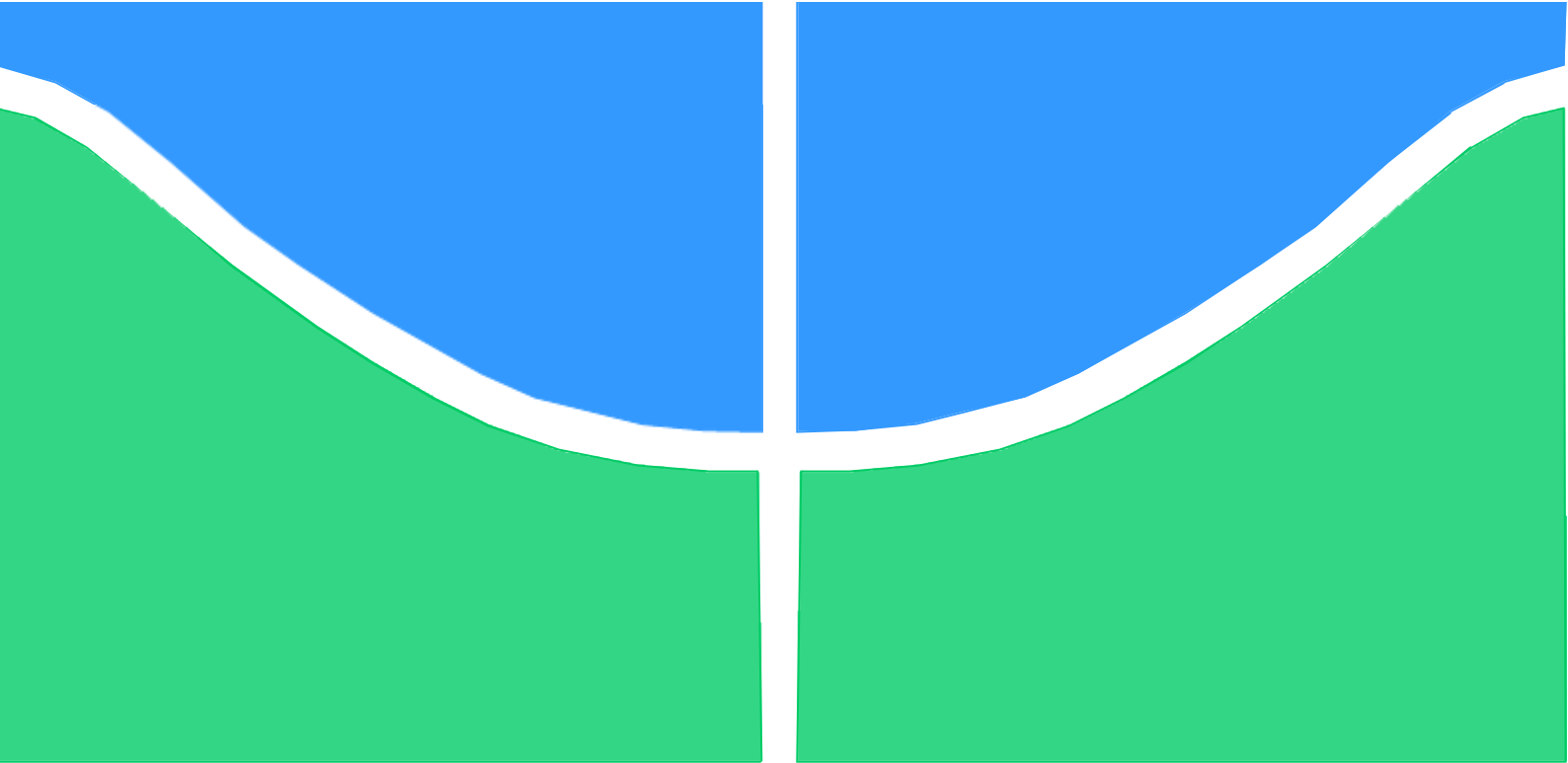




PROJETO DE GRADUAÇÃO

ANÁLISE DINÂMICO DE UM STOCKBRIDGE PSEUDOELÁSTICO

Por,
HUGO DE SOUZA OLIVEIRA

Brasília, 29 de Junho de 2011

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**ANÁLISE DINÂMICO DE UM STOCKBRIDGE
PSEUDOELÁSTICO**

POR,

Hugo de Souza Oliveira

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Profa. Aline Souza de Paula, UnB/ ENM (Orientadora)

Prof. Edson Paulo da Silva, UnB/ ENM

Prof. Jorge Almeida Ferreira, UnB/ ENM

Brasília, 29 de Junho de 2011

Dedicatória(s)

*Dedico esse trabalho a todos aqueles que
têm me acompanhado durante essa
jornada acadêmica. Em especial,
menciono meus pais e meus irmãos.*

Hugo de Souza Oliveira

Agradecimentos

Essa é a parte do trabalho em que os formalismos e jargões científicos ficam de lado e a liberdade impera. Antes de fazer os mil agradecimentos que devo, gostaria de olhar para trás e relembrar as várias experiências que vivenciei na Universidade de Brasília.

Lembro-me que no início do curso eu não tinha certeza nenhuma se Engenharia Mecânica era realmente o que eu queria, a falta de objetivo era tanta que eu não sentia motivação nenhuma. Com o tempo, fui conhecendo e ao mesmo tempo me apaixonando por esse ramo da engenharia que tem o poder de extrair toda a criatividade de uma pessoa por meio de constantes desafios. Hoje tenho a certeza que eu não haveria outro curso que me desafiasse tanto e ao mesmo tempo me atraísse.

Para que eu chegasse até essa fase de conclusiva, muitas pessoas foram importantes e a elas eu demonstro os meus mais sinceros e profundos agradecimentos:

Inicialmente eu menciono Deus e seu filho Jesus Cristo, pois sem eles não haveria sentido, ordem e regularidade alguma na vida. Se até hoje eu estou vivo, é porque Ele cuidou, tem cuidado e cuidará. Ainda que eu não consiga perceber a presença DEle e ainda que eu esteja me sentindo tão só, Ele sempre se faz presente de forma oculta.

Agradeço também a minha família por ter me sustentado, apoiado e financiado durante todos esses anos. Agradeço aos meus pais, Hibernon e Ana, por terem me incentivado nos períodos mais difíceis e doentios da minha vida. Agradeço também aos meus irmãos Marcus e Márcia pelo simples fato de serem meus irmãos.

Agradeço a vários amigos também, não só por terem me ajudado em muitas situações, mas também pelos pequenos e constantes momentos de alegria que tornavam os dias difíceis mais suportáveis. Dentre esses vários amigos, menciono estes: Rômulo (Romualdo), Raphael (O gordo), Fabrício (Lanterna verde/farofa), Fabão (Combatente de Guerra), Fábio (Ganância), Gustavo (Bomba), Welberth, Leonardo (Bola de fogo), Thamise, Julio, Estarle, Gustavo (Pézão), Lucas (Venâncio), Rodolfo (Gonça), Danilo (Peladão), Alexandre (Cowboy), Thaty (Japa), André (Miazaki), Rodrigo (Mexicano), Raphael (Sapcão), Rafael (Rafaga), André (Nunão), Felipe (Zanata), Rafael (Rafinha), André (Cabelão), Paulo (Paulinho) e Carlos (Carlão). Com certeza eu estou me esquecendo de vários, mas minha memória não é das melhores para lembrar de todos.

Agradeço de forma bastante especial a professora Aline Souza de Paula por ter me auxiliado muito além de qualquer expectativa. Agradeço a ela também por ter acreditado em meu trabalho, mesmo eu não sendo um daqueles bons alunos. Agradeço pela confiança depositada em mim nesse projeto. Agradeço por cada dica, detalhe e recomendação que foram extremamente valiosos para o meu entendimento sobre o assunto abordado nesse trabalho. Agradeço pelas várias horas gastas comigo explicando os programas e as simulações complexas. Agradeço por todo o valioso auxílio na composição do texto do trabalho. Agradeço por, mesmo estando extremamente ocupada, ter me ajudado de forma bastante acessível. Agradeço por todo incentivo que me deu e tem me dado. Enfim, não haveria melhor orientadora para esse projeto.

Hugo de Souza Oliveira

RESUMO

Esse trabalho é parte de um estudo inicial da utilização de elementos de SMA em dispositivos de absorção de vibrações para cabos de transmissão de energia, como o *stockbridge*. A idéia central na qual esse trabalho se baseia consiste na utilização de elementos de SMA nos ADVs com o objetivo a aumentar sua faixa de frequências operação. Objetiva-se obter essa melhora da performance explorando-se o comportamento pseudoelástico dessas ligas, que está associado a uma grande capacidade dissipativa.

ABSTRACT

This work is part of an initial study of the use of SMAs in absorbing vibrational devices of overhead power line transmission cables, such as Stockbridge. The central idea on which this work is based is the use of SMA in DVAs in order to increase its range of operation. The main objective is to improve its performance by exploring the behavior of these non-linear alloys which is associated with a large capacity power dissipation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2 VIBRAÇÕES EM CABOS CONDUTORES.....	5
2.1 ASPECTOS GERAIS	5
2.1.1 Oscilações Causadas por emissão de vórtices	5
2.1.2 Galope	6
2.1.3 Oscilação de rotação.....	6
2.2 DESENVOLVIMENTO DA VIBRAÇÃO EÓLICA EM UM VÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO	7
2.3 INTENSIDADE DA VIBRAÇÃO NOS CONDUTORES	8
2.4 FORÇAS E DANOS CAUSADOS NOS CABOS E NA ESTRUTURA DE SUPORTE	8
3 ABSORVEDORES DINÂMICOS DE VIBRAÇÕES.....	11
3.1 - ABSORVEDORES DINÂMICOS DE VIBRAÇÃO NÃO AMORTECIDOS	11
3.2 - ABSORVEDORES DINÂMICOS DE VIBRAÇÃO AMORTECIDOS.....	16
4 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA.....	19
4.1 ASPECTOS GERAIS	19
4.2 EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA E SUPERELASTICIDADE.....	21
4.2.1 Aspectos cristalográficos das transformações martensíticas.....	23
4.2.2 Efeito de Memória de Forma (One-Way).....	23
4.2.3 Efeito de Memória de Forma reversível (Two-Way)	24
4.2.4 Efeito de Pseudoelasticidade.....	26
4.3 MODELO CONSTITUTIVOS PARA SMAS	27
4.4 COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO ESTÁTICO DE UMA SMA NI-TI.....	29
4.4.1 Pseudoelasticidade em uma SMA Ni-Ti.....	29
4.4.2 Comportamento de memória de forma em uma SMA Ni-Ti.....	31
4.5. UTILIZAÇÃO DE SMAS EM PROBLEMAS VIBRATÓRIOS	33
4.5.1 SMA em regime quasiplástico	34
4.5.2. SMA em regime pseudoelástico.....	34
5 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E RESULTADOS.....	37
5.1 SISTEMA ESTUDADO	39
5.2 OSCILADORES 1G.L. LINEAR E NÃO-LINEAR	40

5.2.1	Modelo para scilador com SMA	40
5.2.2	Modelo para o oscilador linear.....	42
5.2.3	Resultados para o oscilador linear.....	43
5.2.4	Resultados preliminares para o modelo com rigidez não-linear (SMA).....	43
5.3	ANÁLISE DINÂMICA NUMÉRICA DO OSCILADOR COM SMA.....	44
5.3.1	Análise da ressonância do oscliador SMA	45
5.4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS PRELIMINARES	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		60
ANEXOS.....		62

LISTA DE FIGURAS

2.1 – Emissão de vórtices em um perfil circular	5
2.2 – Rupturas e entalhes na segunda camada	9
2.3 – Ponto de ancoragem em um vão de linha de transmissão.....	10
3.1 – Sistema de um grau de liberdade com adição de absorvedor dinâmico	12
3.2 – Amplitude do sistema primário com relação a variação das frequências de excitação.....	15
3.3 – Amplitude Absorvedor Dinâmico em relação a variação das frequências de excitação.....	15
3.4 - Sistema de um grau de liberdade com adição de absorvedor dinâmico amortecido.....	16
3.5 – Comparação entre as amplitudes do sistema primário e do absorvedor dinâmico.....	18
4.1 – Relação entre temperaturas e fases	20
4.2 – Relação entre carga aplicada e temperaturas características..	20
4.3-Figura esquemática da deformação e recuperação de forma da SMA em nível atômico.....	21
4.4 – Representação esquemática para as curvas de energia para a fase austenítica e a fase martensítica e suas relações com as temperaturas.....	22
4.5 – Representação esquemática da interface entre as fases austeníticas e martensíticas	23
4. 6 – Processos na memória de forma por tração.....	24
4. 7 – Memória de forma <i>one way</i> em um diagrama tensão-deformação..	24
4. 8- Treinamento a partir de 50 ciclos térmicos em um fio de Ni-Ti.....	25
4. 9 - Treinamento a partir de 50 ciclos de deformação em um fio de Ni-Ti. $A_f=65^\circ$ e $T=70$	25
4. 10 – Diagrama σ - ϵ para as ligas de memória de forma.	26
4.11 - Desenvolvimento da tensão e da deformação com relação ao tempo.....	30
4.12-Transformação e porcentagem de fase ao longo do tempo para a pseudoelasticidade.	30
4.13 - Diagrama de deformação – tensão para a liga de memória de forma.....	31
4.14 – Memória de forma do tipo <i>one-way</i> presente na liga a 340K.....	31
4.15 – Desenvolvimento da deformação com relação à temperatura e ao tempo	32
4. 16 – Transformação e porcentagem de fase ao longo do tempo para a memória de forma.....	32
4. 17 – Efeito memória de forma do tipo <i>one-way</i> apresentado pela liga analisada.....	33
4.18 – Absorvedor dinâmico adaptativo proposto por Tiseo <i>et al</i> (2010).....	34
4.19 – Viga de Concreto Reforçada com Aço Comum.	35
4.20 – Viga de Concreto Reforçada com SMA	36
4.21 – Análise do Crescimento de Trincas.....	36
5.1 –Stockbridge com elemento de SMA em um cabo de transmissão.....	39
5.2 – Oscilador de 1 grau de liberdade com elemento de SMA.....	40
5.3 – Oscilador de 1 grau de liberdade sem SMA.....	42
5.4 – Resposta do oscilador linear para $\omega=\omega_L$. a) Sem dissipação viscosa; b) $\zeta_L=0.05$	43
5.5 – Comportamento do sistema para $\bar{\omega}=0.72$, $\zeta_L=0$ e $T= 340K$	44
5.6 – Comportamento do sistema para $\bar{\omega}=0.72$, $\zeta_L=0.05$ e $T= 340K$	44
5.7 – Amplitudes máximas de resposta aumentado-se a frequência de forçamento para $\delta=0.001$	45

5.8 – Amplitudes máximas de resposta diminuindo-se a frequência de forçamento para $\delta=0.001$.	46
5.9 – Amplitudes máximas de resposta aumentando-se a frequência de forçamento com $\delta=0.008$.	46
5.10 – Diagramas tensão-deformação para diferentes frequências de forçamento com $\delta=0.008$.	47
5.11 – Amplitudes máximas de resposta diminuindo-se a frequência de forçamento $\delta=0.008$.	48
5.12 – Diagramas tensão-deformação para diferentes frequências de forçamento com $\delta=0.008$.	50
5.13 – Amplitudes máximas de resposta aumentando-se a frequência de com $\delta=0.012$.	51
5.14 – Diagramas tensão-deformação para diferentes frequências de forçamento com $\delta=0.012$.	51
5.15 – Amplitudes máximas de resposta diminuindo-se a frequência de forçamento. $\delta=0.012$.	52
5.16 – Diagramas tensão-deformação para diferentes frequências de forçamento com $\delta=0.012$.	52
5.17 – Dispositivo de fixação	54
5.18 – Deslocamento relativo	55
5.19 – Velocidade do <i>Shaker</i>	55
5.20 – Potência Dissipada	56

LISTA DE TABELAS

3.1	Parâmetros para sistema primário e ADV.....	14
3.2	Parâmetros para sistema primário e ADV amortecido.....	18

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Área	[m ²]
ω	Frequência de excitação	[Hz]
Ω	Frequência de excitação	[Hz]
T	Temperatura	[K]
U	Coeficiente global de transferência de calor	[W/m ² .K]
E_M	Módulo de elasticidade da fase martensítica	[GPa]
E_A	Módulo de elasticidade da fase austenítica	[GPa]
E	Módulo de elasticidade	[GPa]
Ω_M	Taxa de expansão volumétrica da fase martensítica	[Mpa/K]
Ω_A	Taxa de expansão volumétrica da fase fase austenítica	[GPa/K]
L	Tensão crítica para transformação de fase	[Mpa]
η	Fator de dissipação interna	[Mpa.s]
T_M	Temperatura de início de transformação de fase	[K]
T_A	Temperatura de início de transformação de fase	[K]

Símbolos Gregos

α	Difusividade térmica	[m ² /s]
Δ	Variação entre duas grandezas similares	
ρ	Densidade	[m ³ /kg]

Grupos Adimensionais

β_1	Taxa de variação da fração volumétrica martensita não maclada (+)	[Adimensional]
β_2	Taxa de variação da fração volumétrica martensita não maclada (-)	[Adimensional]
β_3	Taxa de variação da fração volumétrica austenítica	[Adimensional]
ζ	Fator de amortecimento	[Adimensional]
μ	Razão entre massas	[Adimensional]
f	Razão entre frequências naturais	[Adimensional]

Subscritos

M	Martensítico
A	Autenítico
$+$	Tração
$-$	Compressão

Sobrescritos

$\bullet$	Variação temporal
$-$	Valor médio
$''$	Derivada segunda
$'$	Derivada primeira

Siglas

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
------	-----------------------------------

1 INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Sistemas mecânicos de diversos tipos e em diferentes áreas do conhecimento comumente sofrem com problemas relacionados a vibrações indesejáveis. Essas vibrações, muitas vezes, podem comprometer a eficiência, a integridade física e a operacionalidade dos equipamentos, elevando os custos. Nesse contexto, surgiu a necessidade de estudos que objetivassem a compreensão adequada desses fenômenos e uma consequente eliminação ou suavização deles.

Um dos principais problemas a ser evitado na maioria dos sistemas é o fenômeno da ressonância. Desta forma, dado um sistema forçado harmonicamente, dependendo de parâmetros do sistemas e da excitação, podem ser obtidas grandes amplitudes de oscilação na sua resposta. Isso pode gerar sérios danos estruturais relacionados à falha por fadiga ou por escoamento de elementos que compõe o sistema devido a essas grandes amplitudes.

Problemas relacionados à vibrações indesejáveis estendem-se também às linhas de transmissão de energia elétrica. Normalmente, projetos de linhas de transmissão recebem grande atenção no que diz respeito às cargas estáticas, mas as cargas dinâmicas, ainda que sejam muito baixas comparadas com as cargas estáticas, podem causar consideráveis danos por causa de sua característica alternante (Fuchs & Almeida, 1982). Nesse caso, a fonte de excitação são as correntes de ar, que podem gerar um forçamento harmônico dos cabos. Se as oscilações causadas quando o sistema está em ressonância não forem amortecidas adequadamente, poderão alcançar níveis indesejados e, num caso extremo, causar o rompimento do cabo devido à fadiga ou devido ao efeito de grande amplitude.

Uma técnica desenvolvida com o intuito de controlar, reduzir ou até mesmo eliminar vibrações indesejadas é a utilização de absorvedores dinâmicos de vibrações (ADV's). O ADV é um dispositivo de controle de vibrações passivo clássico, possui parâmetros concentrados de massa, rigidez e possivelmente amortecimento que, uma vez conectados a um determinado sistema excitado por uma força harmônica externa, chamado sistema primário, é capaz de absorver a energia vibratória no ponto de conexão e promover uma redução dos níveis de vibração do sistema primário. Os ADV's tradicionais funcionam como supressores de vibração em estreitas frequências de excitação impostas aos sistemas mecânicos por forças externas, ou seja, eles redistribuem energia do sistema de forma eficiente em frequências de excitação muito específicas. Agem de forma que sua oscilação se oponha a força de excitação aplicada no sistema primário.

Um tipo de absorvedor dinâmico de vibrações específico para linhas de transmissão de grande aceitação mundial é denominado Stockbridge e foi desenvolvido em 1926 por George H. Stockbridge. Este dispositivo consiste em duas massas inerciais presas por cabos flexíveis denominados cabos mensageiros a uma garra que as ligam à linha de transmissão. Quando está em funcionamento, o

Stockbridge, além de absorver energia do cabo ao qual está conectado, dissipa energia pela fricção interna e pelo amortecimento dos fios componentes do cabo mensageiro. Como todo absorvedor dinâmico de vibrações passivo, sofre com a limitação de sua estreita banda de frequência de ação.

O estudo de dispositivos absorvedores que compreendam uma faixa maior de frequência de operação têm tido grande importância no meio acadêmico e na indústria. Além disso, as características do amortecedor dinâmico Stockbridge são bastante influenciadas pelas características do cabo mensageiro. Desta forma, é interessante o estudo de modelos que contemplem ajustes nessa parte do dispositivo.

Segundo Lagoudas et al. (2008), recentemente a utilização de materiais inteligentes em absorvedores dinâmicos tem sido largamente explorada tendo em vista suas propriedades especiais. Estes materiais, usualmente utilizados como sensores e atuadores nas chamadas estruturas inteligentes, possuem a capacidade de alterar sua forma, rigidez, frequências naturais, dentre outras propriedades mecânicas, mediante a imposição de campos elétricos, eletromagnéticos, de temperatura ou de tensão.

De acordo com Da Silva (2003), as ligas com memória de forma (SMAs, Shape Memory Alloys) constituem um grupo de materiais metálicos inteligentes que apresentam dois fenômenos denominados quasiplástico e pseudoelástico. No fenômeno quasiplástico, a liga é capaz de recuperar a geometria original (ou de desenvolver consideráveis forças de restituição ao se restringir sua recuperação) através da imposição de um campo de temperatura e/ou de tensão, devido às transformações martensíticas induzidas no material. A pseudoelasticidade é caracterizada pela recuperação de deformações resultantes de transformações martensíticas induzidas por tensão. Esse fenômeno é observado nas SMAs submetidas a altas temperaturas, após retirada da carga aplicada. Nesse ciclo de aplicação e retirada de carga, o material apresenta uma grande capacidade de dissipação de energia devido a presença de um laço de histerese. Esses fenômenos vêm possibilitando o emprego de SMAs em inúmeras aplicações, que vão desde implantes ortodônticos a atuadores em estruturas adaptativas diversas.

1.2. OBJETIVOS

Nesse trabalho, objetiva-se caracterizar dinamicamente um absorvedor dinâmico de vibrações (ADV) do tipo stockbridge constituído por elementos de liga com memória de forma, utilizado para supressão de vibrações em cabos condutores de energia. O dispositivo estudado nesse trabalho possui o cabo mensageiro composto por SMA. A ideia básica norteadora é que o comportamento pseudoelástico de elementos de SMA em ADVs resulte em uma faixa de operação de frequência mais larga que os absorvedores convencionais, tendo em vista a grande capacidade dissipativa desse material devido a presença do laço de histerese.

Inicialmente, a análise do sistema é realizada do ponto de vista numérico. Nesta etapa, o absorvedor do tipo stockbridge é modelado como um sistema 1GL. Nessa análise pretende-se comparar o desempenho entre o oscilador 1GL com elemento de SMA e um com rigidez linear; assim como realizar uma análise do comportamento dinâmico do sistema com SMA. Cabe mencionar que a variedade de fenômenos exibidos pelas SMAs torna sua modelagem extremamente complexa, o que dificulta a formulação de um modelo geral capaz de capturar todos esses fenômenos. Além disso, devido às suas características não-linearidades intrínsecas, a resposta dessas ligas a carregamentos dinâmicos apresenta um comportamento bastante rico. A complexidade dos fenômenos apresentados pelas SMAs assim como as não-linearidades presentes tornam a análise numérica proposta bastante complexa. Cabe ressaltar que no desenvolvimento de um projeto que contemple esses materiais é extremamente importante o conhecimento sobre o seu comportamento termomecânico estático e dinâmico, isto é, é necessário compreender como ocorre o mecanismo de absorção de energia por esses materiais, como as fases microestruturais se relacionam e como ocorre a deformação do material. De forma complementar, é vital o entendimento sobre o modelo constitutivo que descreve o comportamento termomecânico desses materiais, visto que toda a análise numérica será norteadada pelos parâmetros estabelecidos no modelo.

