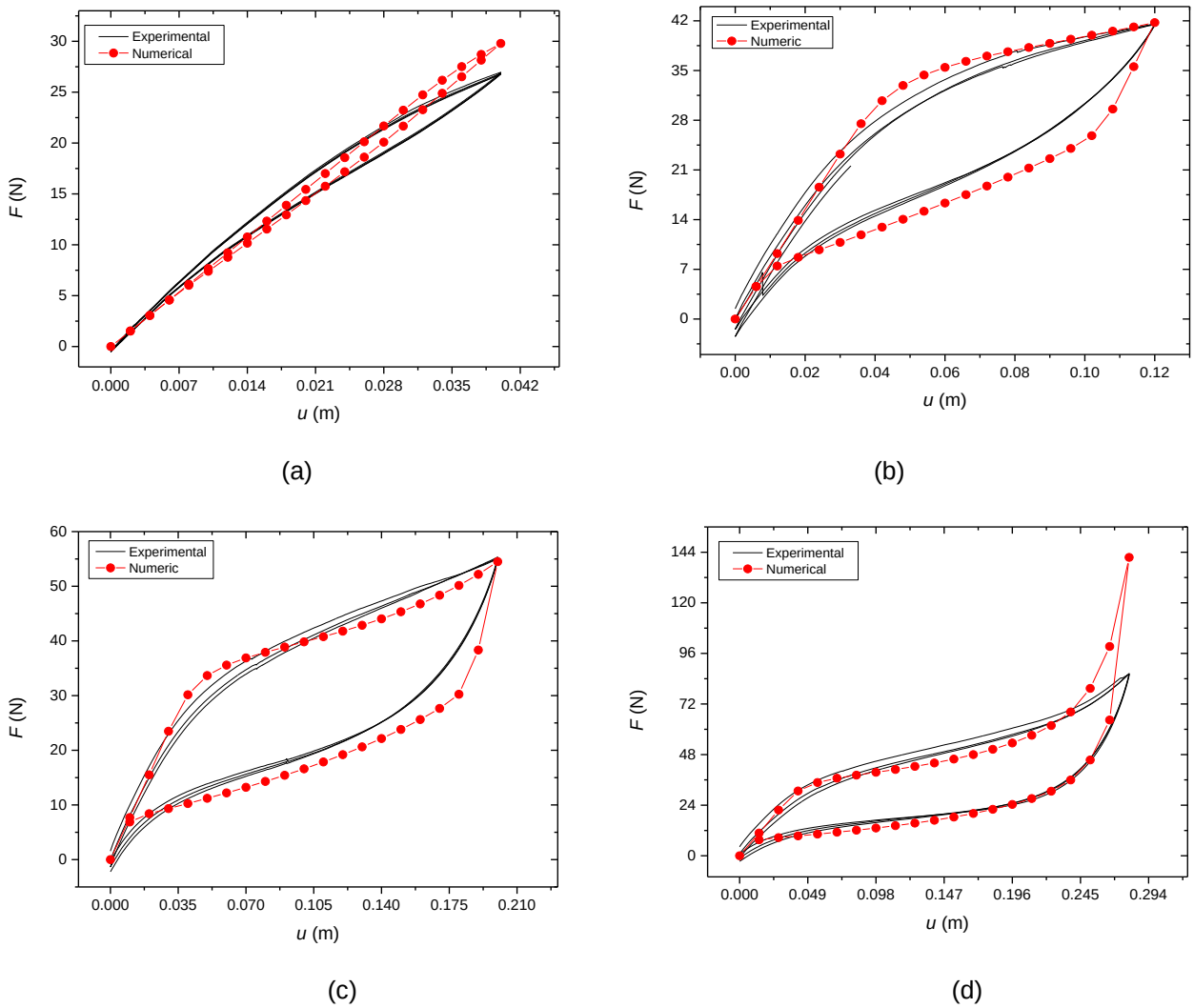
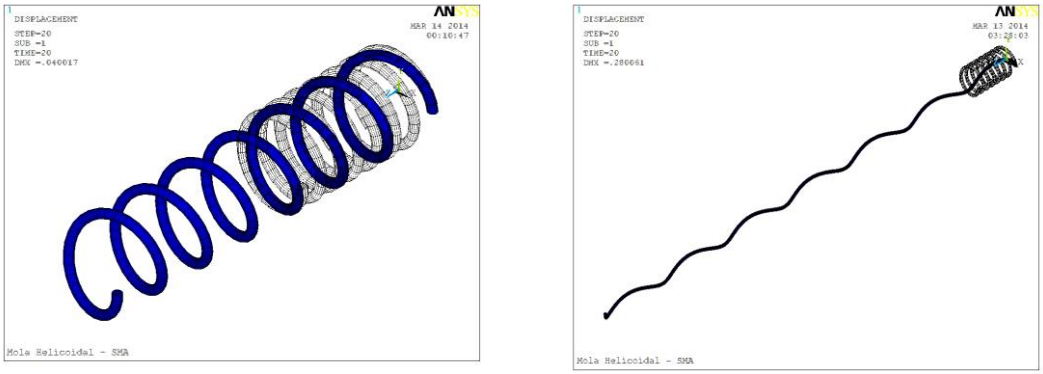


