

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

**ANÁLISE DE UM ABSORVEDOR DINÂMICO DE
VIBRAÇÕES PSEUDOELÁSTICO**

HUGO DE SOUZA OLIVEIRA

ORIENTADORA: Prof^ª. Dr^ª. ALINE SOUZA DE PAULA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

PUBLICAÇÃO: ENM.DM-214A/2014
BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO - 2014

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓSGRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**ANÁLISE DE UM ABSORVEDOR DINÂMICO DE
VIBRAÇÕES PSEUDOELÁSTICO**

HUGO DE SOUZA OLIVEIRA

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM CIÊNCIAS MECÂNICAS DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS MECÂNICAS.**

APROVADA POR:

**Prof^ª. Aline Souza de Paula
(Orientadora)**

**Prof. Alberto Carlos Guimarães Castro Diniz
(Examinador Interno)**

**Prof. Edson Paulo da Silva
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 27 DE FEVEREIRO DE 2014.

FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, HUGO DE SOUZA

Análise de um Absorvedor Dinâmico de Vibrações Pseudoelástico, [Distrito Federal] 2014.

70p., 210 x 297 mm (FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2014). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas.

1. Dinâmica não linear 2. Vibrações não lineares 3. Absorvedor Dinâmico

I. ENM/FT/UnB

II. Título (MESTRE)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, H. S. (2014). Análise de um Absorvedor Dinâmico de Vibrações Pseudoelástico . Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas. Publicação ENM.DM-214A/2014, Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, 70p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Hugo de Souza Oliveira

TÍTULO: Análise de um Absorvedor Dinâmico de Vibrações Pseudoelástico

GRAU: Mestre

ANO: 2014

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Hugo de Souza Oliveira

hso.smas@gmail.com

Dedicatória

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

RESUMO

O absorvedor dinâmico de vibrações (ADV) é um dispositivo de controle de vibração passivo bem estabelecido na literatura que busca a redução das amplitudes de vibração de um sistema primário sujeito a um forçamento harmônico externo. Quando acoplado a um sistema primário, o ADV promove a redução dos níveis de vibração em uma frequência de projeto específica. Todavia, surgem dois novos picos de ressonância, introduzindo comportamentos críticos que devem ser evitados. Dessa forma, os ADVs tradicionais funcionam como supressores de vibração em estreitas bandas operacionais de frequências. O uso de ligas de memória de forma (*Shape Memory Alloy* - SMAs) consiste em uma alternativa para buscar uma melhora do desempenho do ADV clássico, aumentando a banda operacional do ADV ou mitigando os níveis de vibrações nas frequências de ressonância introduzidas pelo acoplamento do absorvedor. Nesse contexto, esta dissertação apresenta uma análise da dinâmica não linear de um absorvedor de vibrações passivo pseudoelástico composto por SMA. Inicialmente, apresenta-se uma análise dinâmica de um oscilador 1GL com SMA, representando o ADV. Em seguida, esse ADV pseudoelástico é acoplado a um sistema de um grau de liberdade, que representa o sistema primário. O desempenho do ADV é analisado através da análise das amplitudes máximas de vibração do sistema primário para diferentes amplitudes e frequências de forçamento. O comportamento histerético introduz características complexas na dinâmica do sistema, mas também altera a resposta do absorvedor em relação ao ADV clássico, permitindo reduções dos níveis de vibração nas frequências relacionadas aos novos picos de ressonância. Comparações entre os desempenhos do ADV linear clássico e do ADV pseudoelástico são apresentadas por meio de simulações numéricas.

ABSTRACT

The tuned vibration absorber (TVA) is a well-established passive vibration control device for achieving vibration reduction of a primary system subjected to external excitation. When coupled to a primary system, the TVA promotes vibration reduction at its design forcing frequency. Nevertheless, two new resonance peaks appear introducing critical behaviors that must be avoided. The use of shape memory alloys (SMAs) can improve the performance of the classical TVA. This dissertation deals with the nonlinear dynamics of a passive pseudoelastic tuned vibration absorber (PTVA) with an SMA element. At first, an one-degree of freedom oscillator with an SMA element, representing the PTVA, is dynamical analyzed. After that, this pseudoelastic oscillator is coupled to a single-degree of freedom linear oscillator that represents the primary system. The SMA-PTVA performance is evaluated by analyzing primary system maximum vibration amplitudes for different forcing amplitudes and frequencies. The influence of the hysteretic behavior due to stress-induced phase transformation is considered. The hysteretic behavior introduces complex characteristics to the system dynamics but also changes the absorber response allowing vibration reduction related to the new resonance peaks introduced when coupling the TVA. Numerical simulations establish comparisons of the SMA-PTVA results with those obtained from the classical TVA.