Em seguida, de forma a verificar qualitativamente os comportamentos obtidos na análise numérica, são realizadas testes experimentais de stockbridges convencional e constituído por elementos de SMA. Esses resultados servirão para a posterior calibração do modelo numérico.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Além deste capítulo introdutório, 6 capítulos compõe o presente trabalho.

O capítulo 2 aborda o problema de vibrações em cabos condutores. Os principais tipos de vibrações geradas por oscilações eólicas, como as oscilações causadas por emissão de vórtices, o galope e a oscilação de rotação são apresentados de forma sucinta. É importante também que se entenda a natureza do desenvolvimento das vibrações em linhas de transmissão, haja vista que as oscilações as quais se deseja suprimir são causadas pelo escoamento de ar em torno do perfil aerodinâmico do cabo. O entendimento da intensidade da vibração e das frequências nos cabos também é importante, pois a calibração do modelo de depende desses parâmetros.

O capítulo 3 traz uma análise da utilização de absorvedores dinâmicos de vibrações lineares em sistemas mecânicos, mostrando a supressão das amplitudes de vibrações de um sistema primário e a faixa de frequência de ação do absorvedor.

O capítulo 4 versa sobre as ligas com memória de forma. Inicialmente, são apresentados os principais aspectos fenomenológicos do material, quasiplasticidade e pseudoelasticidade, e uma análise da ação das transformações martensíticas no comportamento das SMAs. Em seguida, o

modelo constitutivo utilizado nesse trabalho, proposto por Paiva et al. (2005) (Savi & Paiva, 2005; Baêta-Neves et al., 2004; Savi et al., 2002), é apresentado e utilizado em simulações numéricas do comportamento estático de uma SMA NiTi. Ainda nesse capítulo são apresentados exemplos da utilização de ligas com memória de forma.

O capítulo 5, inicialmente, apresenta alguns pontos importantes de projeto para o Stockbridge pseudoelástico e traz também a formulação do problema em estudo e uma avaliação por meio de simulações numéricas do comportamento dinâmico de sistemas não-lineares para diferentes condições de carregamento. Algumas análises experimentais também são apresentadas para uma posterior comparação de resultados.

O capítulo 6 é o fechamento dos resultados obtidos nesse trabalho. Além de mencioná-los traz uma discussão sobre algumas vantagens e desvantagens em ADVs não lineares e a necessidade de mais estudos no que se refere a análise dinâmica de um stockbridge pseudoelástico.

2 VIBRAÇÕES EM CABOS CONDUTORES

2.1 ASPECTOS GERAIS

Linhas de transmissão de energia elétrica estão sujeitas à ação do vento que, em muitas situações, gera vibrações nos cabos condutores em níveis indesejados. Essas vibrações podem levar a falhas mecânicas, causando a interrupção da transmissão de energia elétrica e, conseqüentemente, podendo gerar graves prejuízos.

Para Fuchs & Almeida (1982), tradicionalmente, na literatura, os tipos de oscilações nas linhas de transmissão são classificadas em três tipos: oscilações eólicas causadas por desprendimento de vórtices, galope e oscilações de rotação, conforme descrito a seguir.

2.1.1 OSCILAÇÕES EÓLICAS CAUSADAS POR EMISSÃO DE VÓRTICES

Arruda (1975), afirma que essas oscilações são resultantes da formação de vórtices nas linhas de transmissão. Para situações em que o número de Reynolds vale entre 40 e 150, esses vórtices podem ser comparados à geração de vórtices no escoamento de um fluido ao redor de um cilindro fixo, como mostrado na Fig. 2.1. Esse comportamento consiste em um fenômeno auto excitado, haja vista que não há propriedades alternantes na corrente de ar que se aproxima do cabo.

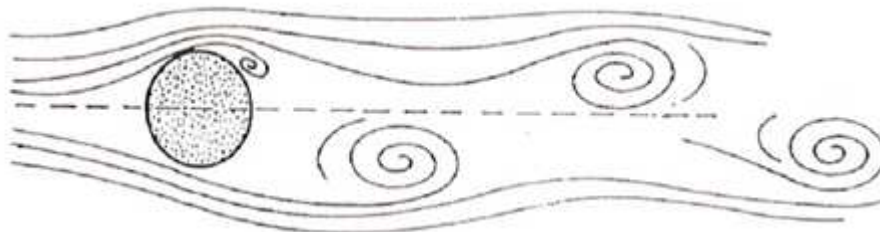


Figura 2.1 – Emissão de vórtices em um perfil circular (Arruda, 1975)

Segundo Fuchs & Almeida (1982) e Anderson & Hagedorn (1993), esse tipo de vibração ocorre em escoamentos à velocidades constantes entre 2 e 35km/h com frequência de excitação variando entre 10-60Hz. Quando a frequência de emissão de vórtices se iguala a uma das frequências naturais do cabo, ocorre o fenômeno da ressonância.

Essas vibrações geram flexões alternadas de pequenas amplitudes nos pontos de fixação/suspensão do condutor, gerando solicitações mecânicas em caráter periódico que provocam a falha dos cabos por fadiga em um determinado número de ciclos. As tensões nos cabos são alternantes e agem em uma direção normal à seção transversal dos cabos. São baixas quando comparadas com o limite de escoamento do material utilizado.

De acordo com Arruda (1975), Além de haver tensões normais, existem também tensões de cisalhamento geradas por esforços de torção. Essas tensões também são pequenas e ocorrem devido à diferença de velocidade entre os vórtices em formação e os vórtices em degeneração.

2.1.2 GALOPE

Para Chabart & Lilian (1998), Galope é o nome dado à resposta dinâmica das linhas de transmissão quando há altas amplitudes e baixas frequências, são extremamente incomuns em climas quentes como o clima brasileiro e bastante comuns em climas frios com temperaturas abaixo de 0°C. Na grande maioria dos casos, há a presença de gelo ao redor dos cabos. Esse gelo altera a área da seção transversal e sua geometria, tornando o escoamento ao redor do cabo aerodinamicamente e aero elasticamente instável, ou seja, há uma distribuição de forças assimétricas com relação à seção transversal do condutor devido à mudança no campo de pressão causado pela alteração da geometria da seção transversal. Para Fuchs & Almeida(1982), esse tipo de oscilação é bastante danosa para a estrutura de suporte dos cabos.

2.1.3 OSCILAÇÃO DE ROTAÇÃO

Fuchs & Almeida (1982), pontuam que esse tipo de oscilação ocorre devido ao gradiente adverso de pressão no escoamento ao redor do perfil da seção transversal do cabo, que se relaciona com a força de arrasto a que o cabo é submetido. Quando essa força alcança a magnitude do peso do cabo, então há uma força resultante que, de acordo com a variação do escoamento, gera oscilações incontroláveis. As oscilações rotativas são comuns em regiões onde há considerável presença de tufões e tornados. Demandam um minucioso estudo das condições climáticas onde se deseja instalar linhas de transmissão.

Assim como o galope, muito comum em regiões onde baixas temperaturas são alcançadas, as oscilações rotativas são incomuns na configuração climática do território brasileiro, mesmo sendo ele bastante variado.

Dos três tipos de oscilações apresentadas para as linhas de transmissão, a predominante é a oscilação eólica causada por emissão de vórtices, sobretudo no território brasileiro. No que se refere aos efeitos causados por esse tipo de vibração, é fato que são extremamente danosos tanto para a estrutura que sustenta as linhas de transmissão, como para as próprias linhas, visto que a falhas se dão em quase sua totalidade por fadiga.

De acordo com Fuchs & Almeida (1982), cabos do modelo ACSR, que são amplamente usados e são compostos de fios de alumínio com alma de aço, são os mais afetados, pois o limite de resistência a fadiga do alumínio é mais baixo do que os limites de aços e ligas de aço. Segundo a ABAL(Associação Brasileira do Alumínio), esse valor varia entre 25% a 50% do limite de resistência

a ruptura, ao passo que, de acordo com Shigley et al(2005), para o aço esse valor gira em torno de 50,4%. As fraturas normalmente se encontram nos pontos de fixação dos cabos, visto que as tensões de flexão nesses pontos são maiores e consequentemente o cabo é mais solicitado mecanicamente.

2.2 DESENVOLVIMENTO DA VIBRAÇÃO EÓLICA EM UM VÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO

Com relação ao desenvolvimento de vibrações nos cabos, Fuchs & Almeida (1982) afirmam que é necessário que as forças aerodinâmicas estejam em fase sobre uma parte da extensão do vão. Sabendo-se que essas forças aerodinâmicas são pequenas, e distribuídas aleatoriamente, pode-se afirmar que há vibração iminente.

De acordo com Arruda (1975), tão logo a vibração no cabo se inicie, ocorre um efeito de sincronização. Esse efeito faz que a emissão de vórtices ocorra de tal forma que as forças ajam no sistema mecânico harmonicamente. Inicialmente, por meio da emissão de vórtices, têm-se forças ascendentes e descendentes ao longo de toda a extensão do cabo. O movimento de vibração tende a sincronizar as frequências de emissão de vórtices e o modo de vibrar do cabo, assim as forças atuantes se harmonizam. Essa sincronização é aumentada com o aumento da amplitude. As auto excitações são caracterizadas dessa forma.

Assim, a transição do estado de vibração irregular para o estado de vibração estável ou permanente, em que os vórtices são regulares, deve ter início por meio de um impulso inicial. Diversos fenômenos podem agir como impulso de partida. Pode-se afirmar que qualquer evento que cause um movimento do condutor favorecerá o efeito de sincronização em alguma parte do vão, dessa forma, inicia-se um processo que levará a vibração a todo vão.

Segundo Arruda (1975), quando se refere a todo o vão, considera-se todo o sistema de transmissão, como as torres, os isoladores, os grampos de fixação, e, em alguns casos, alguns amortecedores e espaçadores. Devido a isso, pode-se notar que os sistemas de linhas de transmissão de energia são bastante complexos. As frequências naturais são muito próximas e a sincronização pode ocorrer em qualquer uma delas, especialmente naquelas que possuem um baixo valor de amortecimento associado.

Em relação à vibração de um vão em geral, percebe-se que ela não começa de forma instantânea; na verdade, existe um período de desenvolvimento, um período seguinte de vibração estacionária e, finalmente, um período curto de enfraquecimento.

No que se refere ao período de desenvolvimento, deve-se considerar um período maior que o necessário para que a energia necessária seja armazenada, pois supõe-se que os ventos mudam gradualmente de estados de turbulência para estados laminares, que são capazes de gerar vibrações.

Quando a frente da corrente de ar passa pelo vão, há várias tentativas de início de vibração. No entanto, pelo fato de a corrente de ar variar com o tempo em vorticidade e velocidade, vibrações instáveis ocorrerão até que o escoamento se torne suficientemente laminar e com variações de velocidade dentro do intervalo crítico no qual o efeito de sincronização ocorre.

Com relação ao período estacionário de vibração, Fuchs & Almeida (1982) lembram que dificilmente ele é encontrado na forma de um simples movimento harmônico. Normalmente se observa o fenômeno do batimento padrão. Pode-se atribuir esse efeito ao fato de haver duas ou mais frentes com diferentes velocidades de escoamento ou ao fato da velocidade do escoamento estar variando no espaço e no tempo, porém dentro do intervalo do efeito de sincronização.

2.3 INTENSIDADE DA VIBRAÇÃO NOS CONDUTORES

Para Liberman & Krupov (1968), o problema das vibrações em cabos condutores está estritamente relacionado a dois fatores: a tensão no cabo e a forma como se dá o escoamento do ar ao redor dele. Este último é uma consequência da topografia da região.

Fuchs & Almeida (1982) consideram que as condições topográficas (natureza do terreno, presença de florestas ou de construções nas imediações das linhas) influenciam nas características do escoamento na camada adjacente a terra e, conseqüentemente, sobre a intensidade de vibração.

Arruda (1975) afirma que estudos em vãos experimentais com excitação artificial têm mostrado que amplitudes consideráveis aparecem no condutor quando a tensão mecânica imposta ultrapassa 4 ou 5 kgf/mm². Com tensões abaixo desses valores, as perdas devido ao amortecimento são tão altas que as vibrações não se tornam perigosas.

Segundo a análise de Arruda (1975), as maiores avarias ocorrem nas seções onde o terreno é plano. Montanhas rugosas e inclinadas, travessias em vales e terrenos bastante acidentados contribuem para o aumento da vida útil dos cabos, visto que eles anulam a característica laminar do escoamento, a qual é extremamente danosa aos cabos.

Visto que essas irregularidades eliminam a característica laminar do escoamento, não há a formação dos vórtices a sota-vento do cabo, dessa forma não há o forçamento do cabo de forma harmônica. Ainda segundo Arruda (1975), são raros os danos nos condutores e eles ocorrem depois de um longo período de uso.

2.4 FORÇAS E DANOS CAUSADOS NOS CABOS E NA ESTRUTURA DE SUPORTE

Dois tipos de forças são as grandes responsáveis por estudos e desenvolvimento de novas tecnologias para linhas aéreas de transmissão de energia: as forças causadas pelo desprendimento de

vórtices e as forças de contato, que são geradas devido à vibração dos cabos e do atrito entre seus fios metálicos.

Arruda (1975) ensina que as forças que atuam nos cabos resultantes da emissão de vórtices podem ser analisadas como uma força aerodinâmica comum, tal como sustentação e arrasto. Essas forças são proporcionais à área lateralmente projetada e à pressão de estagnação do escoamento, sendo extremamente baixas quando comparadas à força peso. No entanto, é notório que se a frequência de aplicação dessa força se igualar a uma das frequências naturais do cabo, então haveria falha por fadiga em certo número de ciclos.

A outra força atuante que merece especial atenção é a relacionada à abrasão, que é um desgaste por atrito. Em condições normais, os problemas gerados por ela são notados mais rapidamente do que os problemas relacionados às forças normais causadas pelos momentos fletores alternados impostos pelo escoamento lateral.

Como normalmente os condutores são formados por vários fios de diâmetros menores dispostos de forma simétrica com relação ao eixo central ou alma do cabo, Fuchs & Almeida(1982) afirmam que o movimento de flexão faz que os fios das camadas exteriores se aproximem do eixo central pressionando as camadas interiores e isso gera a abrasão resultante do atrito entre esses fios. Como resultado da abrasão, há a formação das trincas superficiais que atuam como entalhes e possuem um caráter de concentração de tensão; conseqüentemente, elas reduzem o valor do limite de resistência à fadiga. As zonas afetadas por esse fenômeno geralmente são as primeiras a sofrer ruptura. Essa peculiaridade, como mostra a Figura 2.2, torna difícil a inspeção visual da integridade estrutural, pois as camadas inferiores são as primeiras a sofrerem rompimento e quando se verificam rupturas na camada exterior, é certo que a estrutura do cabo já está completamente comprometida.

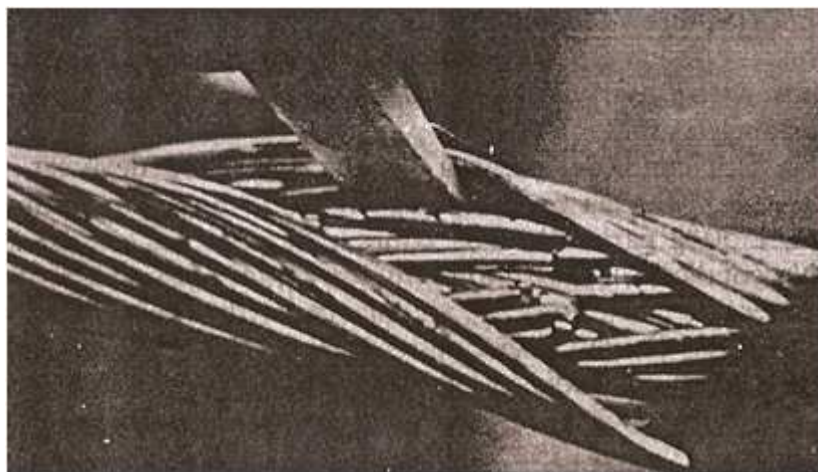


Figura 2.2 – Rupturas e entalhes na segunda camada (Fuchs & Almeida, 1982).

Para Fuchs & Almeida (1982), no que tange à ruptura dos cabos, conforme mostrado na Figura 2.3, elas ocorrem principalmente nos chamados pontos de fixação ou pontos de ancoragem, pois nessas posições os cabos são mantidos estáticos, isto é, com amplitude de movimento nula por causa

da estrutura de suporte, ao passo que a seção imediatamente ao lado é mantida em movimento pela oscilação do cabo. Nessas condições, há formação de um ponto de flexão máxima no cabo, ou seja, nas quais as forças que resultam na geração e crescimento de trincas serão críticas e fatalmente ocorrerá à falha por fadiga do material nesses pontos.

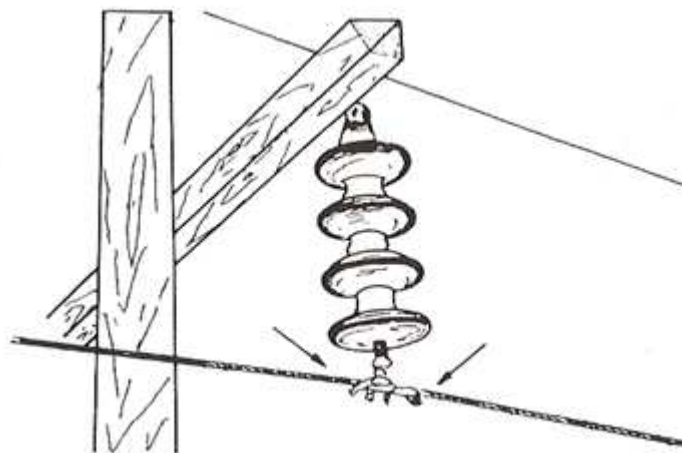


Figura 2.3 – Ponto de ancoragem em um vão de linha de transmissão (Fuchs & Almeida, 1982).

3 ABSORVEDORES DINÂMICOS DE VIBRAÇÕES

Absorvedores dinâmicos são comumente usados em sistemas mecânicos primários para a supressão de vibrações em determinadas faixas de frequências. Os modelos comuns apresentados nesse trabalho estão incluídos na classe de controladores passivos de vibrações. Para De Silva (2000), os controladores passivos, por definição, são compostos de dispositivos que não necessitam de potência externa para seu funcionamento. O controle das vibrações é feito por meio da força em fase oposta que é gerada pelo dispositivo resultante de sua resposta à excitação.

Um absorvedor dinâmico de vibrações (ADV), dispositivo de controle de vibrações passivo clássico, possui parâmetros concentrados de massa, rigidez e possivelmente amortecimento que, uma vez conectados a um determinado sistema excitado por uma força harmônica externa, chamado sistema primário, é capaz de absorver a energia de vibração no ponto de conexão e promover uma redução dos níveis de vibração do sistema primário. Essa absorção acontece por meio de uma redistribuição da energia de vibração no sistema em que certo grau de liberdade tem suas oscilações reduzidas (sistema primário) e outro (absorvedor), aumentadas.

O princípio básico do funcionamento do ADV se baseia na escolha de uma frequência natural do sistema absorvedor de modo que a amplitude de vibração da resposta do sistema primário seja atenuada para uma determinada frequência de excitação harmônica.

3.1 ABSORVEDORES DINÂMICOS DE VIBRAÇÃO NÃO AMORTECIDOS

Os absorvedores dinâmicos de vibrações não amortecidos, quando sintonizados em determinada frequência, são capazes de retirar uma quantia significativa de energia de vibração do sistema primário. Normalmente, busca-se projetá-los de forma que a sintonização se dê na frequência de ressonância do sistema primário. No entanto, os ADVs também podem ser projetados para limitar as vibrações do sistema primário em outras frequências, dependendo dos valores de seus parâmetros, como a rigidez e a massa.

Considere um sistema massa-mola (m_1, k_1) de um grau de liberdade, sem amortecimento, sujeito a uma excitação harmônica. Objetivando-se reduzir as amplitudes de oscilação desse sistema, acopla-se um absorvedor dinâmico de vibrações, composto para um sistema massa-mola (m_2, k_2) secundário, conforma apresentado na Fig. (3.1).

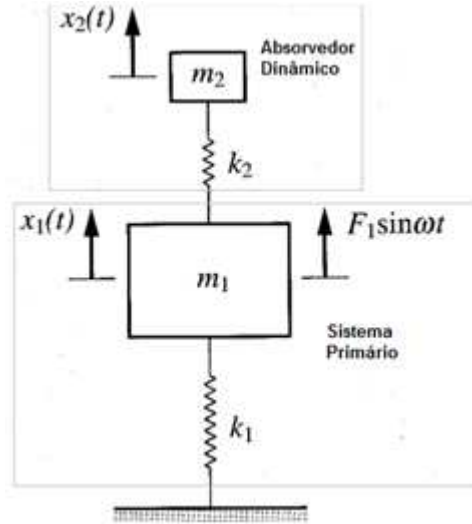


Figura 3.1 – Sistema de um grau de liberdade com adição de absorvedor dinâmico

As equações que governam a dinâmica do sistema são

$$m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 = F_1 \sin(\omega t) \quad (3.1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - k_2 x_1 + k_2 x_2 = 0 \quad (3.2)$$

Para Meirovitch (2001), como não há amortecimento e considerando a resposta harmônica com amplitudes X_1 e X_2 para o sistema primário e o absorvedor dinâmico respectivamente, tem-se

$$x_1(t) = X_1 \sin(\omega t) \quad (3.3)$$

$$x_2(t) = X_2 \sin(\omega t) \quad (3.4)$$

Aplicando as equações (3.3) e (3.4) em (3.1) e (3.2), obtém-se

$$-m_1 X_1 \omega^2 + (k_1 + k_2)X_1 - k_2 X_2 = F_1 \quad (3.5)$$

$$-m_2 X_2 \omega^2 - k_2 X_1 + k_2 X_2 = 0 \quad (3.6)$$

Organizando as equações (3.5) e (3.6) em forma matricial, teremos

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

ou ainda

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 - \omega^2 m_1 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - \omega^2 m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Assim, por meio da equação (3.8), a resposta para o sistema de dois graus de liberdade sem amortecimento mostrado na figura 3.1 será

$$X_1 = \frac{(k_2 - \omega^2 m_2) F_1}{(k_1 + k_2 - \omega^2 m_1)(k_2 - \omega^2 m_2) - k_2^2} \quad (3.9)$$

$$X_2 = \frac{k_2 F_1}{(k_1 + k_2 - \omega^2 m_1)(k_2 - \omega^2 m_2) - k_2^2} \quad (3.10)$$

Considerando as variáveis

$\omega_1 = \sqrt{k_1/m_1}$: Frequência natural do sistema primário.

$\omega_2 = \sqrt{k_2/m_2}$: Frequência natural do absorvedor dinâmico.

$x_{est} = F_1/k_1$: Deflexão estática do sistema primário.

$\mu = m_2/m_1$: Razão entre as massas do absorvedor dinâmico e do sistema primário.

Pode-se reescrever as equações (3.9) e (3.10) da seguinte forma

$$X_1 = \frac{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] x_{est}}{\left[1 + \mu \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \mu \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2} \quad (3.11)$$

$$X_2 = \frac{x_{est}}{\left[1 + \mu \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \mu \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2} \quad (3.12)$$

Como pode ser observado a partir das equações (3.11) e (3.12), para que a amplitude do sistema primário X_1 seja anulada, é necessário que o valor ω_2 da frequência natural do absorvedor dinâmico seja o mesmo da frequência de excitação. Para isso, como já elucidado, devem ser escolhidos parâmetros do absorvedor dinâmico apropriados.

Embora os absorvedores dinâmicos sejam projetados para operarem em uma determinada frequência de excitação ω , eles podem operar de forma relativamente satisfatória em valores de frequências muito próximos de ω . Nesses casos a oscilação do sistema primário não será nula, mas será relativamente baixa.

De forma a analisar a atuação do absorvedor dinâmico de vibrações, considere um ADV acoplada um sistema primário, conforme mostrado na Fig. 3.1, com os parâmetros apresentados na Tab.(3.1) e uma amplitude de forçamento de $F_1 = 1\text{N}$.