FIG.IV.10: Curvas força-deslocamento para ciclos com deslocamento máximo prescrito: (a) 40 (b) 120 (c) 200 e (d) 280 mm.

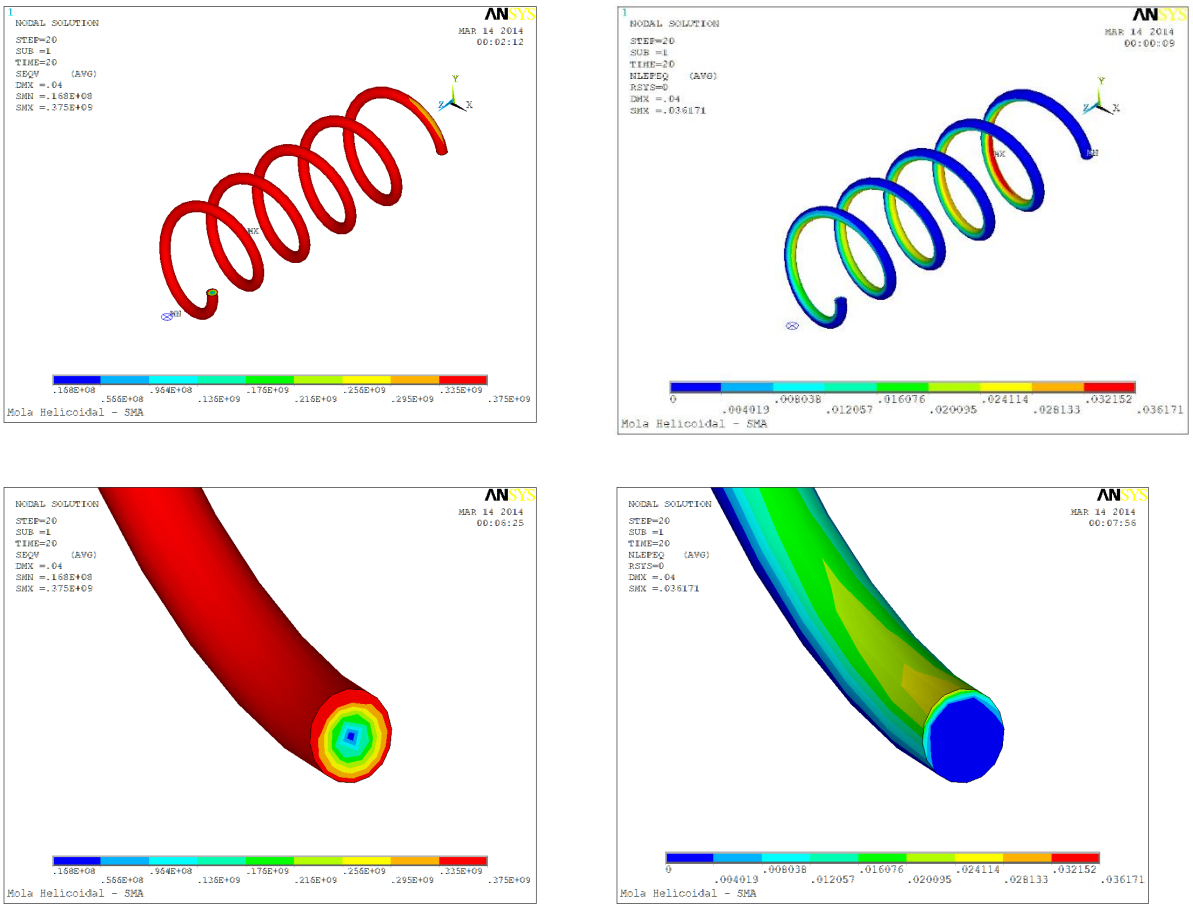
Neste ponto os resultados numéricos são explorados considerando dois carregamentos envolvendo a menor e a maior amplitude de deslocamento prescrita nos ensaios experimentais: 40 e 280 mm, respectivamente. A FIG IV.12 mostra os resultados numéricos da mola helicoidal em duas configurações: não deformada e deformada, para deslocamentos prescritos de 40 e 280 mm. A IV.12(b) mostra que o modelo captura o comportamento da mola helicoidal de SMA deformada observada nos ensaios experimentais, em que o maior deslocamento atinge um valor de aproximadamente 12 vezes o seu comprimento inicial, assim como a FIG.IV.5d.