Agradecimentos

Essa é a parte do trabalho em que os formalismos ficam de lado e a liberdade impera. Antes de fazer os mil agradecimentos que devo, passa por minha mente um devaneio nostálgico e relembro as várias experiências que tive 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, pois me sentia extremamente atraído por Engenharia Elétrica e a possibilidade de estudar fontes alternativas de energia elétrica. Com o tempo, fui conhecendo e ao mesmo tempo me apaixonando por esse ramo da engenharia que têm 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 esse momento conclusivo, muitas pessoas foram importantes e a elas eu demonstro meus mais sinceros e profundos agradecimentos:

Inicialmente eu menciono Deus e seu filho Jesus Cristo, pois sem ele não haveria, sentido, ordem e regularidade alguma na existência. Creio que o universo seria apenas um amontoado de átomos e energia sem objetividade nem ciclos. Se hoje estou vivo, é porque Ele tem cuidado de mim. Ainda que eu não consiga visualizar sua presença, Ele sempre se faz presente de forma oculta. Assim como diz Paulo, nEle foram feitas todas as coisas e nada subsiste sem Ele.

Porque nele foram criadas todas as coisas que há nos céus e na terra, visíveis e invisíveis, sejam tronos, sejam dominações, sejam principados, sejam potestades. Tudo foi criado por ele e para ele. E ele é antes de todas as coisas, e todas as coisas subsistem por ele.

Colossenses 1:16-17

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 da minha vida. Gostaria de fazer por eles tudo que fizeram por mim. Agradeço também aos meus irmãos Marcus e Márcia pelo simples fato de serem meus irmãos e sempre estarem do meu lado para fazer o clássico papel de irmãos, importunando e sendo companheiros em todos os momentos.

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), Daniel(Danyboy), Welberth, Leonardo(Bola de fogo), Thamise, Frederico(Fred), Afonso, Quéssia, Kaio, Braitner, Alexandre, Lúcio, Fábio(Fibo),Álvaro, Julio, Estarle, Gustavo(Pezão), André Brandão, André Mayer, Daniel Albuquerque, Lucas(Venâncio), Rodolfo(Gonça), Danilo(Peladão), Alexandre(Cowboy), Tathy(Japa), André(Miazaki), Rodrigo(Mexicano), Raphael(Sapessão), Rafael(Rafaga), André(Nunão), Felipe(Zanata), Rafael(Rafinha), André(Cabelão), Paulo(Paulinho), Rafael(Goiano), Wilker, Daniel Campetti, Vander, Cássia, Yure, Angélica, Francy Anne, Juliana, Ana Paula, Igor, Igão, Zou Mi, Letícia Massa, Nilda, Jefferson, An Tien Li, Nancy

Lin, e Darcy. Com certeza eu estou me esquecendo de vários, mas minha memória não é das melhores para lembrar todos.

Não haveria como chegar nessa etapa sem também agradecer o auxílio de todos os técnicos e professores em toda essa jornada. Dentre os vários, faço uma singela homenagem aos técnicos: Tarsis, Marcão, Sr. Arthur, Wesley, Pereira, Mestre, Felipe, Silmar, Jackson e Xavier. Lembro também dos professores: Edson, Alex, Jorge, Diniz, Mário Olavo, Girão, Fernando Neves e Gustavo Abade.