Como mencionado anteriormente, o absorvedor dinâmico pode ser usado para reduzir as amplitudes de vibrações do sistema primário em diferentes frequências de excitação, dependendo dos valores de seus parâmetros. No caso apresentado, objetiva-se eliminar as oscilações do sistema primário em sua frequência de ressonância. Desta forma, a partir da Eq. (3.11), tem-se que:

$$\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] = 0. \quad (3.13)$$

Portanto, $\omega = \omega_2$ e ω_2 é regulado de acordo com a frequência que se queira trabalhar. Para o objetivo apresentado, tem-se que $\omega_2 = \sqrt{k_1/m_1}$, ou seja, $\sqrt{k_2/m_2} = \sqrt{k_1/m_1}$. O fator de amplificação ou função de resposta em frequência (FRF) é definido como:

$$G_i(\omega) = \chi_i/F_1 \quad (3.14)$$

Para satisfazer essas considerações, deve-se estimar valores que mantenham essas relações. Dessa forma, os valores apresentados na tabela 3.1 são bastante oportunos.

Tabela 3.1 – Parâmetros para sistema primário e ADV

	Sistema Primário	ADV
Massa (mi)	100 kg	10 kg
Rigidez (ki)	10 N/m	1 N/m

As Figs. 3.2 e 3.3, baseadas na Tab.(3.1), apresentam o módulo da função de resposta em frequência (FRF), $|G_i(\omega)|$, para diferentes valores de ω/ω_1 . A Fig 3.2 apresenta as FRFs do sistema primário sozinho $|G(\omega)|$ e com o ADV, enquanto a Fig. 3.3 apresenta as FRFs comparativas do sistema primário $|G_1(\omega)|$, e do ADV, $|G_2(\omega)|$, quando eles encontram-se acoplados.

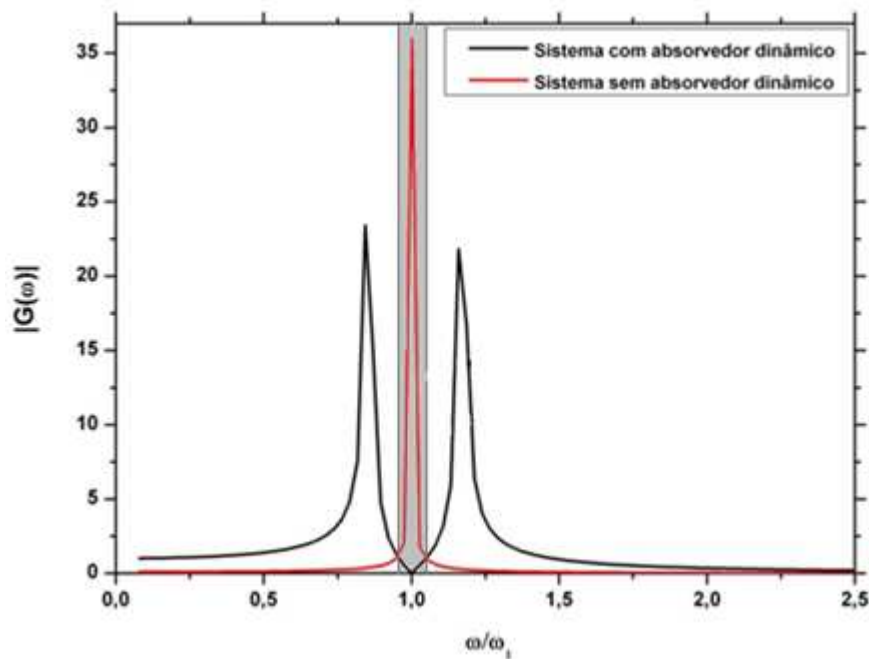


Figura 3.2 – Amplitude do sistema primário com relação a variação das frequências de excitação

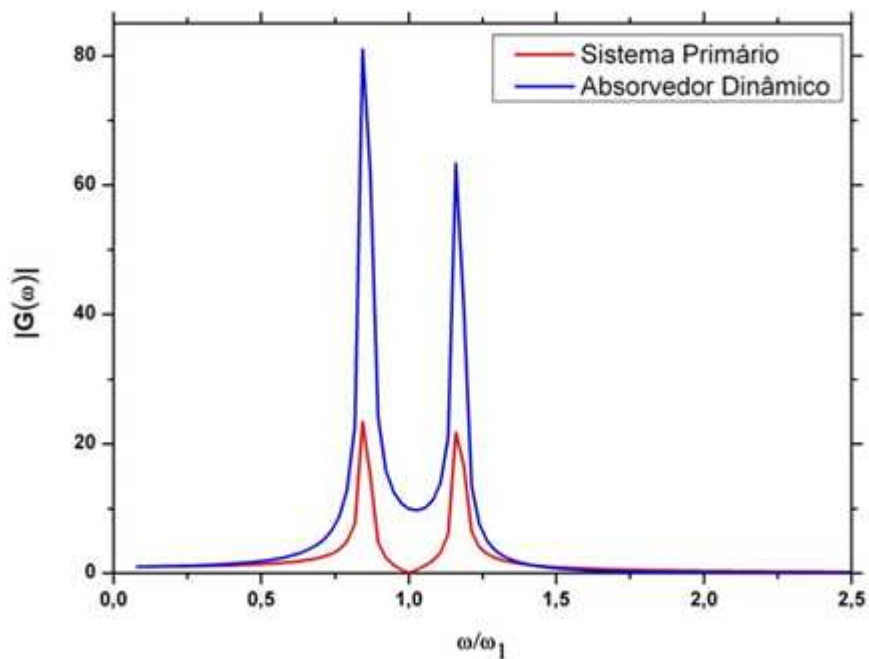


Figura 3.3 – Amplitude Absorvedor Dinâmico em relação a variação das frequências de excitação

Na Fig. 3.2, a faixa cinza representa o intervalo de frequências no qual a ação do ADV sem amortecimento é a mais efetiva possível. Pelas Figs. 3.2 e 3.3 pode-se ver o comportamento do sistema primário e do absorvedor dinâmico respectivamente. O valor 1 no eixo das abscissas nas duas figuras em questão representa a frequência de ressonância. Nessa frequência, pode-se notar que o valor da amplitude correspondente no eixo das ordenadas é nulo para o sistema primário, ou seja, o absorvedor dinâmico atua de forma eficaz.

3.2 ABSORVEDORES DINÂMICOS DE VIBRAÇÃO AMORTECIDOS

Segundo Rao (2008) e De Silva (2000), assim como no absorvedor dinâmico não amortecido, o absorvedor dinâmico amortecido recebe energia de vibração do sistema primário e exerce uma força nele em fase oposta reduzindo as oscilações. No caso com amortecimento, no entanto, a energia recebida pelo absorvedor é gradualmente dissipada. Como apresentado no final da subseção anterior, na Fig. 3.3, os picos gerados que com a adição do absorvedor possuem uma magnitude infinita na ausência de amortecimento. O amortecimento faz que esses picos sejam reduzidos a valores aceitáveis.

Embora o projeto do absorvedor seja realizado para uma dada frequência de trabalho, quando o sistema está iniciando ou finalizando o seu funcionamento, isto é, quando a frequência de excitação está sendo aumentada ou diminuída, ela poderá frequência alcançar os valores das frequências de ressonância e o sistema experimentará grandes amplitudes. Com o amortecimento esses valores são bastante reduzidos.

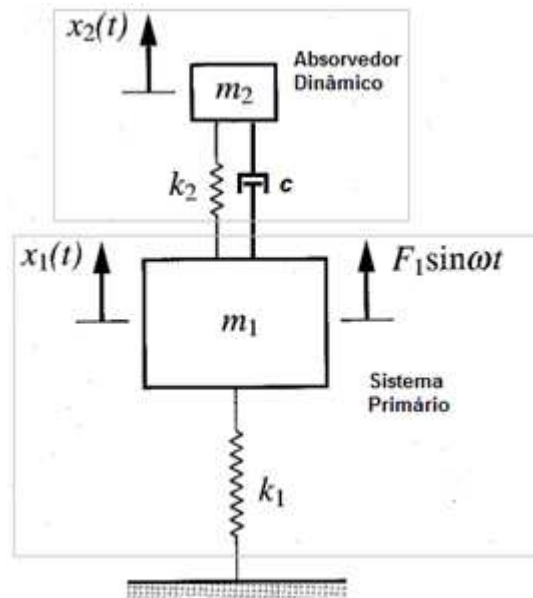


Figura 3.4 - Sistema de um grau de liberdade com adição de absorvedor dinâmico amortecido

Considere agora um sistema de um grau de liberdade com a adição de um absorvedor de vibrações amortecido, como na Fig. 3.4. A seguir, será mostrado como a oscilação do sistema primário pode ser suprimida e como os novos picos de ressonância gerados têm suas amplitudes reduzidas de acordo com o fator de amortecimento adotado.

Utilizando a mesma análise feita na seção 3.1 e adotando os passos realizados da Eq. 3.1 até 3.8, obtém-se a seguinte forma matricial:

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 - \omega^2 m_1 + ic\omega & -ic\omega - k_2 \\ -k_2 - ic\omega & -ic\omega + k_2 - \omega^2 m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Dessa forma, por meio da equação (3.15), a resposta para o sistema de um grau de liberdade com adição de um absorvedor dinâmico com amortecimento mostrado na Fig. 3.4 será

$$X_1 = \frac{(k_2 - \omega^2 m_2 + i c \omega) F_1}{[(k_1 - \omega^2 m_1)(k_2 - \omega^2 m_2) - m_2 k_2 \omega^2] + i \omega c (k_1 - m_1 \omega^2 - m_2 \omega^2)} \quad (3.16)$$

$$X_2 = \frac{X_1 (k_2 + i \omega c_2)}{(k_2 - \omega^2 m_2 + i c \omega)} \quad (3.17)$$

Considerando as variáveis:

- $x_{est} = F_1/k_1$: Deflexão estática do sistema primário.
- $\omega_1^2 = k_1/m_1$: Frequência natural do sistema primário.
- $\omega_2^2 = k_2/m_2$: Frequência natural do absorvedor dinâmico.
- $\omega_2 = \sqrt{k_2/m_2}$: Frequência natural do absorvedor dinâmico.
- $f = \omega_2/\omega_1$: Razão entre as frequências naturais.
- $g = \omega/\omega_1$: Razão entre a frequência de excitação e a frequência natural do sistema primário.
- $c_c = 2m_2\omega_1$: Constante de amortecimento crítico.
- $\zeta = c_2/2m_2\omega_1$: Fator de amortecimento
- $\mu = m_2/m_1$: Razão entre as massas do absorvedor dinâmico e a massa do sistema primário.

Utilizando essas variáveis, pode-se reescrever as equações (3.16) e (3.17) da seguinte forma

$$\frac{X_1}{x_{est}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + (g^2 - f^2)^2}{(2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + [\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)]^2} \right]^{1/2} \quad (3.18)$$

$$\frac{X_2}{x_{est}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + f^4}{(2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + [\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)]^2} \right]^{1/2} \quad (3.19)$$

Observa-se que a amplitude de vibração do sistema primário é dependente dos fatores ζ , μ , g e f . Então, devemos utilizar dados satisfatórios para que X_1 seja reduzido.

Como um exemplo, considere os valores utilizados na Tab. 3.2 e uma amplitude de forçamento $F_1=1\text{N}$.

Tabela 3.2 – Parâmetros para sistema primário e ADV.

	Sistema Primário	ADV
Massa (m_i)	100 kg	10 kg
Rigidez (k_i)	10 N/m	1 N/m

As Figs. 3.5(a) e (b) apresenta a FRF do sistema primário e do absorvedor dinâmico para diferentes fatores de amortecimento ζ respectivamente. Pode-se observar a ação de um absorvedor dinâmico amortecido em um sistema primário. É fácil perceber que quando a frequência de excitação alcança a frequência natural do sistema primário o absorvedor dinâmico reduz consideravelmente as oscilações. Para que essa redução se dê da forma mais eficiente possível, são necessários alguns cálculos de otimização para alguns valores, como ζ , μ , g e f citados anteriormente.

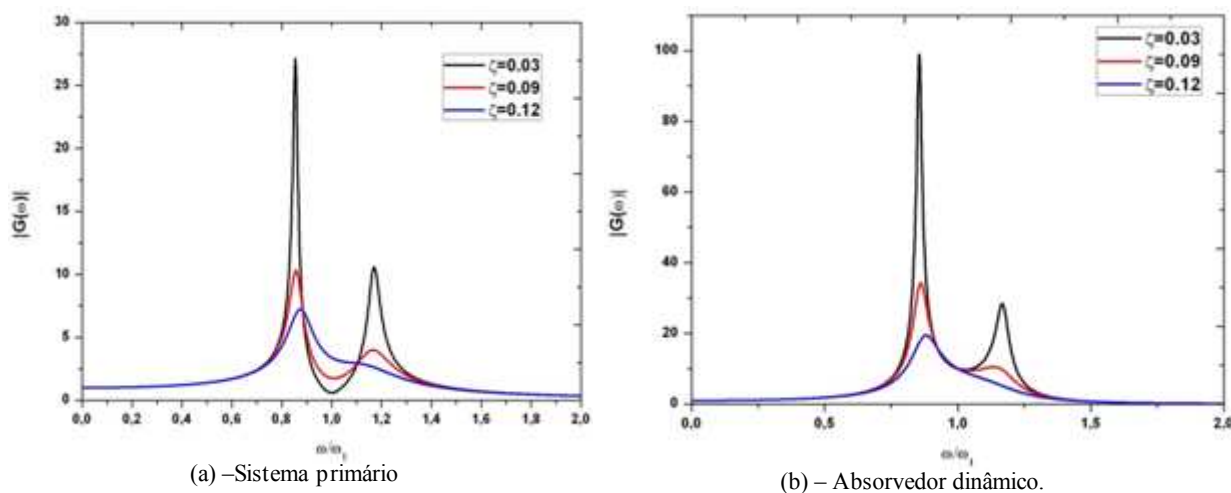


Figura 3.5 – Comparação entre as amplitudes do sistema primário e do absorvedor dinâmico.

4 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

4.1 ASPECTOS GERAIS

Ligas com memória de forma (Shape Memory Alloy, SMA) são materiais que apresentam características de grande interesse em diversos setores tecnológicos. Machado & Savi (2003) e Nogueira (2009) fazem uma revisão da alta versatilidade de aplicações desses materiais em diversas áreas, como nas indústrias de máquinas e equipamentos, de materiais médicos odontológicos e de equipamentos aeroespaciais. Para Savi et al (2006), os fenômenos relacionados à pseudoelasticidade e à quasisplasticidade constituem-se nos principais fatores que têm induzido a grande maioria pesquisas sobre esse tipo de material.

No fenômeno quasisplástico, a liga é capaz de recuperar a geometria original após sofrer grandes deformações residuais (ou de desenvolver consideráveis forças de restituição ao se restringir sua recuperação) através da imposição de um campo de temperatura e/ou de tensão, devido às transformações de fases induzidas no material. A pseudoelasticidade é caracterizada pela recuperação de deformações resultantes de transformações de fases induzidas por tensão. Esse fenômeno é observado nas SMAs submetidas a altas temperaturas, após retirada da carga aplicada. Nesse ciclo de aplicação e retirada de carga, o material apresenta uma grande capacidade de dissipação de energia devido a presença de um laço de histerese. Em geral, essa resposta histerética está associada a transformações microestruturais martensíticas do material. Além disso, Savi et al (2006) em uma análise qualitativa e quantitativa, demonstra que a resposta dinâmica de sistemas com atuadores de SMA apresenta um comportamento intrínseco não-linear.

No que tange as mudanças de fase, Savi et al (2006), Tiseo (2010), Otsuka & Wayman (1998) e Da Silva(2003) afirmam que essas propriedades características das SMAs possuem uma forte relação com temperatura e com tensão. Esses fenômenos ocorrem devido às transformações martensíticas induzidas por tensão ou temperatura. As duas fases básicas que ocorrem nessas ligas são a martensita e a austenita. A porcentagem dessas fases no material está diretamente relacionada com a temperatura a qual o material está submetido e com as tensões aplicadas. A Figura 4.1 apresenta a relação entre temperatura e porcentagem de fases na SMAs. A Figura 4.2 mostra como as temperaturas características das SMAs mudam com uma aplicação de carga.

Otsuka & Wayman (1998) e Lagoudas (2008) apresentam 4 temperaturas distintas que caracterizam as SMAs na ausência de tensões: M_s , M_f , A_s e A_f . A_f corresponde a temperatura acima da qual há somente a presença de austenita estável. M_f corresponde a temperatura abaixo da qual há somente a presença de martensita. M_s e A_s correspondem às temperaturas em que se iniciam a indução térmica de formação de martensita e austenita, respectivamente.

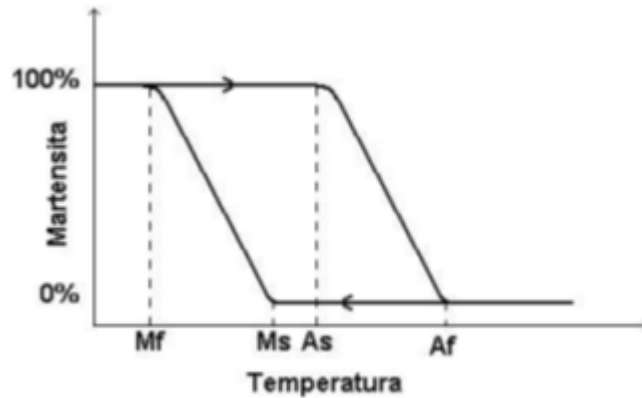


Figura 4.1 – Relação entre temperaturas e fases. Da Silva(2003)

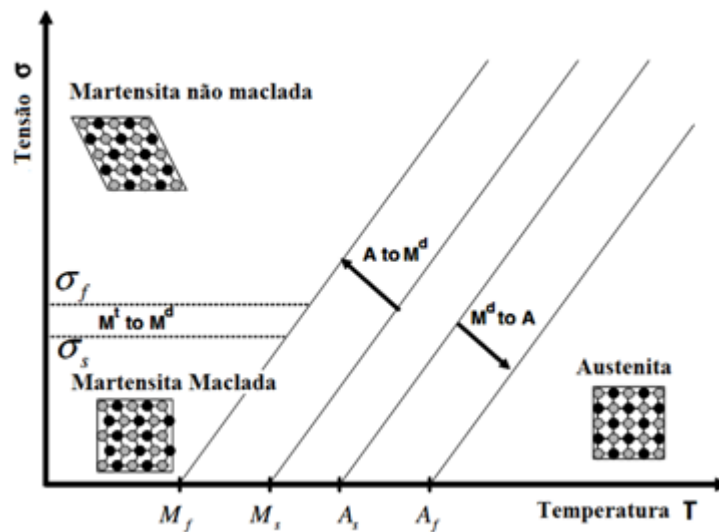


Figura 4.2 – Relação entre carga aplicada e temperaturas características. Lagoudas et al. (2008).

Como pode-se observar na Figura 4.1, quando o material é resfriado a partir de uma temperatura acima de A_f , para uma temperatura abaixo de M_f , há a formação da fase martensítica. Nessa situação, essa fase é caracterizada por possuir várias orientações cristalográficas e é denominada fase martensítica auto acomodada ou maclada. Como exemplo, a liga Ni-Ti apresenta 24 variantes cristalográficas em sua fase martensítica auto acomodada.

De acordo com Machado & Savi (2003) e Otsuka & Wayman (1998), quando o material é submetido à tensão, ocorre uma reorientação das variantes da martensita e apenas uma variante cristalográfica permanece de acordo com a orientação mais favorável da direção de aplicação da tensão. Essa é a chamada fase martensítica não maclada. A fase austenítica apresenta apenas uma direção cristalográfica e é encontrada em temperaturas a partir de A_s , que é a temperatura de início de formação dessa fase. A estabilidade é alcançada somente a partir de A_f , que é a temperatura na qual há somente austenita.

Por meio da Figura 4.3, pode-se notar como ocorre o processo de reorientação da martensita auto acomodada, isto é, aquela obtida a partir do resfriamento da fase austenítica. No item (a) há apenas a fase austenítica, com o resfriamento do material, a fase martensítica é induzida e se forma com várias orientações cristalográficas conforme indica o item (b). Com a posterior aplicação de tensão, ocorre a reorientação da fase e ela passa a ter somente uma variante cristalográfica como apresentado no item (c).

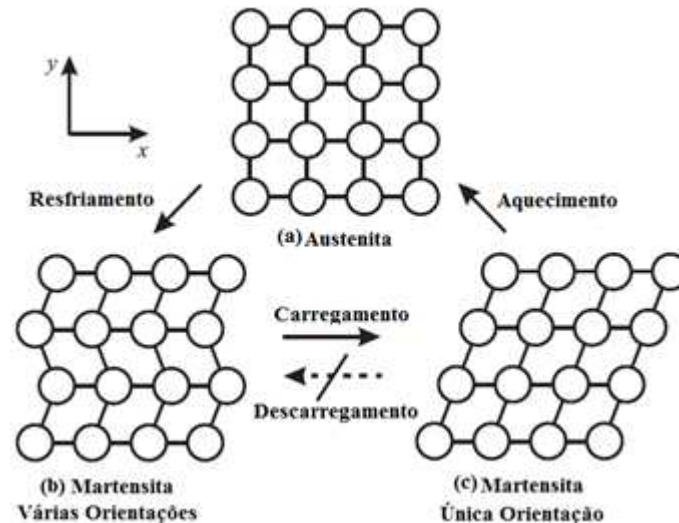


Figura 4.3—Figura esquemática da deformação e recuperação de forma da SMA em nível atômico. (Uehara, 2010).

4.2 EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA E SUPERELASTICIDADE

O efeito de memória de forma e a superelasticidade estão associados com a natureza cristalográfica das transformações martensíticas que aparecem nas ligas de memória de forma. Tais transformações têm sido denominadas “transformações martensíticas termoeelásticas”. Esse nome se origina da característica das transformações martensíticas nas ligas com memória de forma, ou seja, a energia total livre associada com a transformação martensítica termoeelástica consiste principalmente em dois termos termoeelásticos, a saber, a energia livre e a energia elástica. As transformações martensíticas convencionais, as quais aparecem, por exemplo, em aços, consistem na energia de interface entre as fases a de deformação plástica em adição aos dois termos termoeelásticos.

Para Otsuka & Wayman (1998), nas transformações termoeelásticas a interface entre as regiões transformadas e não transformadas se move suavemente de acordo pequenas diferenças de temperatura, ao passo que nas transformações martensíticas convencionais, as transformações ocorrem com uma brusca variação de temperatura. Vale ressaltar que nas transformações martensíticas termoeelásticas não ocorre deformações plásticas, por conseguinte esse é um fator que permite a perfeita recuperação de forma nas transformações reversas em SMAs.

Otsuka & Wayman (1998) reforçam que transformações martensíticas não estão associadas com a mudança na composição do material, dessa forma a relação entre as energias totais livres e as temperaturas características das SMAs pode ser verificada esquematicamente por meio da Figura 4.4.

Nessa figura, T_0 representa a temperatura de equilíbrio termodinâmico entre as duas fases e $\Delta G^{p \rightarrow m}|_{m_s}$ representa a energia necessária para o início da nucleação da martensita. G^m e G^p representam a energia livre de Gibbs para a fase martensítica e austenítica respectivamente. A temperatura T_0 pode ser aproximada pela Equação 4.1.

$$T_0 = \frac{1}{2}(M_s + A_s) \quad (4.1)$$

A energia livre de Gibbs para um sistema de transformações martensíticas pode ser escrito da seguinte forma:

$$\Delta G = \Delta G_c + \Delta G_s + \Delta G_e = \Delta G_c + \Delta G_{nc} \quad (4.2)$$

onde ΔG é o termo referente à energia química, que se relaciona com a mudança estrutural da fase austenítica para a martensítica (transformação direta) ou da martensítica para a austenítica (transformação reversa). ΔG_s é o termo associado a energia livre de interface entre a fase austenítica e a fase martensítica. ΔG_e é o termo que se refere à energia elástica da fase martensítica e $\Delta G_{nc} = \Delta G_s + \Delta G_e$ é o termo de energia não elástica.