(a) (b)

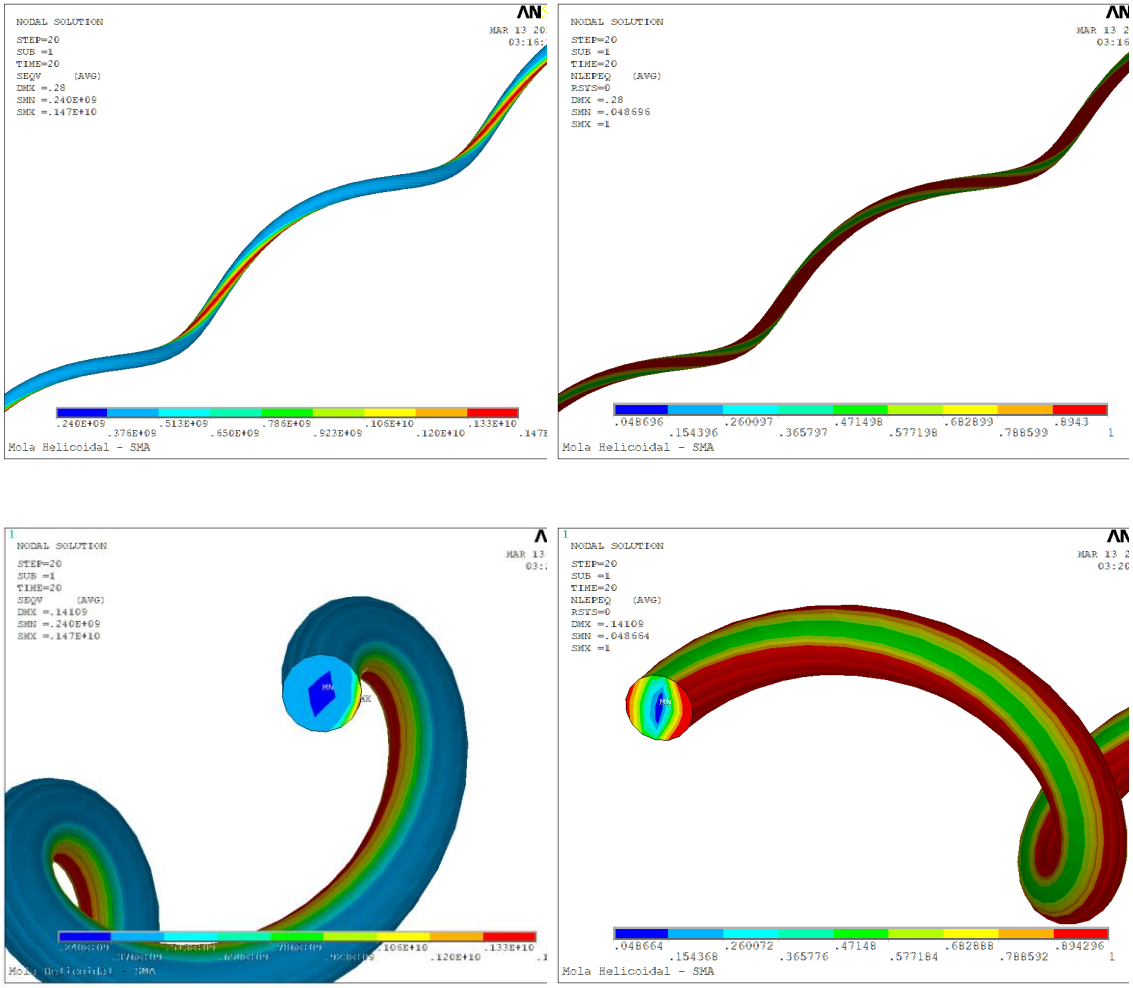
FIG.IV.11: Mola helicoidal pseudoelástica em duas configurações: não e deformada e deformada para um carregamento prescrito de: (a) 40 mm e (b) e 280 mm.