Novamente, agradeço de forma bastante especial à professora Aline Souza de Paula por ter me auxiliado de uma forma além de qualquer expectativa e pela orientação impecável nesses anos de trabalhos desde o fim da graduação. 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 e para meu crescimento acadêmico. Agradeço pelas várias horas gastas comigo explicando os programas e as simulações complexas além de todo apoio financeiro. Agradeço por todo valioso auxílio na composição do texto do trabalho desde a época da graduação. Agradeço por todo incentivo que me deu e tem me dado até hoje. Enfim, não haveria melhor orientadora para esse projeto.

Por fim, agradeço à Leisy Mikaelly por ter insistido que eu voltasse à trajetória vetorial da qual havia me desviado e também por ter insistido para que juntos pudéssemos construir uma base vetorial canônica capaz de gerar diversos vetores por meio de uma simples combinação linear.

Hugo de Souza Oliveira

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.3	METODOLOGIA	2
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1	DINÂMICA NÃO LINEAR	5
2.1.2	ESPAÇO DE FASE	5
2.1.3	SEÇÃO DE POINCARÉ	6
2.1.4	DIAGRAMA DE BIFURCAÇÃO	7
2.2	ABSORVEDOR DINÂMICO DE VIBRAÇÕES NÃO AMORTECIDO	8
2.3	ABSORVEDOR DINÂMICO DE VIBRAÇÕES AMORTECIDO	10
3	LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA	13
3.1	ASPECTOS GERAIS	13
3.2	EFEITO DE MEMORIA DE FORMA E SUPERELASTICIDADE	15
3.2.1	ASPECTOS CRISTALOGRAFICOS DAS TRANSFORMAÇÕES MARTENSÍTICAS	17
3.2.3	EFEITO DE PSEUDOELASTICIDADE	18
3.3	MODELO CONSTITUTIVOS PARA SMAS	19
3.4	COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO ESTÁTICO DE UMA SMA NI-TI	21
3.4.1	PSEUDOELASTICIDADE EM UMA SMA NI-TI	22
3.5	UTILIZAÇÃO DE SMAS EM PROBLEMAS DE VIBRAÇÃO	23
3.5.1	SMA EM REGIME QUASIPLÁSTICO	24
3.5.2	SMA EM REGIME PSEUDOELÁSTICO	25
4	OSCILADOR 1GL PSEUDOELÁSTICO	27
4.3	MODELAGEM DO OSCILADOR	27
4.4	COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA 1GL PSEUDOELÁSTICO COM FORÇAMENTO APLICADO DIRETAMENTE NO OSCILADOR	28
4.5	COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA 1GL PSEUDOELÁSTICO PARA EXCITAÇÃO DE BASE COM VELOCIDADE CONSTANTE	35
5	ABSORVEDOR DINÂMICO PSEUDOELÁSTICO ACOPLADO A UM OSCILADOR LINEAR 1GL	41
5.1	MODELAGEM DO OSCILADOR	42
5.2	ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS ABSORVEDORES PSEUDOELÁSTICO E LINEAR	43
5.2.1	ANÁLISE PARA $\delta = 0.000625$ E $\gamma_m = 0.25$	44
5.2.2	ANÁLISE PARA $\delta = 0.0011$ E $\gamma_m = 0.15$	44
5.2.3	ANÁLISE PARA $\delta = 0.0011$ E $\gamma_m = 0.2$	50
5.2.4	ANÁLISE PARA $\delta = 0.0025$ E $\gamma_m = 0.10$	55
5.2.5	ANÁLISE PARA $\delta = 0.0025$ E $\gamma_m = 0.15$	59
5.2.6	ANÁLISE PARA OUTROS CASOS DE δ E γ_m	63
6	CONCLUSÃO	68
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Espaços de Fase: (a) Periódico, período 1; (b) Caótico. (De Paula, 2005)	5
Figura 2.2 - Construção da seção de Poincaré. (Moon, 1992).....	6
Figura 2.3 - Seções de Poincaré. (De Paula, 2005).	7
Figura 2.4 – Oscilador 2GL: absorvedor dinâmico acoplado a um sistema primário.	9
Figura 2.5 – FRF do sistema primário em função da variação da frequência de excitação.....	10
Figura 2.6 – Oscilador 2GL: ADV com amortecimento acoplado a um sistema primário.	11
Figura 2.7 –FRFs do sistema primário para diferente fatores de amortecimento.....	12
Figura 3.1 – Relação entre temperaturas e fases. (Da Silva, 2003).	13
Figura 3.2 – Relação entre carga aplicada e temperaturas características. (Lagoudas, 2008).	15