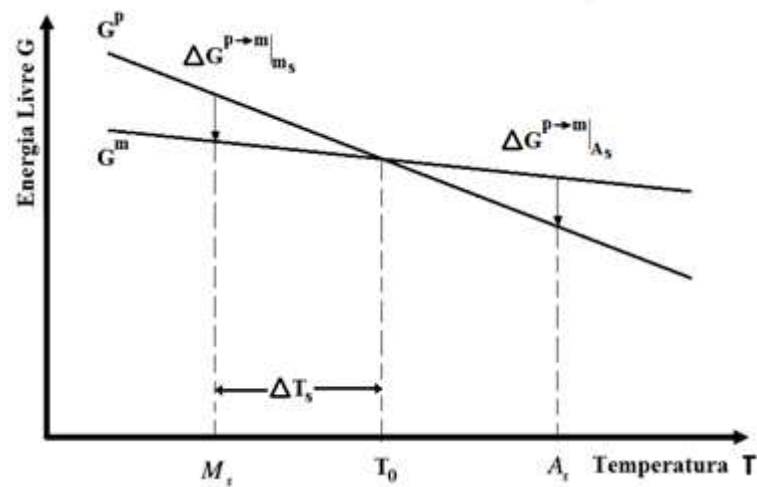


Figura 4.4 – Representação esquemática para as curvas de energia para a fase austenítica e a fase martensítica e suas relações com as temperaturas M_s e A_s . Otsuka & Wayman(1998)

Conforme Otsuka & Wayman(1998), na maioria das transformações martensíticas, ΔG_c é da ordem de ΔG_{nc} e isso consiste em um ponto essencial na discussão sobre essas transformações, pois devido a isso, é necessário um superesfriamento para que haja a nucleação de martensita em uma transformação reversa e um superaquecimento é necessário em uma transformação direta. Por essa razão, tem-se que M_s é diferente de M_f , visto que a energia elástica resiste à nucleação dos grãos e por isso uma energia adicional deve ser fornecida. Essa energia é a fornecida pelo superaquecimento ou super-resfriamento.

4.2.1 ASPECTOS CRISTALOGRÁFICOS DAS TRANSFORMAÇÕES MARTENSÍTICAS

Para Lagoudas et al (2008), no que tange a cristalografia das transformações martensíticas, elas são não-difusivas e ocorrem por causa da distorção por cisalhamento da estrutura cristalina (movimento dos átomos de suas posições originais). Essas transformações possuem características bem definidas que as distinguem de outras transformações. Em um único cristal (um único grão de material poli cristalino), as distorções cisalhantes ocorrem em um plano específico denominado *habit plane* ou *invariant plane*, o qual forma uma interface entre as fases martensíticas e austeníticas. Durante as transformações, esse plano não rotaciona nem se deforma, por isso é também conhecido como *lattice invariant plane*. Por meio da Fig. 4.5, pode-se ver esquematicamente o *habit plane* entre a fase martensítica maclada e a austenítica.

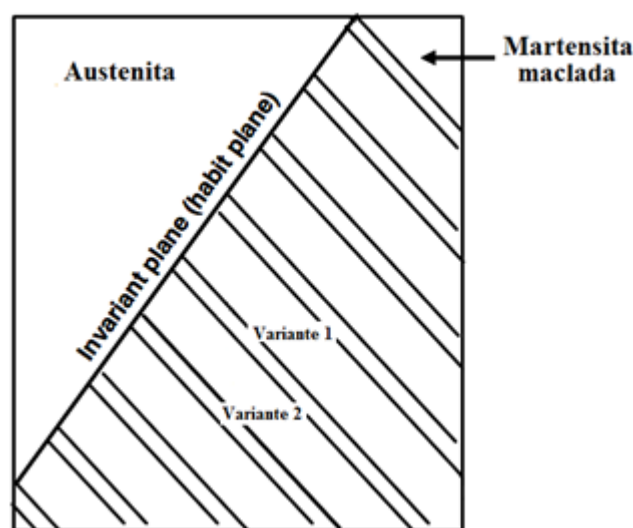


Figura 4.5 – Representação esquemática da interface entre as fases austeníticas e martensíticas (Lagoudas ,2008).

A transformação de austenita para martensita pode ocorrer no *habit plane* por dois diferentes mecanismos. O primeiro é por meio de escorregamento (átomos movendo por um ou mais espaços atômicos) e o segundo é por maclagem (átomos movendo por uma fração de um espaço atômico). Ambos os mecanismos podem auxiliar na formação da martensita com pouca ou nenhuma mudança volumétrica no material. A deformação observada por esses movimentos cooperativos de átomos é referida como uma deformação invariante da estrutura cristalina.

4.2.2 EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA (ONE-WAY)

Lagoudas et al. (2008) afirma que o efeito de memória de forma ocorre a temperaturas abaixo de A_s , na qual há somente martensita maclada não induzida por tensões. Com a aplicação de carregamento no material superior a tensão crítica $\sigma^{crítica}$, há a indução da formação de martensita não

maclada, que pode ser de tração (M^+) ou compressão (M^-). Após o carregamento, permanece uma deformação residual que indica a presença de martensita maclada e não maclada. Transferindo calor ao material ao ponto em que a temperatura A_s é alcançada, inicia-se a transformação de martensita não maclada e maclada para austenita. O resfriamento do material a partir desse estado de fase austenítica acarreta no retorno à forma inicial e a fase presente é novamente a martensita maclada. Por meio das Figuras 4.1 e 4.2, é possível avaliar essa transformação.

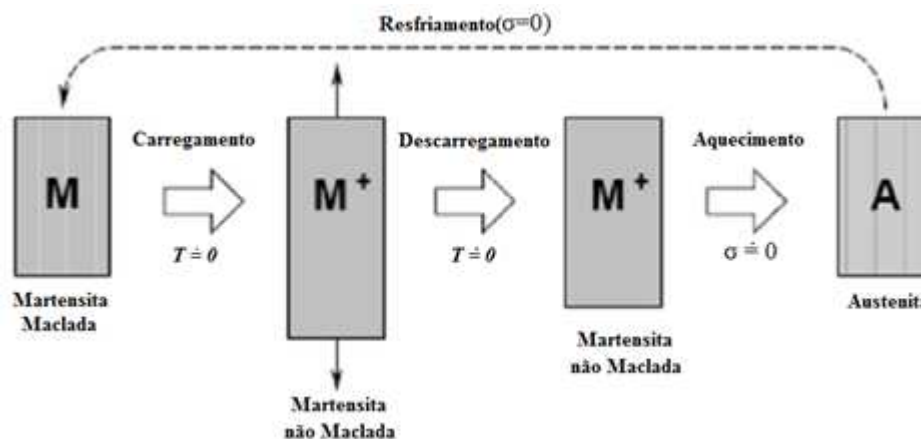


Figura 4.6 – Processos na memória de forma por tração. Fonte: Nogueira (2009).

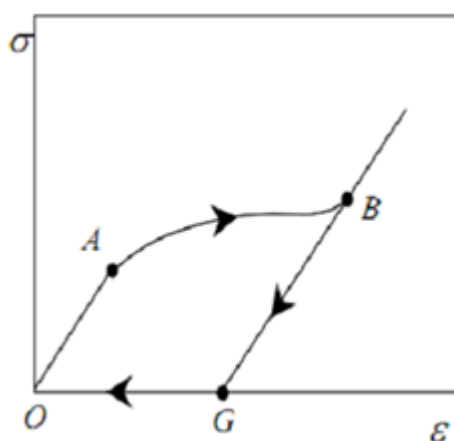


Figura 4.7 – Memória de forma one way em um diagrama tensão-deformação. Machado & Savi (2003).

4.2.3 EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA REVERSÍVEL (TWO-WAY)

Outro tipo de memória de forma associada às SMAs, segundo explica Savi et al (2006), Lagoudas et al(2008) e Otskuka & Wayman(1998) são as de duas vias ou *two-way*. Diferentemente da memória de forma *one-way*, existem duas configurações associadas às duas fases presentes no material. Existe uma determinada forma relativa à fase austenítica em uma temperatura acima de A_f e outra forma relativa à fase martensítica abaixo de M_f . De acordo com Lagoudas et al (2008), algumas vezes, uma SMA pode exibir repetidas mudanças de forma sem necessariamente haver aplicação de carga, mas apenas mudança na temperatura. O efeito de memória de forma *two-way* pode ser observado em SMAs que foram submetidos a repetidos e específicos processos de carregamentos termomecânicos.

Esses processos são denominados de treinamento de liga. Lagoudas et al (2008) explica que o treinamento ocorre por meio de um grande número de ciclos e induz transformações na microestrutura que causam mudanças macroscópicas no comportamento do material. Os ciclos são repetidos até que a resposta histerética do material seja estabilizada e a curva inelástica permaneça constante. Como exemplo de treinamento de liga, Lagoudas et al(2008) apresenta dados relativos a um espécime submetido a ciclos termomecânicos. Na Figura 4.8, para um fio de Ni-Ti, vê-se uma sequência de aplicações de ciclos térmicos em uma tensão constante $\sigma = 150$ MPa e percebe-se como a deformação se estabiliza com a aplicação de vários ciclos. A Fig. 4.9 apresenta como ocorre a estabilização da deformação a partir de carregamentos cíclicos também para um espécime de liga Ni-Ti.

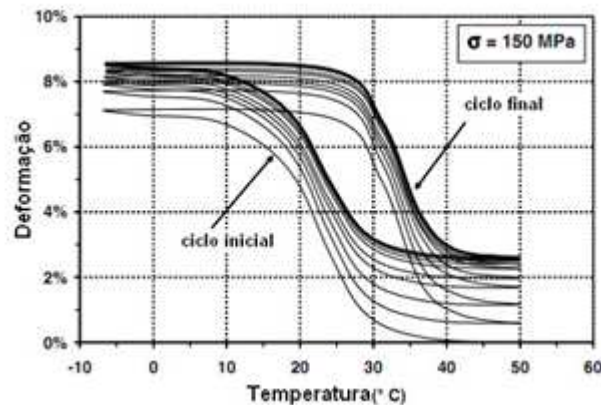


Figura 4.8– Treinamento a partir de 50 ciclos térmicos em um fio de Ni-Ti. Fonte: Lagoudas (2008)

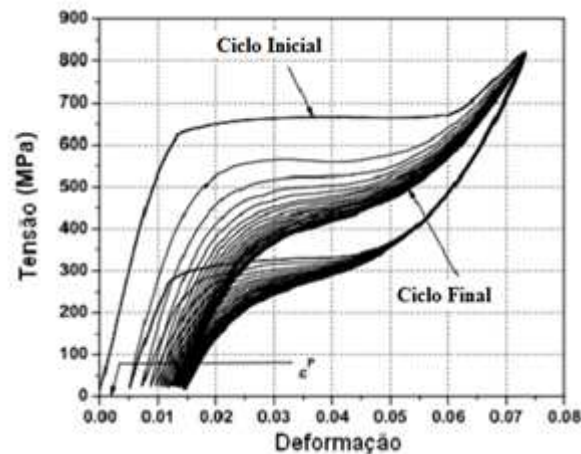


Figura 4.9 - Treinamento a partir de 50 ciclos de deformação em um fio de Ni-Ti. $A_f=65^\circ$ e $T=70$. Lagoudas (2008)

Ainda segundo Lagoudas et al(2008), a memória de forma é resultante de defeitos permanentes introduzidos durante o treinamento. Eles criam tensões residuais internas e dessa forma facilitam a formação de variantes martensíticas preferenciais quando o espécime é resfriado na ausência de carregamentos externos. Se as tensões residuais internas forem modificadas por qualquer razão, seja altas temperaturas, seja altas tensões externas, a memória de forma é perturbada.

4.2.4 EFEITO DE PSEUDOELASTICIDADE

Para Tiseo et al (2010), Machado & Savi (2003) e Lagoudas (2008), o fenômeno da pseudoelasticidade é presente somente em temperaturas que são consideradas altas para as SMAs, isto é, temperaturas que estão acima de A_f . Como já elucidado, esse fenômeno ocorre principalmente na fase austenítica e, de acordo com Lagoudas (2008), está associado a transformações de fase induzidas por tensões de tração ou compressão que geram deformações devido ao carregamento e uma subsequente recuperação da forma inicial com a retirada do carregamento. Durante a aplicação da carga, ocorre no material a formação da fase martensítica não maclada estável induzida por tensão. Com a retirada da carga, o material, enquanto retorna a sua forma inicial, apresenta valores diferentes de elasticidade.

A trajetória O-A da Fig. 4.10 apresenta o material em fase austenítica experimentando um carregamento elástico. Em um valor limite específico de carregamento indicado por A, inicia-se no material a formação de martensita indicado pela trajetória A-B. Percebe-se ainda que o material sofre uma grande deformação inelástica enquanto a martensita é formada. O ponto B indica a finalização da transformação da austenita em martensita e o início do regime elástico martensítico, que apresenta um valor diferente para o módulo de elasticidade do material. Conforme é apresentado na referida figura, uma eventual aplicação de carga nesse regime não leva a mais nenhuma transformação de fase no material.

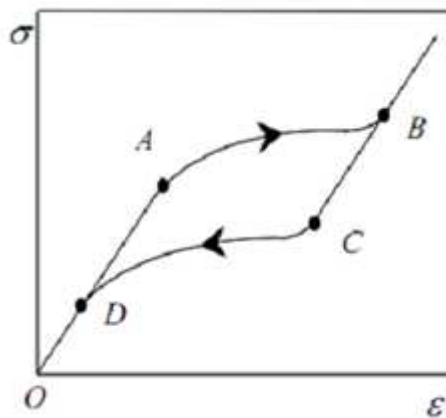


Figura 4.10 – Diagrama σ - ϵ para as ligas de memória de forma. Nogueira (2009)

Ainda com relação a Figura 4.3, a retirada da carga aplicada no material induz a recuperação da forma inicial do material com o início de formação da fase austenítica indicada pela trajetória C-D, em que o material volta ao regime elástico austenítico. Esse ciclo completo de transformação resulta em uma histerese, que é uma dissipação de energia, representada pela área entre os pontos A, B, C e D. Lagoudas (2008) afirma que as tensões mínimas para transformação de fase e as características da curva de histerese no diagrama $\sigma - \epsilon$ variam muito em decorrência do tipo de ligas usada e das condições de ensaio. Para Lagoudas (2008), O termo “pseudoelasticidade” descreve dois

comportamentos, os quais são a superelasticidade e o chamado efeito *rubber like*, que denota algumas similaridades com o comportamento não linear de borrachas. A reversível transformação de fase causada por um carregamento termomecânico é estritamente denominada de comportamento superelástico. O efeito *rubber like* é um comportamento associado unicamente a fase martensítica e ocorre somente devido a reorientação reversível da martensita. Otsuka & Wayman (1998), baseado nos estudos de Ölander(1932), apresenta o comportamento *rubber like* como um fenômeno ainda não completamente entendido. Quando o material é deformado, imediatamente após a transformação martensítica, apresenta um comportamento plástico e exibe memória de forma.

4.3 MODELO CONSTITUTIVOS PARA SMAS

Para que dispositivos compostos por elementos de SMA sejam desenvolvidos ou aprimorados, conforme elucida Savi et al. (2004), faz-se necessário um completo entendimento de suas características termomecânicas. Otsuka & Wayman (1998) pontua que devido ao fato de que o comportamento das SMAs depende de sua “história”, ou seja, dos processos termomecânicos pelos quais foi submetido, é impossível medir a relação entre a tensão, a deformação e a temperatura em todas as circunstâncias. Dessa forma, muitos modelos matemáticos empíricos têm sido propostos para prever o comportamento termomecânico das SMAs. No entanto, esses modelos apresentam consideráveis imperfeições e não são muito detalhados. Como exemplo, ele afirma que a maioria dos modelos considera apenas o estado instantâneo do material, ou seja, as considerações nos modelos abrangem apenas determinadas temperaturas e tensões ou a influência da histerese, mas os processos pelos quais o material passou não são incorporados, visto que são de difícil análise.

Além dessas dificuldades, os modelos matemáticos contêm muitos coeficientes que devem ser determinados experimentalmente. Modelos empíricos são obtidos por regressão de uma limitada quantidade de dados experimentais. No entanto, como supracitado, ainda não são suficientes para determinar de forma completa as relações entre as tensões, deformações e temperaturas para um conjunto de dados. Dessa forma, Otsuka & Wayman (1998) justifica o fato de o campo de aplicações das SMAs ainda ser muito limitado para algumas áreas e a necessidade da realização de mais pesquisas para maior abrangência de suas aplicações.

Savi et al (2002) apresentam um modelo simplificado de uma dimensão para descrever o comportamento das SMAs e sua fenomenologia, desenvolvido com base no modelo de Fremont (1987). O modelo apresentado pelos autores, além de considerar várias variáveis, contempla as quatro fases que podem estar presentes em uma SMA, as quais são a martensita maclada, a martensita não maclada induzida por tração ou compressão e a austenita. Neste modelo, o comportamento das SMAs é descrito a partir de um ponto de vista macroscópico.

Paiva et al. (2005) utiliza o mesmo modelo descrito no parágrafo anterior para avaliar a não simetria presente nas SMAs no que se refere ao comportamento do material quando sujeito a tensões

de tração e compressão. Os referidos autores levantam o fato de o entendimento desse problema ser de vital importância no que tange ao desenvolvimento de dispositivos mecânicos que utilizem essas ligas. Esse modelo tem apresentado resultados bastante próximos de dados experimentais e é adotado neste trabalho para descrever o comportamento termomecânico das SMAs (Maiores detalhes podem ser encontrados em Paiva et al., 2005, Savi & Paiva, 2005; Baêta-Neves et al., 2004; Savi et al., 2002).

As equações constitutivas apresentadas a seguir, que descrevem o comportamento termomecânico da liga, são obtidas a partir da energia livre da mistura ponderada pela fração volumétrica de cada fase. Por simplicidade, retira-se a plasticidade das equações, assumindo-se que todos os estados desenvolvidos estão contidos no interior da superfície de escoamento. Além disso, a assimetria observada no comportamento tração-compressão destas ligas, contemplada pelo modelo, não é considerada.

$$\sigma = E\varepsilon + [E\alpha_h + \alpha](\beta_2 - \beta_1) - \Omega(T - T_0) \quad (4.3)$$

$$\dot{\beta}_1 = \frac{1}{\eta} \{ \alpha\varepsilon + \Lambda(T) + (2\alpha\alpha_h + E\alpha_h^2)(\beta_2 - \beta_1) + \alpha_h [E\varepsilon - \Omega(T - T_0)] - \partial_{\beta_1} J_\pi \} + \partial_{\dot{\beta}_1} J_\chi \quad (4.4)$$

$$\dot{\beta}_2 = \frac{1}{\eta} \{ -\alpha\varepsilon + \Lambda(T) - (2\alpha\alpha_h + E\alpha_h^2)(\beta_2 - \beta_1) - \alpha_h [E\varepsilon - \Omega(T - T_0)] - \partial_{\beta_2} J_\pi \} + \partial_{\dot{\beta}_2} J_\chi \quad (4.5)$$

$$\dot{\beta}_A = \frac{1}{\eta_A} \left\{ -\frac{1}{2}(E_A - E_M) [\varepsilon + \alpha_h \beta]^2 + \Lambda_A(T) + (\Omega_A - \Omega_M)(T - T_0) [\varepsilon + \alpha_h \beta] - \partial_{\beta_A} J_\pi \right\} + \partial_{\dot{\beta}_A} J_\chi \quad (4.6)$$

onde ε representa a deformação, T representa a temperatura, β_1 e β_2 representam a fração volumétrica associada à fase martensítica e β_A está relacionada à fração volumétrica associada à fase austenítica. Além disso, $E = E_M + \beta_A(E_A - E_M)$ é o módulo de elasticidade, $\Omega = \Omega_M + \beta_A(\Omega_A - \Omega_M)$ está relacionado ao coeficiente de expansão térmica e T_0 é uma temperatura de referência. Os sub-índices “A” se referem à fase austenítica e “M” à martensítica.

Os parâmetros $\Lambda = \Lambda(T)$ e $\Lambda_A = \Lambda_A(T)$ estão associados às transformações de fases induzidas por tensão. O parâmetro α_h é introduzido para permitir o ajuste do comprimento e o α auxilia o ajuste da largura do laço de histerese no diagrama tensão-deformação. Os termos $\partial_n J_\pi$ ($n = \beta_1, \beta_2, \beta_A$) são sub-diferenciais da função indicatriz J_π com respeito à n . Essa função indicatriz determina as restrições internas relacionadas a coexistência das fases no modelo. Os termos $\partial_n J_\chi$ ($n = \beta_1, \beta_2, \beta_A$) são sub-diferenciais da função indicatriz J_χ com respeito à n . Essa função indicatriz está associada às condições para correta descrição de sub-loops internos devido à transformação de fase incompleta.

Os parâmetros Λ_A e Λ são funções lineares da temperatura:

$$\Lambda = -L_0 + \frac{L}{T_M}(T - T_M) \quad (4.7)$$

$$\Lambda_A = -L_0^A + \frac{L^A}{T_M}(T - T_M) \quad (4.8)$$

em que T_M é a temperatura abaixo da qual a fase martensítica se torna estável. L_0 , L , L_0^A , e L^A são parâmetros relacionados à tensão crítica para transformação de fase. De forma a contemplar diferentes características da cinética de transformação de fase para o processo de carregamento e descarregamento, é possível considerar diferentes valores para os parâmetros η e η_A , que por sua vez estão relacionados à dissipação interna.

4.4 COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO ESTÁTICO DE UMA SMA NI-TI

Nessa subseção as características das SMAs apresentadas na subseção 4.2 são avaliadas a partir de simulações numéricas utilizando-se o modelo constitutivo proposto por Paiva et al. (2005); Savi & Paiva, 2005; Baêta-Neves et al. (2004); Savi et al. (2002). A liga avaliada é do tipo Ni-Ti e seus parâmetros são elucidados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Parâmetros do SMA

E_A (GPa)	E_M (GPa)	α (MPa)	α_h	L_0 (MPa)	L (MPa)	L_0^A (MPa)	L^A (MPa)
54	42	330	0.0476	0.15	41.5	0.63	185
Ω_A Mpa/K	Ω_M Mpa/K	$T_M(K)$ (K)	$T_A(K)$ (K)	η^L (MPa.s)	η^U (MPa.s)	η_3^L (MPa.s)	η_3^U (MPa.s)
0.74	0.17	291.4	307.5	1.0	2.7	1.0	2.7

4.4.1 PSEUDOELASTICIDADE EM UMA SMA NI-TI

De forma apresentar o comportamento pseudoelástico da SMA elucidado na subseção 4.2, considera-se uma prescrição de deslocamento. Inicialmente, o elemento é distendido de 0.12 mm e, em seguida, comprimido de 0.12 mm a uma temperatura constante de 340K, temperatura superior à T_A .

A Figura 4.11 apresenta o desenvolvimento do carregamento e da deformação no tempo, enquanto a Figura 4.16 mostra a evolução das fases volumétricas, onde β_1 representa a fase martensítica não maclada induzida por compressão, β_2 representa a fase martensítica não maclada induzida por tração e β_3 representa a fase austenítica do material.