A FIG.IV.12(a) mostra a distribuição da tensão equivalente de *von Mises*, enquanto FIG.IV.12 (b) mostra a distribuição da fração volumétrica de fase martensítica durante um deslocamento prescrito de 40 mm. A FIG.IV.13 mostra a mesma informação para um deslocamento prescrito de 280 mm. Ambas as figuras mostram uma típica distribuição de tensão presente em molas helicoidais associadas à combinação dos esforços internos de torção e de cortante atuantes na seção transversal do fio da mola. Para uma barra reta, o momento torçor promove uma distribuição circunferencial de tensão de cisalhamento com valores nulos no centro e valores máximos na superfície, o que resulta em valores máximos da tensão equivalente de *von Mises* e da fração volumétrica de fase martensítica na superfície do cilindro.



(a) (b)

FIG.IV.12: Distribuição da tensão equivalente de *von Mises* (a) e distribuição volumétrica de fase martensítica (b). Deslocamento prescrito de 40 mm.

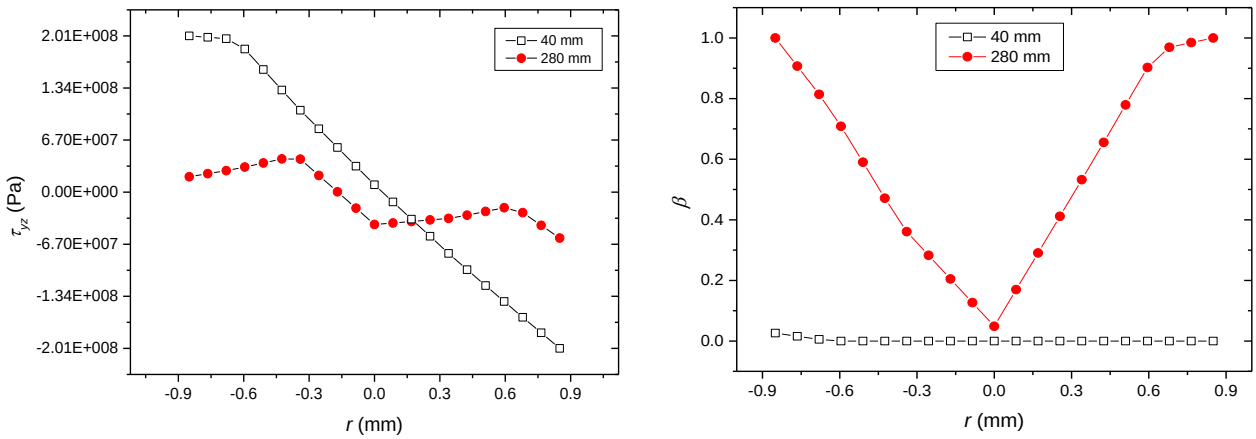


(a) (b)

FIG.IV.13: Distribuição da tensão equivalente de *von Mises* (a) e distribuição volumétrica de fase martensítica (b). Deslocamento prescrito de 280 mm.

Estes resultados são apresentados de uma outra forma na FIG.14 que mostra a distribuição da tensão de cisalhamento e a distribuição da fração volumétrica de fase martensítica ao longo do diâmetro do fio para os dois carregamentos prescritos. Observa-se que as distribuições não são simétricas. Esta é uma consequência do efeito de curvatura (MIRZAEIFAR *et al.*, 2011) e valores mais elevados de tensão e fração volumétrica da fase martensítica são observados na parte interna da mola, próximo ao seu eixo longitudinal. Como esperado, os resultados mostram que distribuições semelhantes são obtidas para os dois carregamentos prescritos e que a região central

dos cilindros possui baixos valores de tensão e, consequentemente, baixos valores de fração volumétrica de fase martensítica. Dessa forma, assim como ocorre para as barras de torção analisadas no capítulo anterior, esta região central apresenta uma baixa contribuição para a dissipação de energia.



(a) (b)

FIG.IV.14: Distribuição da tensão de cisalhamento (a) e distribuição da fração volumétrica de fase martensítica (b) na seção transversal do fio da mola.