Figura 3.3–Figura esquemática da deformação e recuperação de forma da SMA em nível atômico. (Uehara, 2010).	15
Figura 3.4 – 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).	17
Figura 3.5 – Representação esquemática da interface entre as fases austeníticas e martensíticas. (Lagoudas, 2008).	17
Figura 3.6 – Diagrama σ - ϵ para as ligas de memória de forma.	19
Figura 3.7 - Desenvolvimento da tensão e da deformação com relação ao tempo.	22
Figura 3.8 –Transformação e porcentagem de fase ao longo do tempo para a pseudoelasticidade.....	22
Figura 3.9 - Diagrama σ - ϵ para a liga de memória de forma	23
Figura 3.10 – Absorvedor dinâmico adaptativo proposto por (Tiseo et al., 2010).	24
Figura 3.11 – Viga de Concreto Reforçada com Aço Comum. (Li & Qian, 2010).....	25
Figura 3.12– Viga de Concreto Reforçada com SMA. (Li & Qian, 2010).....	26
Figura 3.13 – Análise do Crescimento de Trincas. (Li & Qian, 2010).	26
Figura 4.1 - Oscilador de 1 grau de liberdade: (a) Excitação harmônica de base. (b) Forçamento harmônico aplicado diretamente ao corpo.	27
Figura 4.2 – Amplitudes máximas de resposta aumentando-se e diminuindo-se a frequência de forçamento para $\delta= 0.001$	29
Figura 4.3 – Amplitudes máximas de resposta aumentando-se a frequência de forçamento com $\delta = 0.008$	29
Figura 4.4– Diagramas σ - ϵ para diferentes frequências de forçamento com $\delta = 0.008$	30
Figura 4.5 – Amplitudes máximas de resposta diminuindo-se a frequência de forçamento com $\delta = 0.008$	31
Figura 4.6 – Diagramas σ - ϵ para diferentes frequências de forçamento com $\delta = 0.008$	32
Figura 4.7 – Amplitudes máximas de resposta aumentando-se a frequência de forçamento com $\delta = 0.012$	33
Figura 4.8 – Diagramas σ - ϵ para diferentes frequências de forçamento com $\delta = 0.012$	34
Figura 4.9 – Amplitudes máximas de resposta diminuindo-se a frequência de forçamento com $\delta = 0.012$	34
Figura 4.10 – Amplitudes máximas de resposta com $v = 0.0025$ m/s. Esquerda: aumentando-se a frequência de forçamento; direita: diminuindo-se a frequência de forçamento.	35
Figura 4.11 – Diagramas σ - ϵ aumentando-se de forçamento com $v=0.0025$ m/s.	35
Figura 4.12 – Diagramas σ - ϵ diminuindo-se a frequência de forçamento com $v=0.0025$ m/s.	36
Figura 4.13 – Amplitudes máximas de resposta $v=0.075$ m/s. Esquerda: aumentando-se a frequência de forçamento; direita: diminuindo-se a frequência de forçamento.	37
Figura 4.14 – Diagramas tensão-deformação para diferentes frequências de forçamento com $v=0.075$ m/s. Aumentando-se a frequência de forçamento.	38
Figura 4.15 – Diagrama σ - ϵ para diferentes frequências de forçamento com $v=0.075$ m/s. Diminuindo-se a frequência de forçamento.	39
Figura 5.1 – Oscilador 2GLSMA.....	41
Figura 5.2 – Oscilador 2GL linear.	43
Figura 5.3 – Amplitudes máximas de resposta: (a) Sistema primário. (b) Sistema secundário	44
Figura 5.4 - Amplitudes máximas do sistema primário para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0011$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) ADV Linear. (b) ADV pseudoelástico.	45
Figura 5.5 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0011$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.	45
Figura 5.6 – Espaço de fase do sistema primário para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0011$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a), (c), (e) - Com ADV linear. (b), (d), (f) – Com ADV pseudoelástico.....	46
Figura 5.7 – Diagramas σ - ϵ para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0011$ aumentando-se a frequência de forçamento.	47