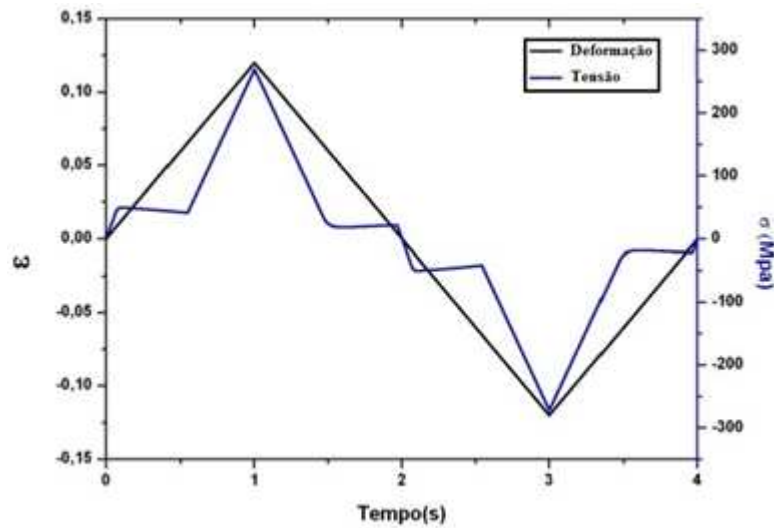


Figura 4.11 - Desenvolvimento da tensão e da deformação com relação ao tempo

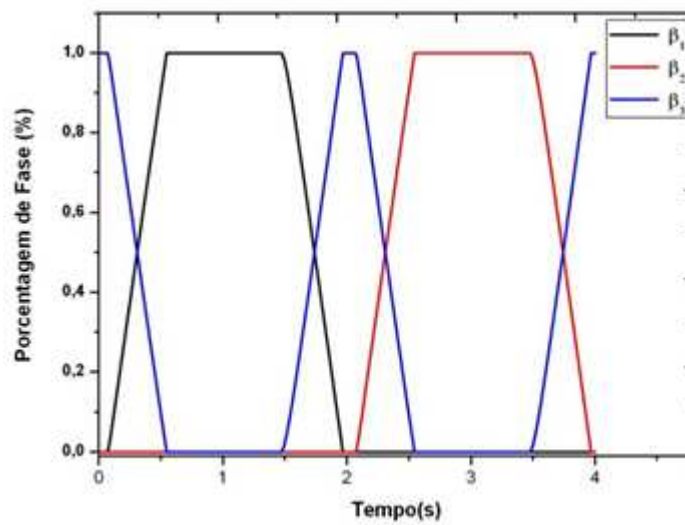


Figura 4.12 – Transformação e percentagem de fase ao longo do tempo para a pseudoelasticidade.

A Figura 4.13 apresenta o diagrama tensão-deformação, onde pode-se notar a presença de laços de histerese mostrando o comportamento pseudoelástico da liga. Esses laços indicam dissipação de energia para transformação de fase. Como descrito anteriormente, nesses laços ocorre a formação de martensita não maclada induzida por tração (M^+) e por compressão (M^-). Quando a transformação de fase é total, vê-se que a SMA volta a apresentar um comportamento elástico e o valor da elasticidade do material é alterado.

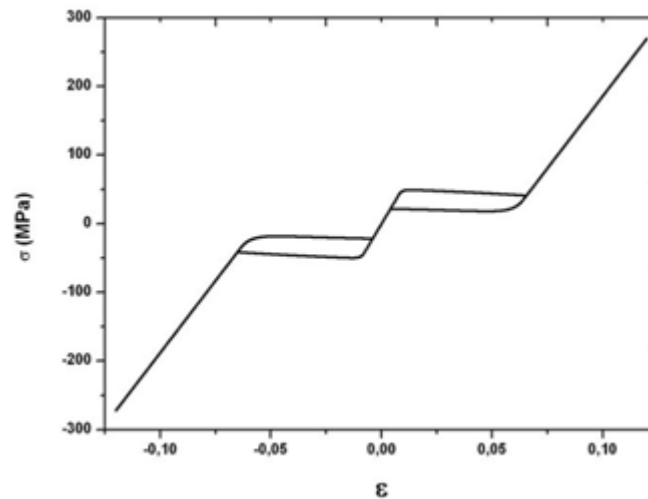


Figura 4.13 - Diagrama de Tensão-Deformação para a liga de memória de forma

4.4.2 COMPORTAMENTO MEMÓRIA DE FORMA EM UMA SMA NI-TI

Neste caso, inicialmente prescreve-se uma história de carregamento a uma temperatura inferior M_f . Nesse carregamento a liga parte do estado livre de tensões, atinge 100MPa em 1s e retorna ao estado livre de tensões em 2s, conforme apresentado na Figura 4.14. Em seguida, a liga é aquecida a uma temperatura acima de A_f , conforme apresentado na Figura 4.15. A Figura 4.14 apresenta o desenvolvimento da tensão e da deformação ao longo do tempo. É notável que no fim da aplicação e retirada do carregamento, em $t=2s$, há uma deformação residual. No entanto, com o aquecimento da liga, ocorre uma recuperação da deformação até o ponto em que esta é nula, conforme pode ser visto na Figura 4.15. Isso indica que o material retornou a sua forma inicial depois do aquecimento a uma temperatura superior à temperatura A_f . A Figura 4.16 apresenta a evolução das fases volumétricas do modelo, onde β_1 corresponde à fase martensítica não maclada induzida por tração, β_3 corresponde à fase austenítica formada por aquecimento e β_4 corresponde à fase martensítica maclada, isto é, livre de tensões.

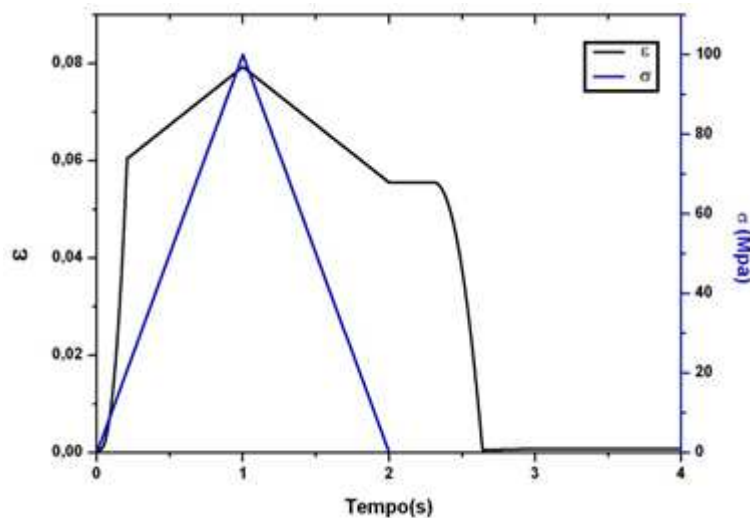


Figura 4.14 – Memória de forma do tipo *one-way* presente na liga a 340K

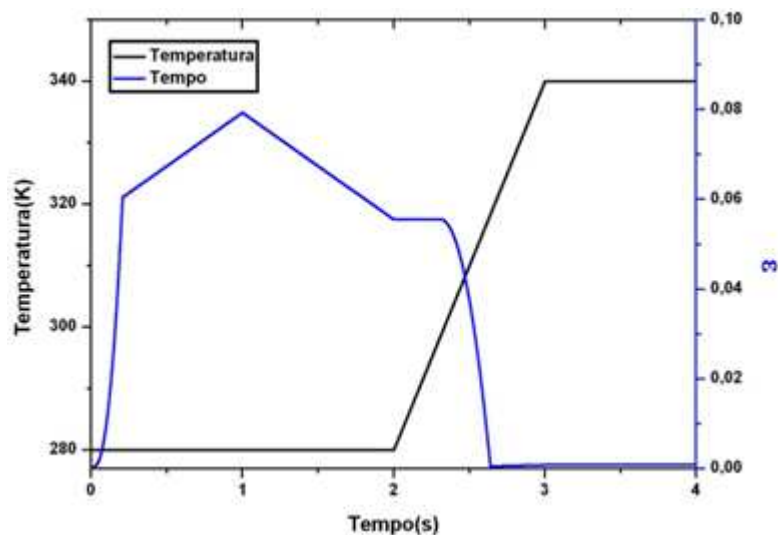


Figura 4.15 – Desenvolvimento da deformação com relação à temperatura e ao tempo

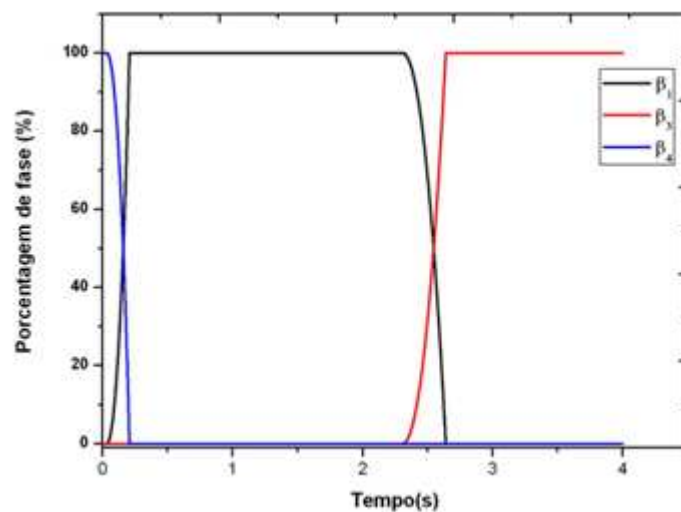


Figura 4.16 – Transformação e porcentagem de fase ao longo do tempo para a memória de forma

Finalmente, a figura 4.17 apresenta o diagrama tensão-deformação onde pode-se notar o efeito memória de forma como resultadas das histórias de carregamento de tensão e temperatura aplicados a liga SMA Ni-Ti analisada.

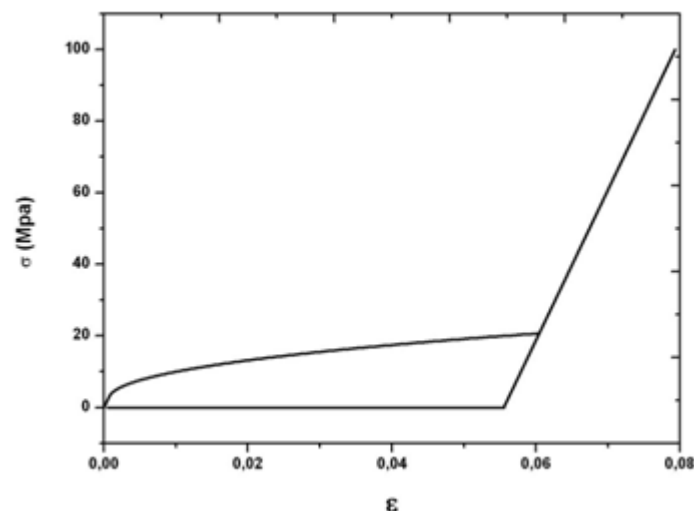


Figura 4.17 – Efeito memória de forma do tipo *one-way* apresentado pela liga analisada.

4.5. UTILIZAÇÃO DE SMAS EM PROBLEMAS VIBRATÓRIOS

As propriedades especiais das SMAs, pseudoelasticidade e quasiplasticidade, faz que esse tipo de material possua um enorme campo de aplicações e uma vasta área de pesquisas e desenvolvimento tecnológico. Ainda que em algumas áreas de conhecimento já exista diversas aplicações, como na área médica (Machado & Savi 2003), o estudo desses materiais carece de pesquisas, envolvendo, por exemplo, o desenvolvimento de modelos constitutivos representativos e a realização de simulações numéricas do comportamento estático e dinâmico das SMAs fiéis às observações experimentais.

Nos últimos anos, diversas aplicações têm explorado as características das SMAs seja por meio da capacidade dissipativa associada ao comportamento histerético no regime pseudoelástico, seja por meio das mudanças das propriedades mecânicas decorrentes das transformações de fase na memória de forma no regime quasiplástico. No primeiro caso, a utilização das SMAs varia desde aplicações em dispositivos mecânicos (Tiseo et al. 2010) até em estruturas civis submetidas a excitação por terremotos, conforme pode-se verificar em Van Humbeeck (2003). No segundo caso, as aplicações devidas a mudanças associadas a transformações de fase, exploram forças e deslocamentos gerados mediante a variação de temperatura, assim como modificações na rigidez e nas frequências naturais (Williams et al., 2002; Pietrzakowski, 2000).

A seguir, são abordados dois trabalhos que utilizam SMAs em problemas vibratórios. O primeiro explora a utilização de SMAs em um absorvedor dinâmico de vibrações (ADV) adaptativo. Neste caso, explora-se a variação das propriedades do material através da mudança de temperatura. A maioria dos trabalhos relacionados a ADVs adaptativos com SMA explora apenas a quasiplasticidade dessas ligas (Williams et al, 2002). O último trabalho apresentado explora a pseudoelasticidade das SMAs para o controle de propagação de trincas.

4.5.1 SMA EM REGIME QUASIPLÁSTICO

Tiseo et al (2010) apresenta um absorvedor dinâmico de vibrações adaptativo para aplicações aeronáuticas baseado em uma SMA com uma alta capacidade de mudança em seu módulo de elasticidade causada por aquecimento. Nesse dispositivo há um fio anexado a barra SMA que funciona como uma resistência elétrica. Com o aumento ou redução da corrente elétrica que atravessa o fio, pode-se controlar a elasticidade da barra SMA por meio do efeito Joule. A Figura 4.18 apresenta o dispositivo em questão.



Figura 4.18 – Absorvedor dinâmico adaptativo proposto por Tiseo et al (2010)

Por meio dessa técnica, a frequência natural do absorvedor dinâmico pode ser alterada em uma larga faixa de frequências para que a frequência de excitação alvo seja alcançada. Tiseo et al (2010) reforça que os absorvedores dinâmicos tradicionais possuem uma limitação em suas aplicações por causa da sua pequena faixa de atuação considerando-se a variação da frequência de excitação. A autora diz ainda que esses absorvedores necessitam ser ajustados de forma muito acurada em frequências específicas para que hajam de forma eficiente. Essa pequena faixa mencionada por Tiseo et al. (2010) pode ser vista na Figura 3.2 da seção 3.

Em seu dispositivo, Tiseo et al (2010) se vale do fato de que quando a SMA se encontra abaixo da temperatura A_s , em que há somente a fase martensítica, o material apresenta baixa rigidez relativa e altos valores de amortecimento. Quando há o aquecimento, a rigidez do material se torna três vezes maior e o amortecimento é bastante reduzido.

4.5.2. SMA EM REGIME PSEUDOELÁSTICO

O controle de vibrações estruturais tem sido utilizado para otimizar o desempenho contra terremotos e respostas sísmicas. O controle passivo de vibrações é uma promissora tecnologia que tem sido largamente utilizado em problemas de excitação por terremotos devido a sua simples configuração, baixo custo, fácil manutenção, e confiabilidade no funcionamento sem a necessidade de uma fonte externa de potência. No entanto, essa tecnologia também apresenta algumas limitações, tais

como problemas relacionados à durabilidade dos equipamentos, à deformações residuais e a necessidade de substituição de alguns componentes após fortes eventos sísmicos. Recentemente, o crescimento do número de pesquisas e o desenvolvimento de materiais inteligentes e dispositivos de controle abrem uma nova área para controle de vibrações sísmicas em engenharia estrutural proporcionando, assim, uma base para o desenvolvimento e exploração de uma nova geração de sistemas estruturais de alto desempenho.

Para Li & Qian(2010), um significativo número de pesquisas tem sido conduzidas no intuito de utilizar SMAs em aplicações sísmicas. Todavia, ainda é necessário um maior entendimento, pois muitos aspectos do comportamento da SMA quando em contato com outros materiais utilizados em estruturas civis ainda não é conhecido. Ainda no mesmo trabalho, a partir de um teste de flexão de três pontos, os autores comparam resultados de testes com vigas de concreto reforçadas com 7 fios de SMAs em fase austenítica e com 7 fios de aço comum para o controle de trincas. Na Figura 4.19 têm-se os resultados para a viga reforçada com aço comum, enquanto na Figura 4.20 são apresentados os resultados para a viga reforçada com SMA. Na Figura 4.20 pode-se perceber o comportamento histerético apresentado pelas SMAs. Depois do surgimento de trincas, a deformação da SMA permanece muito pequena e a tensão também, visto que seu módulo de elasticidade é cerca de 1/5 o valor do aço.

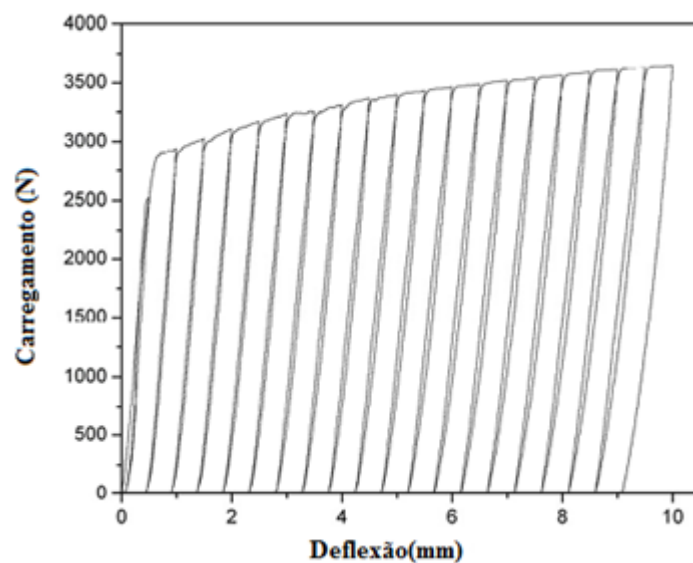


Figura 4.19 – Viga de Concreto Reforçada com Aço Comum (Li & Qian, 2010).

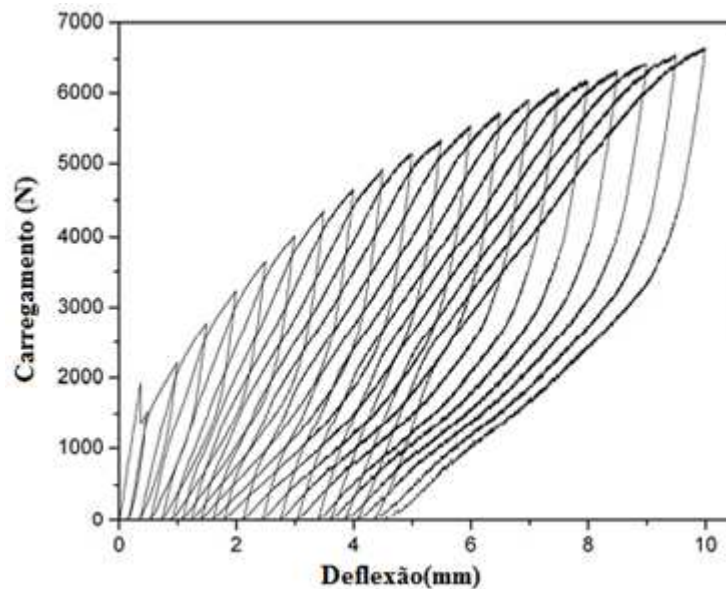


Figura 4.20 – Viga de Concreto Reforçada com SMA (Li & Qian, 2010).

Para ilustrar os efeitos superelásticos no controle de trincas, a Figura 4.21 mostra a relação entre a trinca residual e o número de ciclos de carregamento. Pode-se ver que tanto na viga com aço comum quanto na viga com SMA ocorre o crescimento de trincas; no entanto, as trincas na viga com SMA são menores. Portanto, as SMAs constituem-se em uma excelente alternativa para o controle de trincas em vigas de concreto em excitações sísmicas.

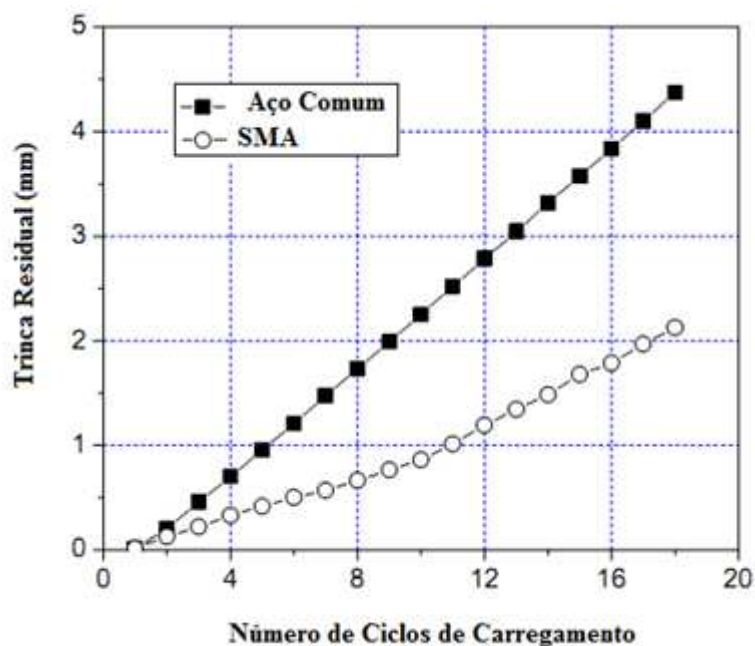


Figura 4.21 – Análise do Crescimento de Trincas (Li & Qian, 2010).

5 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E RESULTADOS

Conforme visto no Capítulo 2, os cabos de transmissão de energia elétrica podem ser excitados em diversas frequências. Por serem sistemas contínuos, possuem vários graus de liberdade e consequentemente várias frequências naturais. Se o cabo for excitado em uma de suas frequências naturais, então haverá o efeito de ressonância, que é extremamente danoso para o cabo e para a estrutura que o sustenta. Absorvedores dinâmicos de vibrações do tipo stockbridge de diversas formas têm sido usados com grande êxito para a amenização das oscilações em cabos condutores de energia. O problema da maioria dos dispositivos projetados para esse fim é a pequena faixa de operação conforme mostrado na Fig. 3.2.

O uso de SMAs em absorvedores dinâmicos é de grande valia e já vem sendo utilizado explorando-se a capacidade de alterar suas propriedades mecânicas e sua forma, efeitos associados à quasilasticidade. Neste contexto, muitos absorvedores são projetados explorando-se a variação da rigidez do elemento de SMA a partir da variação de temperatura e, consequentemente, alterando a faixa de operação do absorvedor (Williams et al., 2002; Pietrzakowski, 2000; Tiseo et al, 2010). O efeito pseudoelástico, ainda que pouco investigado, também pode ser explorado devido ao fato de proporcionar ao material uma grande capacidade de absorver energia quando carregado dinamicamente devido a presença do laço de histerese, conforme mostrado na Fig. 4.10. Nessa absorção de energia, a microestrutura do material é alterada e, consequentemente, sua rigidez também.

O desempenho dos absorvedores dinâmicos está intimamente relacionado com as frequências as quais ele pode atuar e, consequentemente, com a rigidez desse dispositivo. Devido ao comportamento não-linear das SMAs no regime pseudoelástico, um ADV com elementos de SMA não estará restrito a uma única frequência de ressonância como os ADVs com elemento de rigidez linear. O desenvolvimento desse trabalho baseia-se na ideia de que o uso de SMAs em absorvedores possa representar um ótimo ganho em termos de desempenho, haja vista que o ADV poderá dissipar mais energia proveniente da oscilação do sistema primário, devido à presença do laço de histerese, e alargar a faixa de operações apresentada na Fig.3.2, devido às características da ressonância decorrentes das não-lineares. As características não-lineares intrínsecas das SMAs, no entanto, tornam o comportamento dinâmico dessas ligas bastante complexo.

Para que ADVs com elemento de rigidez não-linear sejam projetados e desenvolvidos, como no caso de qualquer sistema mecânico que utilize novos materiais, é muito importante a utilização de um modelo numérico que possa descrever o comportamento desse sistema em diversas situações. Otsuka & Wayman (1998) pontuam que a falta de modelos físico-matemáticos confiáveis que descrevam o comportamento das SMAs se constitui em um dos principais empecilhos no desenvolvimento de projetos de novas tecnologias que contemplem o uso desses materiais. Essa limitação, no entanto, vem

sendo contornada com os modelos desenvolvidos (Paiva et al., 2005; Müller & Wilmanski, 1980 ; Achenbach, 1989; Xu & Morris, 1993; Falk, 1986).

Segundo Shigley et al. (2005), projetar consiste tanto em formular um plano para a satisfação de uma necessidade específica quanto em solucionar um problema. Se tal plano resultar na criação de algo que possui uma realidade física, então o produto deverá ter algumas características muito importantes: funcionalidade, segurança, confiabilidade, utilidade, manufaturabilidade, mercabilidade e competitividade.

No que tange ao desenvolvimento de um ADV não-linear do tipo Stockbridge, as características podem ser definidas da seguinte forma:

Funcionalidade: O ADV deve apresentar um desempenho que atenda às necessidades e expectativas

Segurança: O ADV não deve oferecer risco na sua utilização, ou seja, não deve oferecer risco à integridade estrutural da linha de transmissão. De outra forma o projeto não teria sentido. O ADV deve atender as normas e especificações de segurança.

Confiabilidade: Confiabilidade é a probabilidade condicional, a um determinado nível de confiança, de que o ADV irá desempenhar sua função satisfatoriamente.

Utilidade: O ADV deve ser de fácil instalação e fácil manutenção, atendendo as especificações de tamanho, resistência, alcance e dissipação de energia.