A dissipação de energia de uma mola pseudoelástica pode ser obtida a partir da área da sua curva de histerese. A TABELA 4 apresenta a dissipação de energia e a densidade de dissipação de energia para a mola helicoidal pseudoelástica de SMA considerando os quatro carregamentos de deslocamento prescrito. Os valores mostrados são calculados através da integração das áreas de histerese dos dados numéricos e experimentais apresentados na TABELA 4 mostra que, exceto para o caso associado ao menor valor de carregamento prescrito onde a dissipação de energia é muito pequena, uma boa concordância é observada entre os resultados numéricos e experimentais.

TABELA 4. Dissipação de energia para mola helicoidal de SMA submetidos a deslocamentos longitudinais.

Deslocamento Prescrito (mm)	**Energia Dissipada (J)**		**Densidade de Energia Dissipada Exp. (MJ/m^3)**
	Resultados Experimentais	**Resultados Numéricos**	
40	$5{,}638 \times 10^{-2}$	$3{,}325 \times 10^{-2}$	0,011
120	1,135	1,531	0,507
200	3,211	3,720	1,230
280	6,883	7,003	2,321

Conforme já foi anteriormente apontado, barras uniformes submetidas a cargas axiais são os elementos de dissipação de energia mais eficientes uma vez que elas experimentam um estado de tensão uniaxial homogêneo e, portanto, toda a seção transversal da barra apresenta ciclos de histerese completos. Esta condição está associada a uma densidade de dissipação de energia teórica máxima que pode ser estimada através da integração da curva tensão-deformação de histerese do material pseudoelástico. Para o material usado no modelo, descrito pela curva de tensão-deformação mostrada na FIG.IV.10, com as propriedades dos materiais da TABELA IV.2, a curva de histerese de tensão-deformação envolve uma área igual a 17,2 MJ/m^3.

As molas helicoidais submetidas a carregamentos longitudinais experimentam a máxima transformação de fase na superfície do fio da mola e o centro apresenta uma baixa contribuição para dissipação de energia, e desse modo, um baixo valor de transformação de fase. Dentro das condições de carregamento analisadas, a mola apresenta uma densidade de dissipação de energia máxima de 2,321 MJ/m^3, o representa aproximadamente 14% do valor observado nos carregamentos axiais. No entanto, as molas helicoidais de SMA apresentam características próprias, como uma rigidez equivalente que pode ser facilmente ajustada pela modificação da geometria da mola durante o processo de fabricação e a capacidade de desenvolver grandes

deslocamentos. Além disso, podem ser usadas como um eficiente elemento de dissipação de energia.

Capítulo V - Conclusões

Neste trabalho é utilizado um modelo numérico não-linear baseado no método de elementos finitos para estudar a capacidade dos elementos de SMA para dissipar energia. O modelo proposto é aplicado ao estudo de três elementos pseudoelásticos: barras axiais, barras de torção e molas helicoidais. As curvas histeréticas pseudoelásticas analisadas são associadas à dissipação de energia. Assim, os elementos pseudoelásticos de SMA podem ser usados como atenuadores de vibração.

As barras uniformes submetidas a cargas axiais são os elementos de dissipação de energia mais eficientes uma vez que elas experimentam um estado de tensão uniaxial homogêneo. A condição de máxima densidade de dissipação de energia é alcançada para estes elementos.

As barras de torção vazadas também são eficientes elementos de atenuação. A remoção da região central da barra, a qual não contribui para a dissipação de energia, permite a obtenção de elevados valores de densidade de energia de dissipação.

Os resultados numéricos comprovam que as molas helicoidais pseudoelásticas podem desenvolver grandes deslocamentos recuperáveis e podem ser utilizadas como elementos de dissipação de vibrações. Apesar de sua densidade de energia de dissipação ser inferior à dos outros dois elementos estudados, as molas helicoidais de SMA apresentam características próprias, como uma rigidez equivalente que pode ser facilmente ajustada pela modificação da geometria da mola durante o processo de fabricação e a capacidade de desenvolver grandes deslocamentos.

Apresenta-se uma análise experimental para molas helicoidais pseudoelásticas o que permitiu calibrar o modelo proposto. Esses resultados indicam que o modelo é capaz de representar adequadamente o comportamento de elementos pseudoelásticos.

O modelo utilizado, além de poder ser empregado para estudar o desempenho de outras geometrias, tais como molas Belleville, pode ser utilizado para ajustar as

características dinâmicas e estudar o desempenho de molas helicoidais pseudoelásticas.