Manufaturabilidade: O ADV deve ser reduzido a um mínimo de componentes, adequados à produção em massa, com dimensões, distorção e resistência sob controle.

Mercabilidade: O ADV deve ser competitivo, ou seja, deve apresentar vantagens em relação aos dispositivos já existentes para a solução dos mesmos problemas de vibrações.

O presente trabalho aborda algumas etapas relacionadas ao entendimento do comportamento do material quando sujeito a carregamentos dinâmicos. Embora seja uma pequena etapa no desenvolvimento de um Stockbridge não-linear, ela é vital, haja vista que o entendimento do comportamento do material é um item fundamental no desenvolvimento do produto de acordo com as características de projeto apresentadas.

Como dito anteriormente, o estudo desenvolvido nesse trabalho se baseia no intuito de desenvolver um ADV com elemento de rigidez SMA que apresente melhores resultados do que dispositivos lineares explorando-se o regime pseudoelástico (rigidez não-linear). Desta forma, considera-se que a temperatura a que o material é exposto está sempre acima de A_f e, conseqüentemente, as transformações de fase do material serão induzida por tensão. Como visto na seção (4.4), o material apresenta um laço ou ciclo de histerese com essa transformação induzida. Esse ciclo é caracterizado por absorção de energia.

Para utilização das SMAs em ADVs é necessário um bom entendimento sobre como os efeitos das não-linearidades, como a presença do laço de histerese, se fazem presentes nesse tipo de material e como o material se comportará quando carregado dinamicamente. Para isso, é interessante a realização de simulações numéricas que possam predizer o comportamento do ADV.

5.1 SISTEMA ESTUDADO

O modelo estudado consiste em um modelo simplificado para descrever o comportamento dinâmico de um Stockbridge. Um protótipo desse dispositivo, desenvolvido por Cachuté & Yamamoto (2009), é mostrado na Fig. 5.1 e possui cabo mensageiro de SMA Ni-Ti.



Figura 5.1 – Stockbridge com elemento de SMA em um cabo de transmissão. Cachuté & Yamamoto (2009)

O modelo simplificado utilizado nesse trabalho consiste, basicamente, em um oscilador de 1G.L. com elemento de rigidez não-linear.

5.2 OSCILADORES 1G.L. LINEAR E NÃO-LINEAR

Nesta seção, após a apresentação dos modelos matemáticos, as respostas dinâmicas de osciladores de 1G.L. com elementos de rigidezes linear e não-linear, composto por SMA, são comparados. Nesta análise, será verificado o comportamento do oscilador SMA em diferentes frequências de excitação. A ideia básica é verificar as características apresentadas na ressonância por esse sistema não-linear, região determinante para o funcionamento do ADV conforme abordado no capítulo 3. O comportamento não linear é caracterizado pela transformação de fase induzida por tensão.

5.2.1 MODELO PARA O OSCILADOR COM SMA

O comportamento dinâmico das SMAs é analisado considerando um oscilador de um grau de liberdade que consiste em uma massa m acoplada a um elemento de memória de forma de comprimento L e área de seção transversal b . Um dispositivo de amortecimento de parâmetro c é também considerado. O sistema é harmonicamente excitado por uma força $F = F_0 \sin(\omega t)$ conforme apresentado na Fig. 5.2.

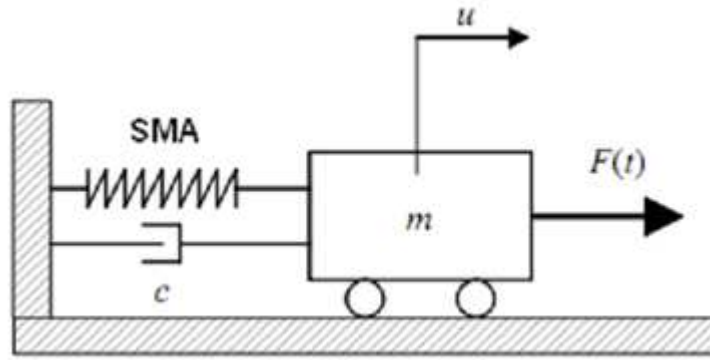


Figura 5.2 – Oscilador de 1 grau de liberdade com elemento de SMA

Com as condições previamente estabelecidas, a equação governante das forças que atuam no sistema podem ser formuladas assumindo que uma força de restituição será fornecida pela SMA através das equações constitutivas apresentadas na seção (4.3). Assim, têm-se as seguintes equações:

$$mu + c\dot{u} + K = F_0 \sin(\omega t) \quad (5.2)$$

A força de restituição é representada da seguinte forma:

$$K = \sigma A \quad (5.3)$$

Utilizando a equação constitutiva relativa a tensão na SMA, obtêm-se:

$$mu + c\dot{u} + E\varepsilon + [\ddot{E}\alpha_n + \alpha](\beta_1 + \beta_2) - \Omega(T - T_0) = F_0 \sin(\omega t) \quad (5.4)$$

Para obtenção da forma adimensional da equação são realizadas as seguintes considerações:

$$\omega_0 = \frac{E_R A}{mL}$$

$$\bar{\alpha}^{c,T} = \frac{\alpha^{c,T} A}{mL\omega_0^2} = \frac{\alpha^{c,T}}{E_R}$$

$$\bar{\alpha}_h^{c,T} = \frac{\bar{\alpha}_h^{c,T} E_R A}{mL\omega_0^2} = \alpha_h^{c,T}$$

$$\bar{\alpha}_h^{c,T} = \frac{\bar{\alpha}_h^{c,T} E_R A}{mL\omega_0^2} = \alpha_h^{c,T}$$

$$\bar{\alpha}_h^{c,T} = \frac{\bar{\alpha}_h^{c,T} E_R A}{mL\omega_0^2} = \alpha_h^{c,T}$$

$$\bar{\Omega} = \frac{\Omega_R A T_R}{\omega_0^2}$$

$$\bar{\alpha}_h^{c,T} = \frac{\bar{\alpha}_h^{c,T} E_R A}{mL\omega_0^2} = \alpha_h^{c,T}$$

$$\mu_\Omega = \frac{\Omega}{\Omega_R}$$

$$\delta = \frac{F_0}{mL\omega_0^2} = \frac{F}{E_R A}$$

$$\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_0}$$

$$\mu_E = \frac{E}{E_R}$$

$$\zeta = \frac{c}{m\omega_0}$$

Para uma avaliação numérica, algumas definições permitem que se tornem adimensionais também as variáveis relacionadas ao deslocamento da massa (U), a temperatura (θ) e ao tempo (τ). Nesta transformação adimensional, apresentada a seguir, (L) representa o comprimento do elemento de rigidez, (T_R) é uma temperatura de referência e (ω_0) é a frequência natural do sistema.

$$U = \frac{u}{L}$$

$$\theta = \frac{T}{T_R}$$

$$\tau = \omega_0 t$$

Ressalta-se que parâmetros adimensionais e variáveis que dependam da temperatura são definidos considerando-se uma temperatura de referência T_R , que é o valor no qual esses parâmetros são avaliados. Portanto, a equação governante adimensional das forças tem a forma:

$$U'' + \xi U' + \mu_E U + (\bar{\alpha}^c + \mu_E \alpha_h^c) \beta_2 - (\bar{\alpha}^T + \mu_E \alpha_h^T) \beta_1 - \mu_\Omega \bar{\Omega} (\theta - \theta_0) = \delta \text{sen}(\bar{\omega} \tau) \quad (5.5)$$

A equação de movimento Eq.(5.5) pode ser avaliada em termos de equações diferenciais de primeira ordem da seguinte forma:

$$x_1' = y_1 \quad (5.6)$$

$$y_1' = \delta \text{sen}(\bar{\omega} \tau) - \xi y_1 - y_E x_1 - (\bar{\alpha}^c + \mu_E \bar{\alpha}_h^c) \beta_2 + (\bar{\alpha}^T + \mu_E \bar{\alpha}_h^T) \beta_1 + \mu_\Omega (\theta - \theta_0) \quad (5.7)$$

5.2.2 MODELO PARA O OSCILADOR LINEAR

Para análise de um oscilador de um grau de liberdade, considera-se um sistema composto por uma massa m_L acoplada a uma massa linear K_L e um amortecimento viscoso c_L conforme mostrado na Fig. 5.3. O sistema está submetido a um forçamento $F_0 = \text{sen}(\omega t)$. Considerando o desenvolvimento inicial feito na seção (5.2.1) para o sistema com rigidez não-linear, a equação que governa o movimento será:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + Ku = F_0 \text{sen}(\omega t) \quad (5.8)$$

Para obtenção da forma adimensional da equação, faz-se as seguintes considerações:

$$Z = \frac{c}{m_L} = 2\zeta\omega_L \quad Y = \frac{K}{m_L} = \omega_L^2$$

Em forma adimensional, têm-se:

$$U'' + 2\zeta\omega_L U' + \omega_L U = \frac{F_0}{m_L} \text{sen}(\omega t) \quad (5.9)$$

A força de restituição do sistema é dada por:

$$K_L = k_L u \quad (5.10)$$

A frequência natural é fornecida por:

$$\omega_L = \sqrt{\frac{k_L}{m_L}} \quad (5.11)$$

A Eq. (5.9) de movimento pode ser avaliada em termos de equações diferenciais de primeira ordem da seguinte forma:

$$x_2' = y_2 \quad (5.12)$$

$$y_2' = \frac{F_0}{m_L} \text{sen}(\omega t) - 2\zeta\omega_L y_2' - \omega_L x_2 \quad (5.13)$$

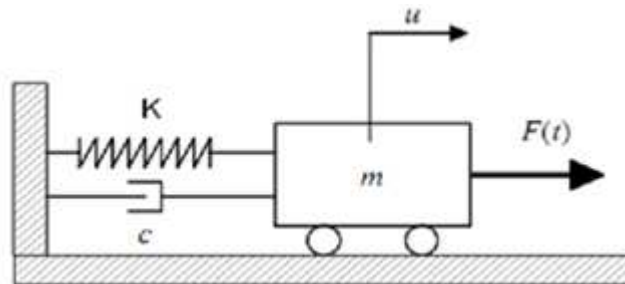


Figura 5.3 – Oscilador de 1 grau de liberdade sem SMA

5.2.3 RESULTADOS PARA O OSCILADOR LINEAR

Iniciando-se a análise pelo modelo com rigidez linear, considera-se que $m_L = k_L = 1$, uma frequência de excitação de $\omega = \omega_L = 0.72\omega_0$ e uma amplitude de forçamento, $F_0 = \delta_L m_L \omega_0^2$, sendo $\delta_L = 0.001$. O termo $\omega_0^2 = \frac{E_R A}{mL}$ está associado a frequência natural do oscilador de SMA estudado antes de entrar no laço de histerese. Como o sistema é não-linear, seu comportamento é muito mais complexo e a ressonância possui diferentes características, não ocorrendo em $\bar{\omega} = 1$, ou $\omega = \omega_0$, conforme será abordado ainda neste capítulo. Além disso, o coeficiente de amortecimento é $c_L = \xi_L m \omega_0$. A Fig. 5.4 (a) e (b) apresentam a resposta do sistema para o caso sem amortecimento viscoso e para o caso com uma dissipação viscosa de $\zeta_L = 0.05$, respectivamente.

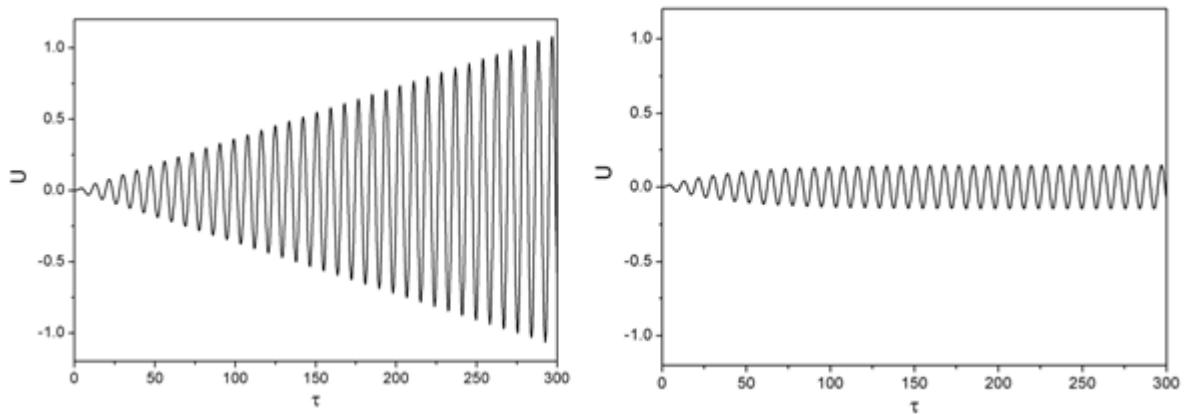


Figura 5.4 – Resposta do oscilador linear para $\omega = \omega_L$. a) Sem dissipação viscosa; b) $\zeta_L = 0.05$.

A Fig. 5.4 (a) apresenta a resposta de um sistema típico em ressonância sem dissipação viscosa, quando a amplitude de resposta cresce indefinidamente. Quando uma dissipação é adicionada, o sistema tende a estabilizar a resposta em uma determinada amplitude conforme pode ser visto na Fig. 5.4 (b).

5.2.4 RESULTADOS PRELIMINARES PARA O MODELO COM RIGIDEZ NÃO-LINEAR (SMA)

Neste ponto considera-se o mesmo sistema oscilatório de um grau de liberdade, todavia, substitui-se o elemento elástico linear por um elemento de SMA. Os parâmetros utilizados nas simulações numéricas são apresentados na Tab. 4.1 da seção (4). As simulações são realizadas a temperatura de 340K, ou seja, em que somente a fase austenítica é estável no estado livre de tensão.

Inicialmente considera-se a mesma frequência de excitação imposta ao oscilador linear, $\bar{\omega} = 0.72$, e ausência de dissipação viscosa. A Fig. 5.5 (a) apresenta a resposta do oscilador no tempo, onde pode-se observar os ciclos de tensão e compressão pelos quais a SMA foi submetida, enquanto a Fig. 5.5 (b) mostra o diagrama de tensão-deformação correspondente. A Fig. 5.6 (a) e (b) apresentam os mesmos resultados para o caso com dissipação viscosa de $\zeta_L = 0.005$.

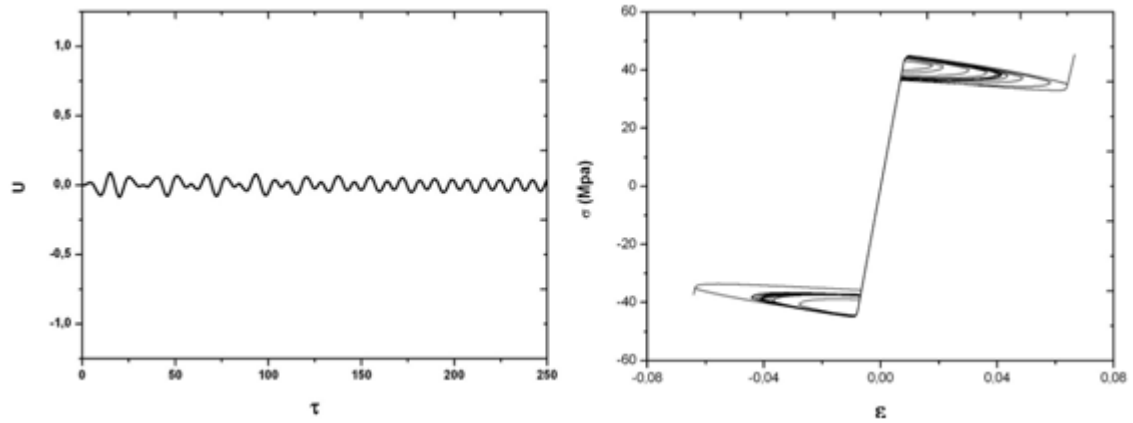


Figura 5.5 – Comportamento do sistema para $\bar{\omega}=0.72$, $\zeta_L=0$ e $T= 340K$: (a) Resposta no tempo; (b) Diagrama tensão-deformação.

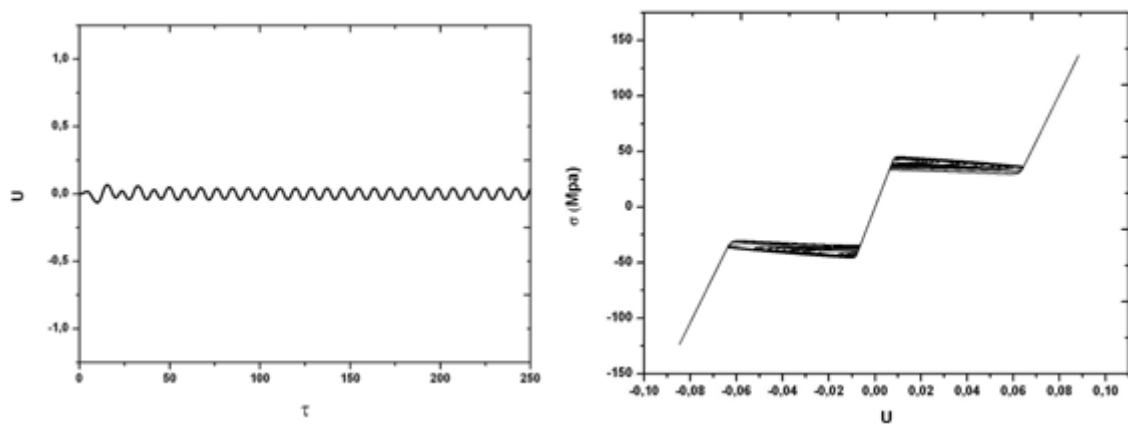


Figura 5.6 – Comportamento do sistema para $\bar{\omega}=0.72$, $\zeta_L=0.05$ e $T= 340K$: (a) Resposta no tempo; (b) Diagrama tensão-deformação.

Percebe-se pela Fig.5.5 que no caso em que não há amortecimento viscoso o laço de histerese possui uma área maior no diagrama. A energia dissipada pela SMA é maior devido ao fato de não haver dissipação viscosa no sistema. Em contrapartida, a amplitude das oscilações também são ligeiramente maiores do que no caso com dissipação viscosa. Para o caso com amortecimento viscoso, conforme pode ser observado na Fig. 5.6, o laço de histerese é menor.

5.3 ANÁLISE DINÂMICA NUMÉRICA DO OSCILADOR COM SMA

Segundo Savi (2006), em um sistema mecânico com rigidez não-linear as não-linearidades do sistema tendem a deformar a curva de ressonância. Essa deformação está associada a um fenômeno conhecido como salto dinâmico. Na medida em que se aumenta a amplitude de oscilação, o sistema passa por uma descontinuidade denominada salto dinâmico, conforme apresenta a Fig. 5.10. Com a diminuição da frequência, o salto dinâmico ocorre em uma frequência diferente da primeira. Esses saltos dinâmicos conferem duas características importantes ao sistema: A primeira está relacionada a uma mudança brusca na resposta do sistema para pequenas variações na frequência de excitação; a

segunda característica, por outro lado, é a existência de uma região de instabilidade, associada à presença de duas órbitas coexistentes para os mesmos parâmetros. Uma dessas órbitas é identificada aumentando-se a frequência de forçamento enquanto a outra quando diminui-se a frequência.

5.3.1 ANÁLISE DA RESSONÂNCIA DO OSCILADOR SMA

A partir das equações 5.6 e 5.7 e do modelo constitutivo proposto por Paiva et al. (2005); Savi & Paiva (2005); Baêta-Neves et al. (2004); Savi et al. (2002), faz-se uma análise do comportamento dinâmico do oscilador SMA para diferentes amplitudes e frequências de forçamento buscando-se avaliar as características apresentadas pelo sistema na ressonância. Nesta análise, avaliam-se as amplitudes máximas de oscilação assim como a evolução do diagrama tensão-deformação.

Análise para $\delta = 0.0001$:

Inicialmente considera-se uma amplitude de forçamento pequena ($\delta = 0.0001$). Para esta amplitude são realizadas duas análises. Na primeira, a frequência de forçamento, $\Omega = \omega$, é aumentada de 0.7 até 1.6 de forma quasi-estática e as amplitudes máximas de resposta do oscilador são verificadas, conforme apresentado na Fig 5.7. Em seguida, uma análise semelhante é considerada, no entanto, diminuindo-se a frequência de forçamento, como apresentado na Fig. 5.8. Nessa primeira análise observa-se que o sistema não apresenta não-linearidades tanto para o aumento quanto para a redução da frequência de excitação, ou seja, o material não entra no laço de histerese. Dessa forma, obtêm-se um comportamento típico de um sistema com elemento de rigidez linear (Fig. 5.7 e 5.8).

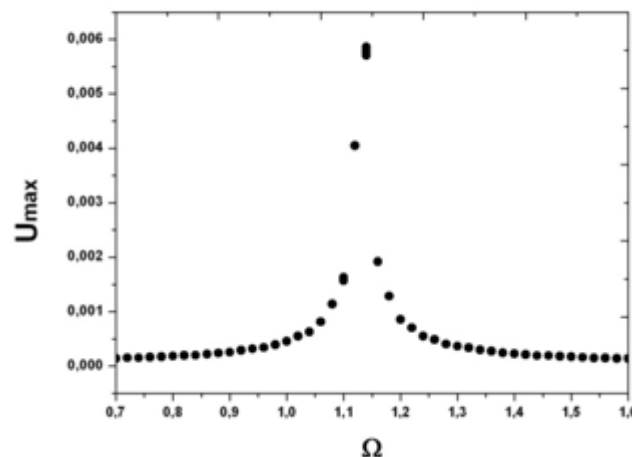


Figura 5.7 – Amplitudes máximas de resposta aumentando-se a frequência de forçamento para $\delta=0.001$.

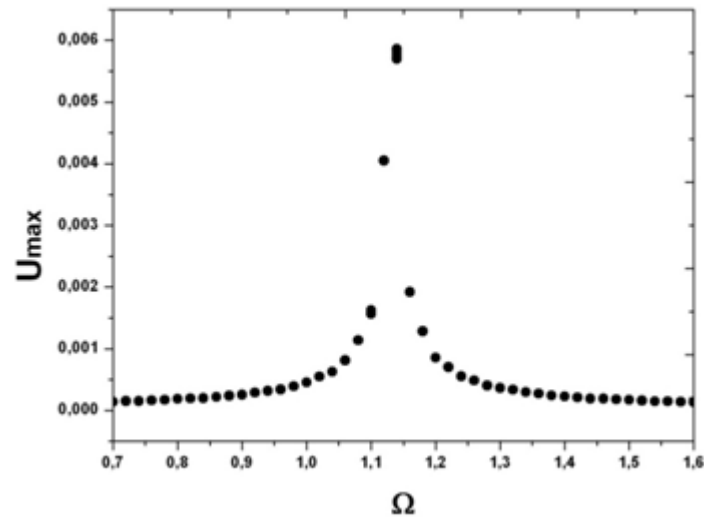


Figura 5.8 – Amplitudes máximas de resposta diminuindo-se a frequência de forçamento para $\delta=0.001$.

Análise para $\delta = 0.008$:

A mesma análise considerada anteriormente é agora realizada para uma amplitude de forçamento de $\delta = 0.008$. A Fig. 5.9 apresenta os resultados para o caso de aumento da frequência de forçamento. Nota-se que na frequência de aproximadamente $\Omega = 0.8\text{Hz}$, as não-linearidades presentes resultam na ocorrência de salto dinâmico.

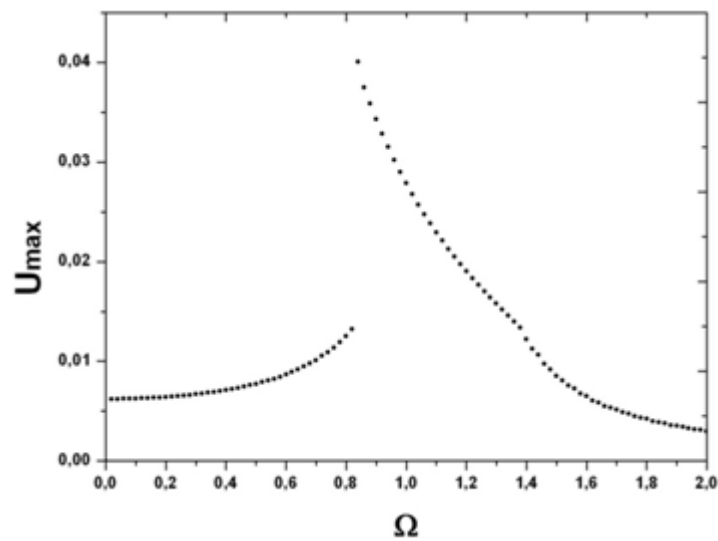


Figura 5.9 – Amplitudes máximas de resposta aumentando-se a frequência de forçamento com $\delta=0.008$.

Para entender o que acontece no material quando o salto dinâmico ocorre, uma análise do diagrama tensão deformação para várias frequências de forçamento é apresentada na Fig. 5.10 (a)-(f).

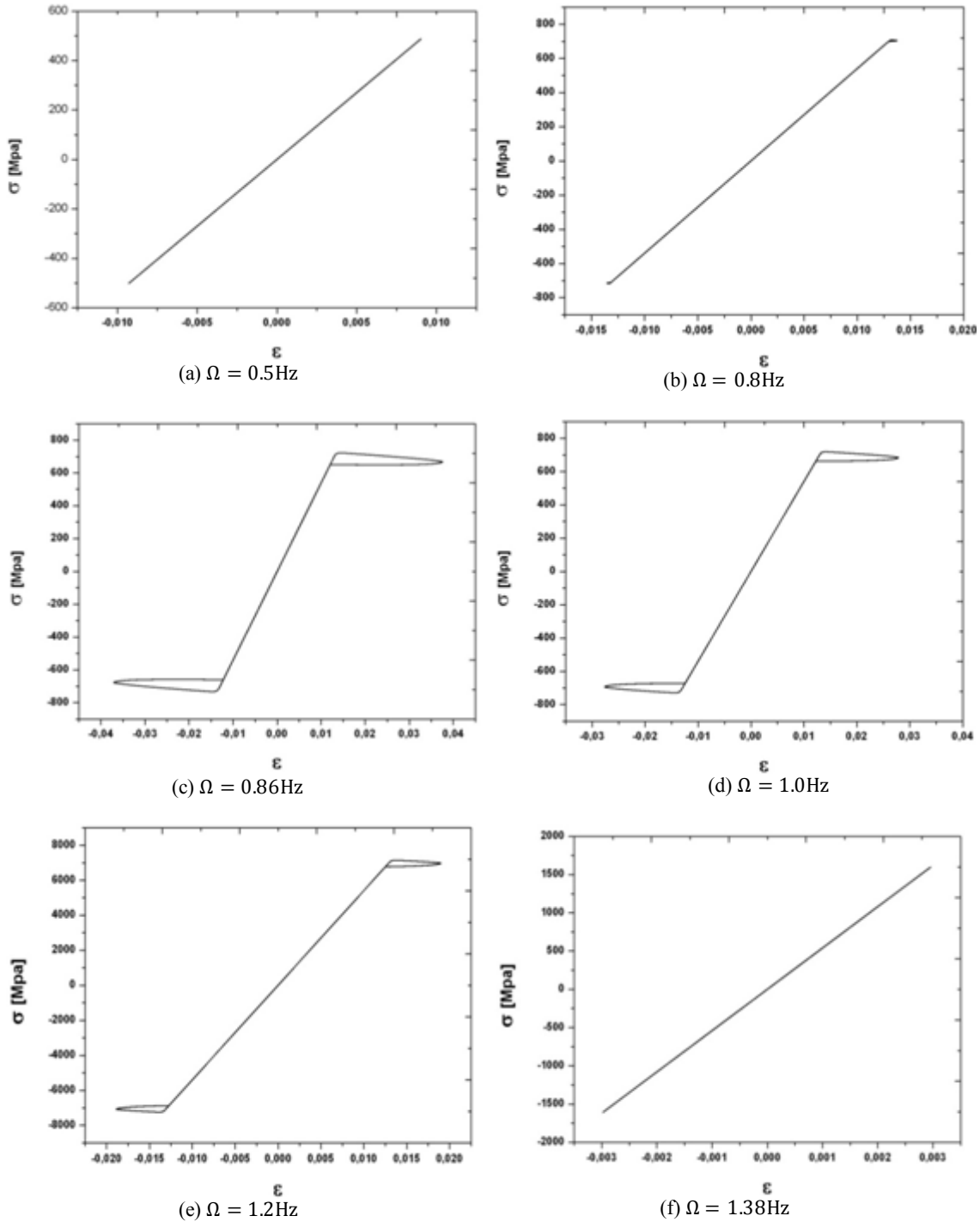


Figura 5.10 – Diagramas tensão-deformação para diferentes frequências de forçamento com $\delta=0.008$

Pode-se notar que quando a frequência está em torno de $\Omega = 0.8\text{Hz}$ (Fig. 10(b)), inicia-se a formação do laço de histerese. Nas frequências anteriores a $\Omega = 0.8\text{Hz}$ (Fig 10(a)), o sistema se comporta de forma linear. Conforme a frequência é aumentada, o ciclo de histerese se estabelece (Fig. 10(c)). Com o contínuo aumento da frequência, vê-se que o ciclo de histerese permanece, todavia ele diminui de acordo com o aumento da frequência conforme mostra a Fig 10(c)-(e). Finalmente, para $\Omega = 1.38\text{Hz}$, o sistema pára de entrar no laço e volta a se comportar de forma linear.

Analisando esses gráficos de tensão deformação (Fig. 10(a)-(f)) juntamente com o gráfico de amplitudes máximas (Fig. 5.9), percebe-se que existe uma relação entre o salto dinâmico e a presença do laço de histerese. Na frequência em que ocorre o salto dinâmico (um pouco após $\Omega = 0.8\text{Hz}$) o sistema começa a entrar no laço de histerese (Fig. 5.10(c)). A partir desse ponto, com o aumento da frequência, vê-se que a amplitude máxima diminui, assim como a área do ciclo de histerese, até a situação em que o sistema volta a apresentar uma característica linear ($\Omega = 1.38\text{Hz}$) (Fig. 5.10(f)).

Dessa análise numérica, pode-se inferir que existe uma estreita relação entre o salto dinâmico e o comportamento não-linear do sistema. O salto dinâmico indica que a tensão na SMA é suficiente para que se inicie a transformação de fase induzida por tensão, isto é, esse salto indica que as tensões críticas σ^+ e σ^- são alcançadas. Como visto na subseção 4.4, essa transformação gera uma alteração na rigidez do material. Segundo Tiseo et al. (2010), a fase austenítica geralmente apresenta uma rigidez 3 vezes maior do que a rigidez da fase martensítica. Com o início da transformação de fase, o material se torna menos rígido e isso permite que a maiores amplitudes sejam alcançadas. Assim, é possível entender a mudança que ocorre na amplitude do sistema para uma frequência um pouco maior que 0.8Hz (Fig. 5.10(c)).

Neste ponto, uma análise semelhante é realizada para $\delta = 0.008$, no entanto, diminuindo-se a frequência de forçamento. Por meio da Fig. 5.11, nota-se que ocorrem dois saltos dinâmicos, o primeiro próximo de $\Omega = 0.6\text{Hz}$ e o segundo em torno de $\Omega = 0.4\text{Hz}$.

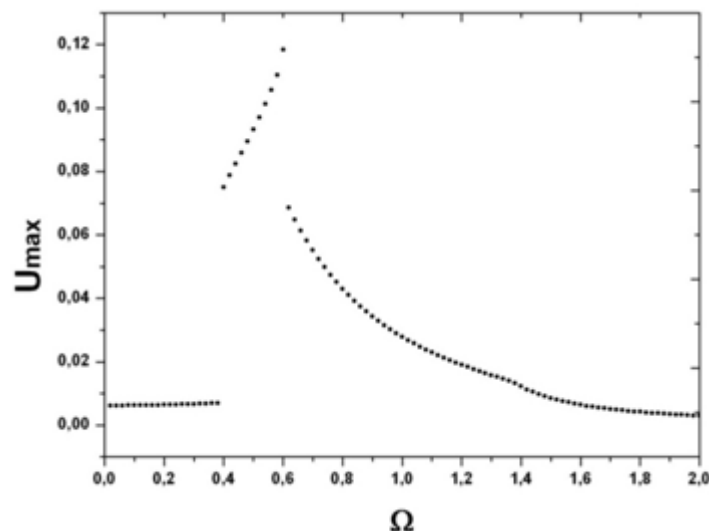
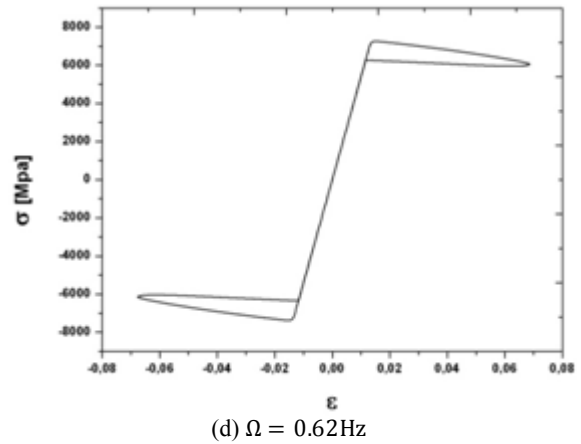
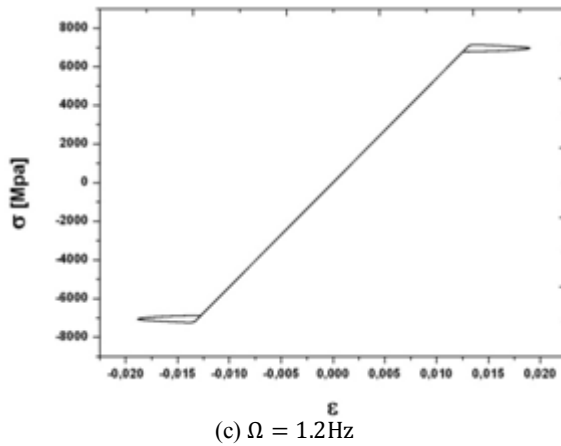
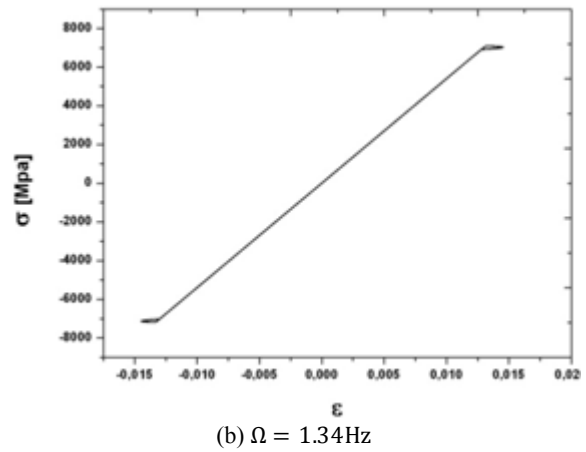
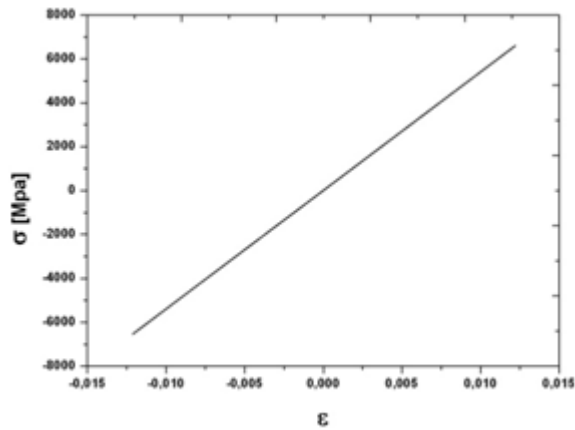
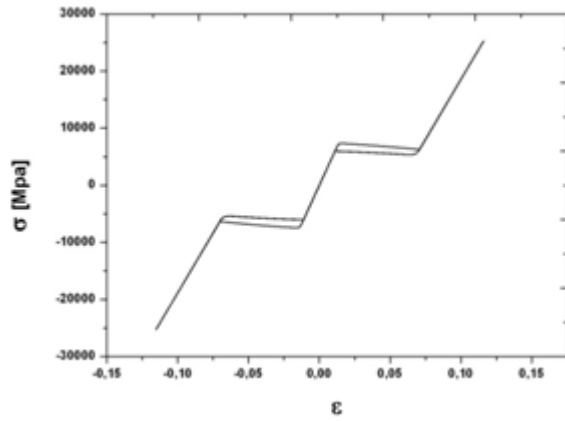


Figura 5.11 – Amplitudes máximas de resposta diminuindo-se a frequência de forçamento com $\delta=0.008$.

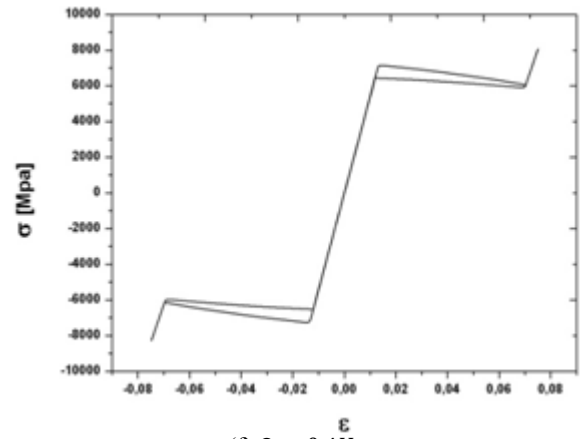
No início da diminuição da frequência, o sistema apresenta um comportamento linear (Fig. 12(a)). Conforme mostra a Fig. 5.12(b), o comportamento não-linear do sistema se inicia na frequência de $\Omega = 1.34\text{Hz}$, isto é, a partir dessa frequência o material entra em um laço incompleto de histerese, no entanto não há um salto dinâmico associado para essa frequência (Fig. 5.11), apenas uma mudança de comportamento. Continuando com a diminuição da frequência, o sistema apresenta o primeiro salto

dinâmico, em $\Omega = 0.6\text{Hz}$. Como o material já apresentava um comportamento não-linear devido ao laço incompleto de histerese, o salto é devido a presença de um laço completo de acordo com a Fig. 5.12 (e). Nessa frequência, a tensão é alta o suficiente para que ocorra a completa transformação microestrutural. Seguindo a diminuição da frequência, apenas a amplitude da oscilação diminui até a frequência de $\Omega = 0.4\text{Hz}$, mas sempre com o laço de histerese completo (Fig. 5.12(e)-(f)). Finalmente, para as frequências abaixo de $\Omega = 0.4\text{Hz}$, o sistema volta a apresentar um comportamento elástico linear de forma abrupta (Fig. 5.12(g)). Ressalta-se a não ocorrência de uma situação intermediária antes desse comportamento linear, ou seja, não ocorre a presença laços incompletos de histerese como nas frequências antes do primeiro salto, a saber, as frequências entre de $\Omega = 1.34\text{Hz}$ e $\Omega = 0.6\text{Hz}$.

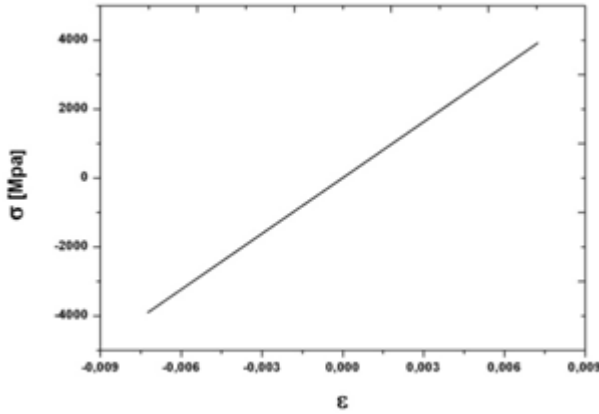




(e) $\Omega = 0.6\text{Hz}$



(f) $\Omega = 0.4\text{Hz}$



(g) $\Omega = 0.38\text{Hz}$

Figura 5.12 – Diagramas tensão-deformação para diferentes frequências de forçamento com $\delta=0.008$

Análise para $\delta = 0.012$:

Considerando a mesma análise realizada para as amplitudes de forçamento anteriores, com o aumento da amplitude de forçamento para $\delta = 0.012$, nota-se um aumento nas amplitudes máximas de oscilação em comparação com o caso de $\delta = 0.008$ tanto no aumento como na diminuição da frequência, conforme apresentado nas Figs. 5.13 e 5.15. Em ambos os casos, ocorrem mais saltos dinâmicos e não apenas um como para a amplitude analisada anteriormente de $\delta = 0.008$.

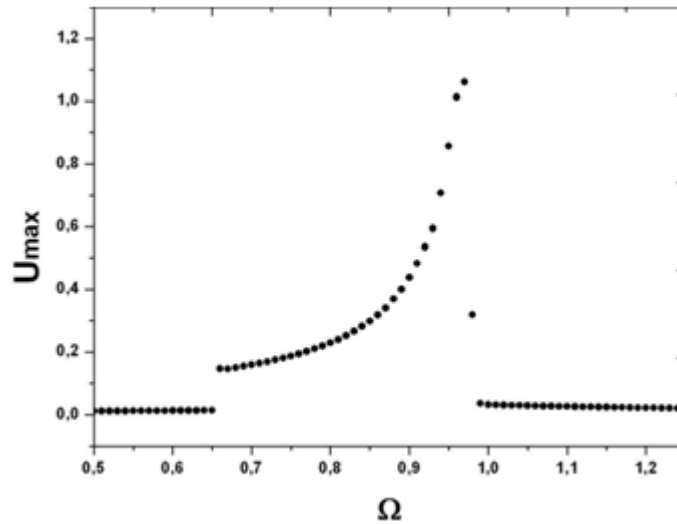


Figura 5.13 – Amplitudes máximas de resposta aumentando-se a frequência de forçamento com $\delta=0.012$.

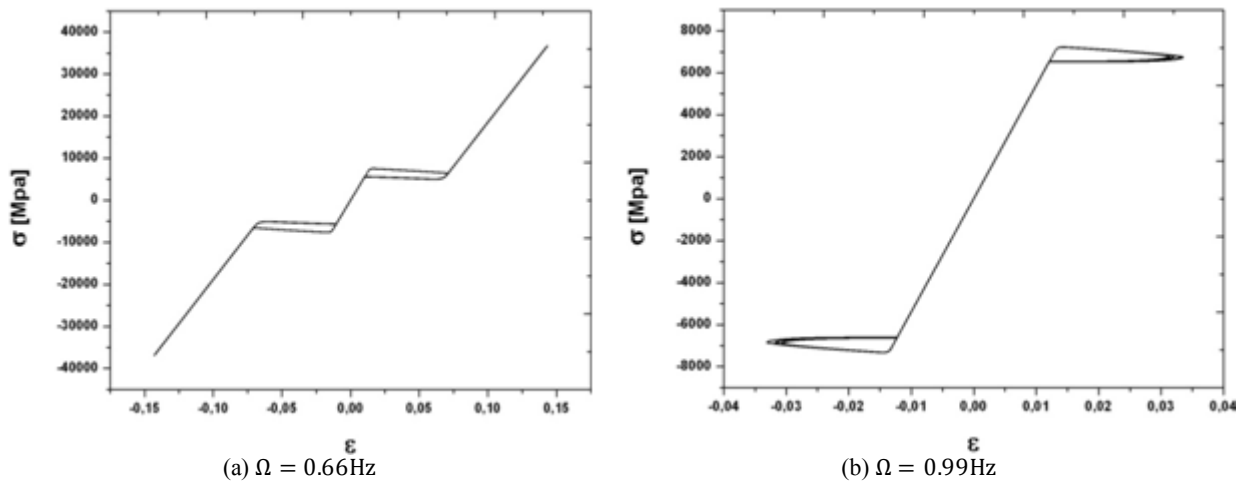


Figura 5.14 – Diagramas tensão-deformação para diferentes frequências de forçamento com $\delta=0.012$.

No gráfico das amplitudes máximas com o aumento das frequências (Fig. 5.13), o primeiro salto ocorre aproximadamente em $\Omega = 0.66\text{Hz}$, quando o material passa a experimentar um laço completo de histerese (Fig. 5.14(a)). Com o contínuo do aumento da frequência, o sistema continua apresentando o laço de histerese completo e sua amplitude aumenta consideravelmente. Na frequência de $\Omega = 0.99\text{Hz}$ ocorre o segundo salto dinâmico (Fig. 5.14(b)), relacionado com a transição de um laço de histerese completo para um incompleto. Este laço, por sua vez, diminui com o aumento da frequência até que o comportamento atinja o regime linear.

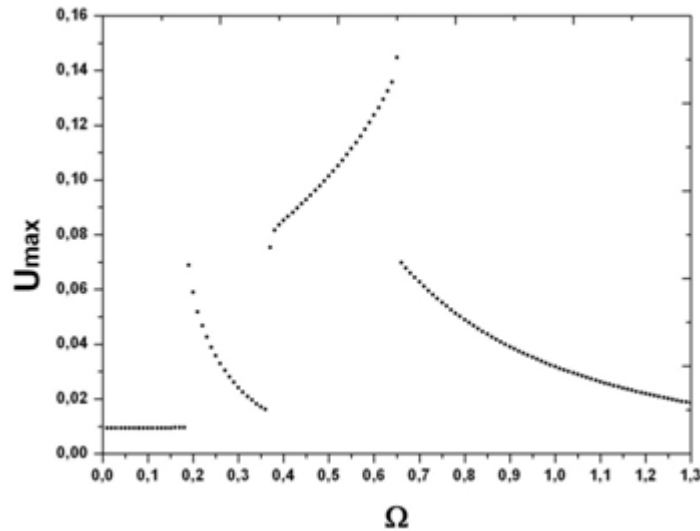


Figura 5.15 – Amplitudes máximas de resposta diminuindo-se a frequência de forçamento com $\delta=0.012$.

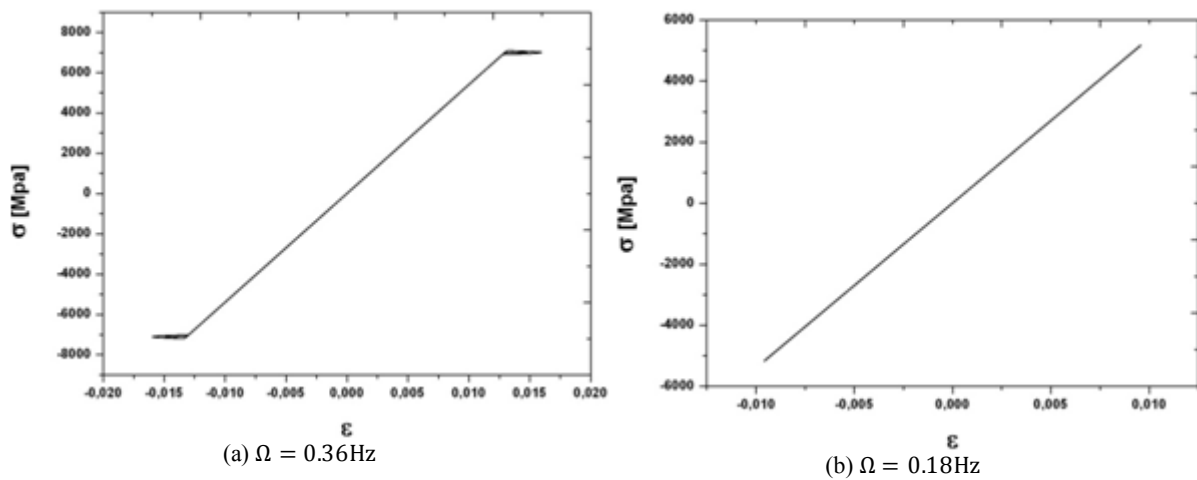


Figura 5.16 – Diagramas tensão-deformação para diferentes frequências de forçamento com $\delta=0.012$.

Na análise das amplitudes máximas com a diminuição da frequência de forçamento ocorrem três saltos dinâmicos (Fig. 15). O primeiro, em $\Omega = 0.36\text{Hz}$, é semelhante ao caso $\delta = 0.008$, quando o sistema apresenta uma transição do laço incompleto para o completo. O segundo salto ocorre quando o sistema passa de um comportamento não-linear com laço de histerese completo para um comportamento não-linear com laço de histerese incompleto em início de formação (Fig. 5.16(a)). Continuando-se a contínua diminuição da frequência, o laço cresce até que a frequência relacionada ao terceiro salto dinâmico seja alcançada. Neste terceiro salto, o material passa de um comportamento não-linear, com laço histerese incompleto, para um comportamento linear (Fig. 5.16(b)). Esse salto é a grande diferença na análise de diminuição de frequências para os dois casos $\delta = 0.008$. e $\delta = 0.012$.