Como sugestão para futuros trabalhos, pode-se indicar:

- Análise de dissipação de energia para outras geometrias de elementos pseudoelásticos;
- Incorporação de modelo constitutivo que considere a diferença entre os módulos de elasticidade da austenita e da martensita;
- Análise da dissipação de energia em situações reais, como por exemplo, através da incorporação de molas helicoidais pseudoelásticas em mancais de eixos ou em suspensões de veículos;
- Explorar o processo de fabricação de molas helicoidais, variando os parâmetros como as temperaturas/tempos de aquecimento e resfriamento para análise do comportamento mecânico; e
- Consideração de fontes de excitação dinâmicas para análise do comportamento dinâmico de sistemas mecânicos.

Capítulo VI – Referências Bibliográficas

AGUIAR, R. A. A. DE. Análise da Reduçao de Vibrações em Sistemas Mecânicos Utilizando Ligas com Memória de Forma. [s.l.] Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, 2011.

AGUIAR, R. A.; SAVI, M. A.; PACHECO, P. M. Experimental investigation of vibration reduction using shape memory alloysJournal of Intelligent Material Systems and Structures, 2012.

ANCKER JR, C.; GOODIER, J. Pitch and curvature corrections for helical springs. Journal of Applied Mechanics, v. 25, p. 466–470, 1958.

ASGARIAN, B.; MORADI, S. Seismic response of steel braced frames with shape memory alloy braces. Journal of Constructional Steel Research, v. 67, n. 1, p. 65–74, 2011.

AURICCHIO, F.; TAYLOR, R. L.; LUBLINER, J. Shape-memory alloys: macromodelling and numerical simulations of the superelastic behavior. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 146, p. 281–312, 1997.

BUNDOO, V. H.; E., B.; PARK, E. . A Shape Memory Alloy-Based Tendon-Driven Actuation System for Biometric Artificial Fingers, Part I: Design and Evaluation. Robótica, v. 27, p. 131–146, 2009.

CARDINALE, M.; POPE, M. H. The effects of whole body vibration on humans: dangerous or advantageous? Acta physiologica Hungarica, v. 90, n. 3, p. 195–206, 14 jan. 2003.

CASCIATI, F.; FARAVELLI, L. A passive control device with SMA components: From the prototype to the model. Structural Control and Health Monitoring, v. 16, n. 7-8, p. 751–765, 2009.

CORBI, O. Shape memory alloys and their application in structural oscillations attenuationSimulation Modelling Practice and Theory. Anais...2003

DESROCHES, R.; DELEMONT, M. Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys. Engineering Structures, v. 24, n. 3, p. 325–332, 2002.

DEZFULI, F. H.; ALAM, M. S. Performance-based assessment and design of FRP-based high damping rubber bearing incorporated with shape memory alloy wires. Engineering Structures, v. 61, p. 166–183, mar. 2014.

DOLCE, M.; CARDONE, D.; MARNETTO, R. SMA recentering devices for seismic isolation of civil structuresProc. SPIE, 2001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1117/12.434123>

DYKE, S. J. et al. An experimental study of MR dampers for seismic protection. Smart Materials and Structures, v. 7, n. 5, p. 693–703, 1 out. 1998.

ELLIOTT, B. The Story of Tacoma Narrows BridgeEstados Unidos da AméricaCBS, , 1940. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=lXyG68_caV4>

FUGAZZA, D. Shape-Memory Alloy Devices in Earthquake Engineering: Mechanical Properties, Constitutive Modeliong and Numerical Simulations. [s.l.] Università Degli Studi di Pavia, 2003.

HAN, Y.-L. et al. Structural vibration control by shape memory alloy damper. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, v. 32, n. 3, p. 483–494, 2003.

HARTL, D. et al. Use of a Ni60Ti Shape Memory Alloy for Active Jet Engine Chevron Application: II. Experimentally Validated Numerical Analysis. Smart Materials and Structures, v. 19, p. 1–18, 2010.

HORA, R. B. DA et al. MODELING PSEUDOELASTIC VIBRATION ATTENUATORS ELEMENTS USING THE FINITE ELEMENT METHOD. 22nd International Congress of Mechanical Engineering, n. 2176-5480, 2013.