Essa análise indica que a resposta do material pode mudar consideravelmente. Dependendo da amplitude de forçamento, o sistema pode apresentar tanto um comportamento linear, que é visto em sistemas com elemento de rigidez linear, quanto um comportamento não-linear, que ocorre quando há a presença do laço de histerese. Nota-se ainda que o material apresenta respostas diferentes no que se refere a seu comportamento dinâmico, isto é, a análise das amplitudes oscilação máximas nos casos

em que se aumenta e diminui as frequências de forçamento são diferentes. Vê-se também que quanto maior é a amplitude de forçamento no sistema, maiores são as influências das não linearidades do material e mais complexo é seu comportamento.

Os principais aspectos observados, importantes para o desenvolvimento de um stockbridge pseudoelástico, são a diferença de respostas apresentadas aumentando-se e diminuindo-se a frequência de forçamento e a presença de saltos dinâmicos. No primeiro caso, diferentes respostas obtidas para uma mesma frequência significa uma instabilidade da solução. Nestas situações, perturbações externas podem levar o sistema de uma resposta para outra. Essa mudança pode representar uma perda significativa de eficiência para o absorvedor, por exemplo. Considerando o segundo aspecto, a presença dos saltos dinâmicos introduz mudanças bruscas ao sistema podendo ocasionar reações no sistema primário, no caso, o cabo da linha de transmissão.

5.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PRELIMINARES

Nesta análise experimental preliminar procura-se observar o comportamento dinâmico de uma barra SMA, fixada por meio de um dispositivo específico para ensaios que preserva as características do *stockbridge* convencional (Fig. 5.17) (Anexo 1), quando excitada por um *Shaker* (Labworks, Model ET-27). O sistema ensaiado é composto por 2 massas que são fixas na barra de SMA. Esses ensaios foram feitos tendo como referência as normas a IEEE Std 664TM -1993(R2007) e a IEC 61897:1998, entretanto, alguns parâmetros relativos à velocidade e deslocamento máximo do *shaker* foram alterados para uma melhor adaptação ao experimento.

O objetivo principal é verificar nos dados experimentais as características obtidas nas simulações numéricas. Cabe ressaltar que o modelo numérico não está calibrado para o experimento, assim como os ensaios realizados numérica e experimentalmente não são exatamente iguais. No entanto, acredita-se que as características de respostas diferentes no aumento e diminuição da frequência e os saltos dinâmicos estejam presentes.

Para realização dos ensaios, fixa-se o dispositivo no *shaker* e por meio de um sistema de controle (*Signal Star Vector*), são realizadas varreduras de 5Hz a 26Hz, aumentando-se e diminuindo-se a frequência. Os parâmetros variados nessa análise foram a taxa de variação da frequência e a amplitude de deslocamento do *shaker*.

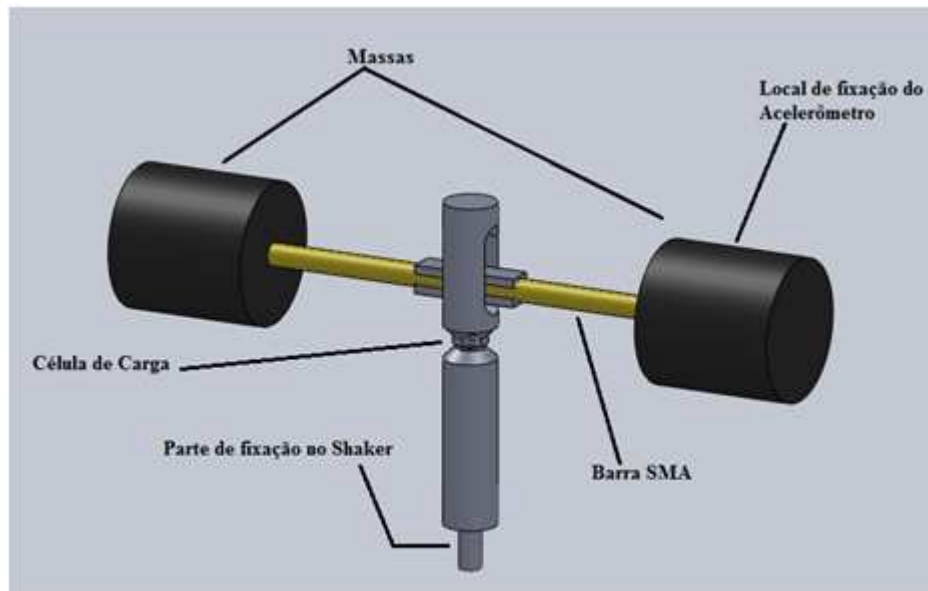


Figura 5.17 – Dispositivo de fixação

As Figs. 5.18, 5.19 e 5.20 apresentam os resultados para o deslocamento relativo entre uma das massas e o *shaker*, a velocidade do *shaker* e a potência dissipada, respectivamente. Nesse ensaio, a taxa de variação de frequência é de 0.1Hz e a amplitude de excitação do *shaker* é de 0.15mm. Cabe mencionar que no caso em que a frequência é diminuída não foi possível completar o ensaio pois o nível de vibração do *shaker* era muito grande e o teste foi parado por segurança, por isso os dados estão incompletos no gráfico. A partir da Fig. 5.18 nota-se que o deslocamento relativo não apresenta saltos dinâmicos como observado nas simulações numéricas. No entanto, pode-se observar uma diferença no deslocamento quando aumenta-se e quando diminui-se a frequência de forçamento. As amplitudes são menores em todo o início da diminuição da frequência e o pico ocorre em uma frequência um pouco menor do que no caso de aumento de frequência (Fig.5.18).

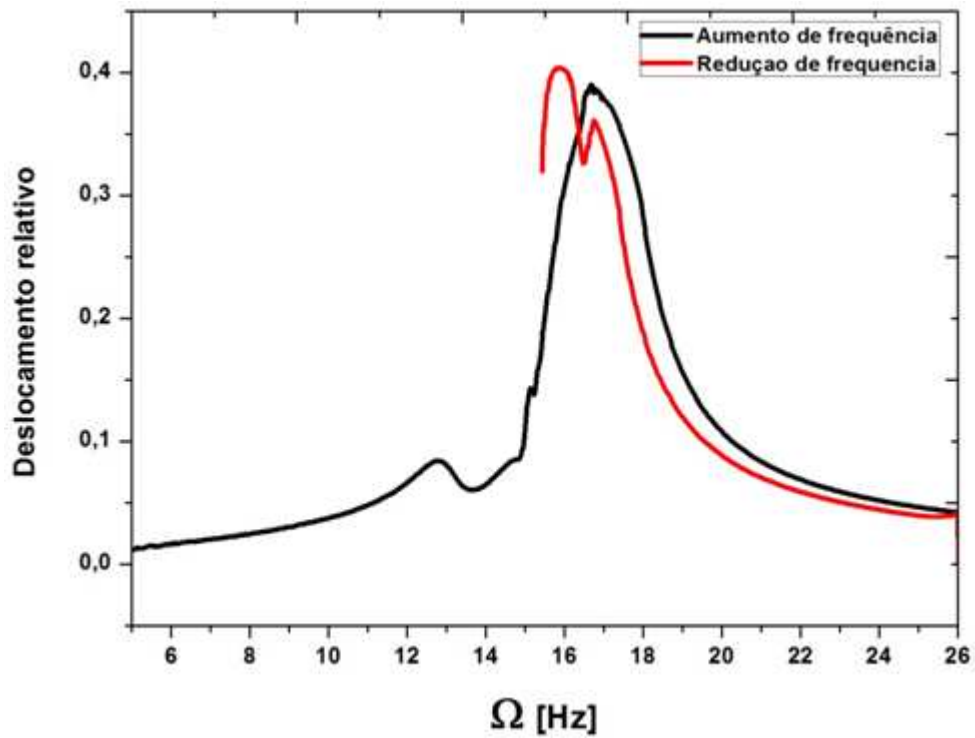


Figura 5.18 – Deslocamento Relativo

A Fig 5.19 indica que próximo da frequência de ressonância, a velocidade do *shaker* muda de forma considerável, não obedecendo ao controle que deve impor uma velocidade constante. Cabe ressaltar, que essa interação entre *shaker* e stockbridge não é contemplada no modelo numérico. No caso da diminuição de frequência, a velocidade atinge valores muito altos de forma repentina. Isso a difere bastante da curva de velocidade no caso de aumento de frequência.

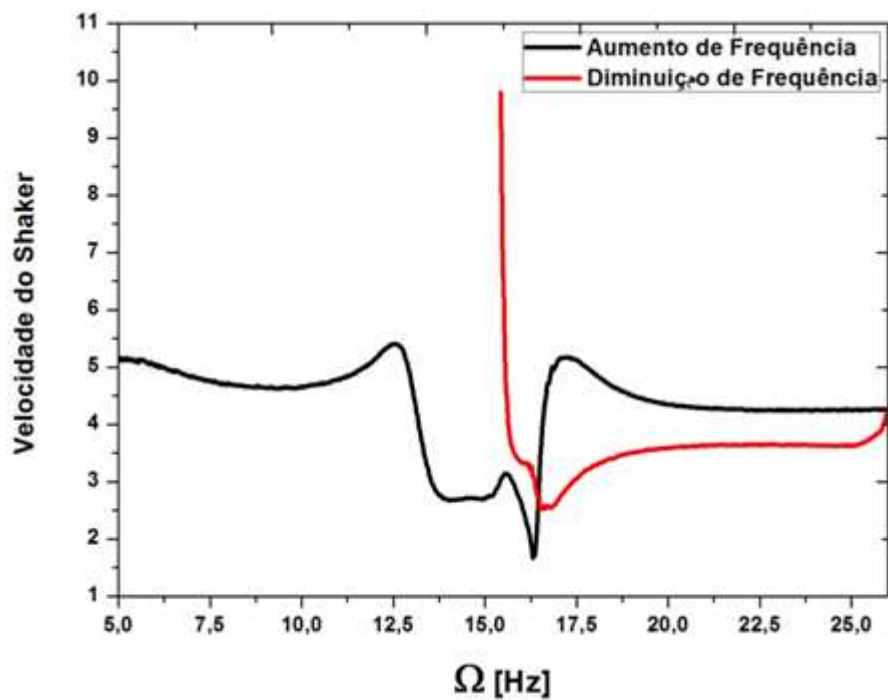


Figura 5.19 – Velocidade do Shaker

A Fig 5.20, no caso de diminuição de frequência, apresenta uma curva de dissipação de potência que chega a ser o dobro da obtida no caso de diminuição para as frequências próximas a de ressonância. Embora não se tenha certeza se o material está ou não em regime não-linear, esse gráfico é um bom indicativo devido a grande diferença na absorção de energia obtida entre os dois casos analisados. Essa diferença considerável do resultado para aumento e diminuição de frequência é um indicativo material se encontra em um regime não-linear, com presença do laço de histerese.

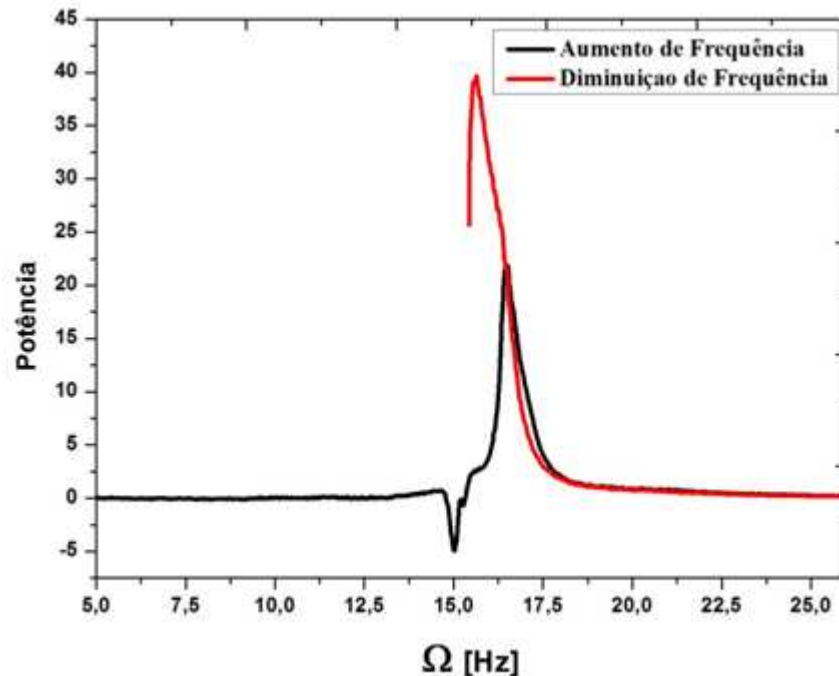


Figura 5.20 – Potência Dissipada

Os resultados experimentais obtidos são bastante preliminares. As diferenças de resposta obtidas para aumento e diminuição de frequência indicam a presença do laço de histerese. Por outro lado, não foram verificados saltos dinâmicos. A não ocorrência desses saltos pode ser ocasionada por diversos fatores: interação entre *shaker* e *stockbridge*, não contemplada no modelo numérico; o material pode estar sempre experimentando um laço de histerese incompleto, não havendo transições que saiam os saltos. Para a obtenção de resultados mais conclusivos são necessários realizar mais e diferentes ensaios. Uma análise fundamental consiste na construção do diagrama tensão-deformação para o sistema analisado durante o teste experimental em algumas frequências de forçamento.

6 CONCLUSÃO

Esse trabalho é parte de um estudo inicial da utilização de elementos de SMA em dispositivos de absorção de vibrações para cabos de transmissão de energia, como o *stockbridge*. Neste contexto, realiza-se uma análise dinâmica numérica do comportamento de um oscilador composto por um elemento de rigidez não-linear, representando o elemento de SMA, para diferentes condições de operação, como amplitudes e frequências de forçamento. O estudo realizado consiste em uma fase preliminar para o desenvolvimento de um ADV com SMA. Esse estudo possui bastante importância tendo em vista a complexidade do comportamento dinâmico apresentado pelas SMAs, ainda não muito explorado na literatura.

Antes de iniciar a análise dinâmica, no entanto, são apresentadas as causas e consequências das oscilações nas linhas de transmissão, com ênfase para as vibrações eólicas. Posteriormente, é apresentada uma revisão da teoria de absorvedores dinâmicos passivos e suas principais limitações no controle de vibrações, seguida por uma revisão da teoria sobre as ligas com memória de forma. Nesta revisão, exploram-se os principais fenômenos apresentados por essas ligas: quasiplasticidade e pseudoelasticidade.

A idéia central na qual esse trabalho se baseia consiste na utilização de elementos de SMA nos ADVs com o objetivo de aumentar sua faixa de operação. Pretende-se obter essa melhora da performance explorando-se o comportamento pseudoelástico dessas ligas, que está associado a uma grande capacidade dissipativa. Essa ideia difere dos trabalhos comumente apresentados na literatura de ADVs com SMA, que buscam a mudança de propriedades mecânicas com a variação de temperatura.

Em todas as simulações numéricas realizadas nesse trabalho é utilizado o modelo constitutivo proposto por Paiva *et al.* (2005). Utilizando esse modelo as características principais das SMAs, como a quasiplasticidade e a superelasticidade, são avaliadas para demonstrar como o material se comporta quando submetido à variação de temperatura e aplicação de tensões. Para essa mesma análise, são apresentadas as relações entre as fases microestruturais presentes no material e como elas se relacionam durante as mudanças aplicadas.

Passando à análise dinâmica, foram considerados dois osciladores de 1G.L., um com rigidez linear e outro com rigidez não-linear (SMA). No que se refere à comparação entre as frequências de atuação do modelo linear e do modelo não-linear, que estão associadas à ressonância do ADV, viu-se que o modelo não-linear apresenta uma maior faixa de atuação do que o modelo linear. No entanto, tendo em vista as características não-lineares intrínsecas das SMAs verificou-se a ocorrência de diversos saltos dinâmicos. A partir da análise das amplitudes máximas de resposta do oscilador com SMA, verificou-se que esses saltos podem ocorrer para diferentes frequências, dependendo da forma com que a frequência de excitação é variada e da amplitude de forçamento.

Por meio de análises numéricas do diagrama tensão-deformação, constatou-se que esses saltos dinâmicos estão intrinsicamente relacionados com a mudança na rigidez do material devido às transformações martensíticas induzidas por tensão que ocorrem por causa da amplitude de oscilação. Saltos dinâmicos foram observados nas seguintes transições de comportamento do material:

Aumento de Frequência:

Linear—Não-linear(laço incompleto)

Linear—Não-linear(laço completo)

Não-linear(Laço completo—Não-linear(laço incompleto)

Diminuição de Frequência:

Não-linear(laço incompleto)—Não-Linear(laço completo)

Não-Linear(laço completo) —Linear

Não-Linear(laço completo)—Não-Linear(laço completo)

Não-Linear(laço incompleto) —Linear

Devido às notáveis diferenças dos gráficos de amplitudes máximas causadas pelas não linearidades do sistema (Fig. 5.12, Fig. 5.19 Fig. 5.27 Fig. 5.30), percebe-se que a atuação do ADV não-linear poderá ser de duas formas diferentes para cada amplitude de forçamento. Esse comportamento está relacionado com essas diferenças nos gráficos de amplitudes máximas. No entanto, a avaliação de qual será o comportamento dependerá de como é a excitação do sistema em condições reais. Assim, pode-se afirmar que essa diferença na excitação e na condição inicial poderá ser determinante em seu comportamento. Quando se compara os gráficos de amplitudes máximas, o comportamento, em termos de amplitude de oscilação e, conseqüentemente, de dissipação de energia, pode ser muito distinto para uma mesma frequência.

Os principais aspectos observados a partir das simulações numéricas, importantes para o desenvolvimento de um *stockbridge* pseudoelástico, foram a diferença de respostas apresentadas aumentando-se e diminuindo-se a frequência de forçamento e a presença de saltos dinâmicos. No primeiro caso, diferentes respostas obtidas para uma mesma frequência significa uma instabilidade da solução. Nestas situações perturbações externas podem levar o sistema de uma resposta para outra. Essa mudança pode representar uma perda significativa de eficiência para o absorvedor, por exemplo. Considerando o segundo aspecto, a presença dos saltos dinâmicos introduz mudanças bruscas ao sistema podendo ocasionar reações no sistema primário, no caso, o cabo da linha de transmissão.

No que se refere às análises experimentais, não foram observados saltos dinâmicos. Entretanto, as diferenças obtidas para velocidade do *shaker*, potência dissipada e deslocamento relativo para os casos em que se aumenta e diminui a frequência, mostram que é provável que o material esteja em regime

não-linear. Para a obtenção de resultados mais conclusivos são necessários realizar mais e diferentes ensaios. Para verificar se o material realmente se encontra no regime não-linear, uma análise fundamental consiste na construção do diagrama tensão-deformação para o sistema analisado durante o teste experimental em algumas frequências de forçamento. A partir dessa análise o comportamento do material seria avaliado de forma definitiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Achenbach, M. A **model for an alloy with shape memory**, Int. Journal of Plasticity, Vol. 5, Issue 4, 371-395, 1989.

Anderson, K., & Hagedorn, P. (1993). **On the energy dissipation in spacer dampers in bundled conductors of overhead transmission lines**. Journal of Sound and Vibration , 539-556.

Arruda, A. C. (1975). **Análise de amortecedores para linhas de transmissão de energia elétrica**. Campinas: Unicamp.

Baeta-Neves, A. P., Savi, M. A., & Pacheco, P. (2004) **On the Fremonds constitutive model for shapememory alloys**. Mechanics Research Communications , 677-688.

Cachutê, R. S., Yamamoto, R.,(2009), **Caracterização dinâmica de um stockbridge pseudoelástico** , Trabalho de Conclusão de Curso- UNB

Chabart, O., Lilien, J. L. (1998). **Galloping of electrical lines in wind tunnel facilities**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics , 967 - 976.

Da Silva, (2003) ,**Aplicação de ligas com memória de forma em estruturas adaptativas**, 2º CTADC, (SBMAC). Série Arquimedes, Volume 2, Anais do DINCON.

De Silva, C. A. (2000). **Vibration: Fundamentals and Praticce**. Vancouver, Canada: CRC Press.

Falk, F., Model Free-Energy, **Mechanics and Thermodynamics of Shape MemoryAlloys**, ACTA Metallurgica, Vol.28, pp. 1773-1780, 1980.

Fremond, M., **Matériaux à Mémoire de Forme**, C.R. Acad. Sc. Paris, Tome 304, s. II, n. 7, pp. 239-244, 1987.

Fuchs, R. D., & Almeida, M. T. (1982). **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. Itajubá: Edgard Blücher.

Lagoudas, D., & Machado, L. G. (2008). **Shape Memory Alloy**,. Texas: Springer.

Li, H & Qian, H.(2010), **Seismic Vibration Control of Structures Using Superelastic Shape Memory Alloys**, Shape Memory Alloys. Sciyo.

Lieberman, A. J., & Krupov, K. P. (1968). **Vibration of Overhead line conductor sand protection against it in URSS**. CIGRE .

Machado, L. G., & Savi, M. A. (2003). **Medical Applications of Shape Memory Alloy**. Brazilian Journal of Medical and Biological Research , 683-691.

Meirovitch, L (2001), **Fundamentals of vibrations**, USA: Mc Graw Hill.

- Müller, I and Wilmanski, K. **A model for phase transition in pseudoelasticbodies**, II Nuovo Cimento, B57: 283-318, 1980.
- Nogueira, J. B.(2009), **Dinâmica Não-linear e Caos em uma Treliça Pseudoelástica** Trabalho de Conclusão de Curso- UFRJ
- Ölander, A.,(1932), J. Am. Chem. Society, 56, 3819
- Otsuka, K., & Wayman, C. M. (1998). **Shape Memory Alloy**. Cambridge: Cambridge University Press.
- Paiva, A., Savi, M.A.(2005), **An overview on constitutive models for shape memory alloys**, Submitted to Math Problems in Engineering.
- Pietrzakowski, M., 2000, **Natural Frequency Modification of Thermally Activated Composite Plates**, Mec. Ind., v.1, pp.313-320.
- Rao, S. (2008). **Vibrações Mecânicas**. São Paulo: Prentice Hall.
- Savi, M. A., Paiva, A., Baeta-Neves, A. P., & Pacheco, P. M. (2002). **Phenomenological Modeling and Numerical Simulation of Shape Memory Alloys: A Thermo-Plastic-Phase Transformation Coupled Model**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures , 261273.
- Savi, M. A., & Paiva, M. A. (2004). **A Constitutive Model for Shape Memory Alloys Considering Tensile-Compressive Asymmetry and Plasticity**. International Journal of Solids and Structures , 3439-3457.
- Savi, M. A., Paiva, A. (2005),**Describing Internal Subloops Due to Incomplete Phase Transformations in Shape Memory Alloys**, Archive of Applied Mechanics, v.74, n.9, pp.637-647, 2005. doi:10.1007/s00419-005-0385-6
- Savi, M. A., & Paiva, A. (2006). **An Overview on Constitutive Models for Shape Memory Alloys**. Mathematical Problems In Engineering. ID 56876 , 1-30.
- Savi, M. A, Paiva, A, Pacheco, P. (2006). **Tensile-compressive asymmetry influence on shape memory alloy system dynamics**. Chaos Solitons and Fractals , 828-842.
- Savi, M.A (2006) **Dinâmica Não-linear e Caos**, E-Papers, 1º edição, ISBN 85-76500-62-0
- Uehara, T (2010), **Molecular Dynamics Simulation of Shape-memory Behavior**, Shape Memory Alloys. Sciyo.
- Van Humbeeck, J., Oberaigner.(1999), **Non-medical Applications of Shape Memory Alloys**, Materials Science and Engineering A, v.273-275, pp.134-148.
- Xu, P. and Morris, J. W. **Computer simulation of martensitic transformations unconstrained, two-dimensional crystals under external stress**, Metall. Trans.,A24: 1281-1294, 1993.

ANEXOS

	Pág.
Anexo I	63