INDIRLI, M. et al. Demo-applications of shape memory alloy devices: the rehabilitation of the S. Giorgio Church Bell-TowerProc. SPIE 4330, Smart Structures and Materials 2001: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways. Anais...2001

JANI, J. M. et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunitiesMaterials and Design, 2014.

JOHNSON, R. et al. Large scale testing of nitinol shape memory alloy devices for retrofitting of bridgesSmart Materials and Structures, 2008.

LAGOUDAS. Modeling and Engineering Applications. [s.l.] Springer, 2008.

LOH, C. S.; YOKOI, H.; ARAI, T. New shape memory alloy actuator: design and application in the prosthetic hand. Conference proceedings : ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual Conference, v. 7, p. 6900–3, jan. 2005.

MACHADO, L.; SAVI, M. A. Medical applications of shape memory alloys. Brazilian Journal of Medical and Biological Research, v. 36, p. 683–91, 2003.

MIRZAEIFAR, R.; DESROCHES, R.; YAVARI, A. A combined analytical, numerical, and experimental study of shape-memory-alloy helical springs. International Journal of Solids and Structures, v. 48, n. 3-4, p. 611–624, 2011.

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

OZBULUT, O. E. et al. A fuzzy model of superelastic shape memory alloys for vibration control in civil engineering applicationsSmart Materials and Structures, 2007.

OZBULUT, O. E. et al. GA-based optimum design of a shape memory alloy device for seismic response mitigationSmart Materials and Structures, 2010.

PAIVA, A.; SAVI, M. A. An overview of constitutive models for shape memory alloys. Mathematical Problems in Engineering, v. 2006, p. 1–30, 2006.

PEREIRA, J. Um Estudo Sobre Atuadores Lineares com Molas Helicoidais de Ligas com Memória de Forma. [s.l.] CEFET/RJ, 2009.

PETRINI, L.; MIGLIAVACCA, F. Biomedical Applications of Shape Memory Alloys, Journal of Metallurgy, 2011.

PUGLIESE, G.; CASEY, D. Analysis of Shape Memory Alloy and Their Application for Reduction for Reduction Damage Due to Seismic Activity. [s.l.] University of Pittsburgh, 2012.

RIAGUSOFF, I. Estudo de Dispositivos Pseudoelásticos para Aplicação em Atenuadores de Vibração. [s.l.] CEFET/RJ, 2012.

ROGERS, C. Intelligent Materials. Scientific American. Anais v. 36, p. 683–91, 2003.

SAVI, M. A. et al. Non-Linear Dynamics of an Elasto–Plastic Oscillator With Kinematic and Isotropic Hardening. Journal of Sound and Vibration, v. 207, p. 207–226, 1997.

SAVI, M. A. et al. Nonlinear geometric influence on the mechanical behavior of shape memory alloy helical springs. Smart Materials and Structures, v. 24, n. 3, p. 035012, 1 mar. 2015.

SAVI, M. A.; DE PAULA, A. S.; LAGOUDAS, D. C. Numerical Investigation of an Adaptive Vibration Absorber Using Shape Memory Alloys. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011.

SCHMID, S. R.; HAMROCK, BERNARD J. JACOBSON, B. Fundamentals of Machine Elements. Nova Iorque: McGraw-Hill Book Company, 1999.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. Projetos de Engenharia Mecanica. 7a. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.

SHOOK, D. et al. A comparative study in the semi-active control of isolated structuresSmart Materials and Structures, 2007.

ŠITTNER, P. et al. Young's Modulus of Austenite and Martensite Phases in Superelastic NiTi Wires. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 23, n. 7, p. 2303–2314, 8 abr. 2014.

SOFLA, A. Y. N. et al. Shape morphing of aircraft wing: Status and challenges. Materials & Design, v. 31, n. 3, p. 1284–1292, mar. 2010.

STOECKEL, D. Shape memory actuators for automotive applications. Materials & Design, v. 11, n. 6, p. 302–307, dez. 1990.

WAHL, A. M. Mechanical Springs. 1. ed. Cleveland: Penton Pub. Co, 1944.

ZHANG, Y.; CAMILLERI, J. A.; ZHU, S. Mechanical properties of superelastic Cu–Al–Be wires at cold temperatures for the seismic protection of bridgesSmart Materials and Structures, 2008.

ZUO, X.; LI, A. Numerical and experimental investigation on cable vibration mitigation using shape memory alloy damper. Structural Control and Health Monitoring, v. 18, n 1. August 2009, p. 20–39, 2011.