Figura 5.8 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.	48
Figura 5.9 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema primário. (b) Sistema secundário.	48
Figura 5.10 - Espaço de fase do sistema primário para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a), (c) - Com ADV Linear. (b), (d) – Com ADV pseudoelástico.	49
Figura 5.11 – Diagramas $\sigma - \varepsilon$ para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento.	50
Figura 5.12 – Amplitude máxima para $\gamma_m = 0.2$ e $\delta = 0.0011$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.	51
Figura 5.13 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.20$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema primário. (b) Sistema secundário.	51
Figura 5.14 – Espaço de fase do sistema primário para $\gamma_m = 0.20$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a), (c) - ADV Linear. (b), (d) - ADV pseudoelástico.	52
Figura 5.15 – Diagramas $\sigma - \varepsilon$ para $\gamma_m = 0.20$ e $\delta = 0.0011$ aumentando-se a frequência de forçamento.	52
Figura 5.16 – Amplitudes máximas para $\gamma_m = 0.2$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.	53
Figura 5.17 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.2$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema primário. (b) Sistema secundário.	53
Figura 5.18 – Espaço de fase do sistema primário para $\gamma_m = 0.2$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a), (c) – Com ADV Linear. (b), (d) – Com ADV pseudoelástico.	54
Figura 5.19 – Diagramas $\sigma - \varepsilon$ para $\gamma_m = 0.2$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento.	54
Figura 5.20 – Amplitude máxima para $\gamma_m = 0.10$ e $\delta = 0.0025$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.	55
Figura 5.21 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.10$ e $\delta = 0.0025$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema primário. (b) Sistema secundário.	55
Figura 5.22 – Espaço de fase do sistema primário para $\gamma_m = 0.10$ e $\delta = 0.0025$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a), (c) - ADV Linear. (b), (d) - ADV pseudoelástico.	56
Figura 5.23 – Diagramas $\sigma - \varepsilon$ para $\gamma_m = 0.10$ e $\delta = 0.0025$ aumentando-se a frequência de forçamento.	56
Figura 5.24 – Amplitude máxima para $\gamma_m = 0.10$ e $\delta = 0.0025$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.	57
Figura 5.25 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.10$ e $\delta = 0.0025$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.	58
Figura 5.26 – Espaço de fase do sistema primário para $\gamma_m = 0.10$ e $\delta = 0.0025$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a), (c)- Com ADV linear. (b), (d) – Com ADV pseudoelástico.	58
Figura 5.27 – Diagramas $\sigma - \varepsilon$ para $\gamma_m = 0.10$ e $\delta = 0.0025$ diminuindo-se a frequência de forçamento.	59
Figura 5.28 – Amplitude máxima para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.005$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.	60
Figura 5.29 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0025$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.	60
Figura 5.30 - Espaço de fase do sistema primário com ADV pseudoelástico para $\gamma_m = 0.15$, $\delta = 0.0025$ e $\varpi = 0.8$	60
Figura 5.31– Diagramas $\sigma - \varepsilon$ para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0025$ e $\varpi = 0.8$ aumentando-se a frequência de forçamento.	61
Figura 5.32- Amplitude máxima para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0025$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema primário. (b) Sistema secundário.	61
Figura 5.33 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0025$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.	62
Figura 5.34 - Espaço de fase do sistema primário com ADV pseudoelástico para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0025$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário (b) Sistema Secundário.	62
Figura 5.35 - Diagramas $\sigma - \varepsilon$ para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0025$ diminuindo-se a frequência de forçamento.	62
Figura 5.36– Amplitude máxima para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.005$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.	63
Figura 5.37– Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.005$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.	64
Figura 5.38 – Amplitude máxima para $\gamma_m = 0.25$ e $\delta = 0.03$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.	64
Figura 5.39 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.25$ e $\delta = 0.03$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.	65
Figura 5.40 – Amplitude máxima para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.005$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.	65
Figura 5.41 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.005$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.	66

Figura 5.42 – Amplitude máxima para $\gamma_m = 0.25$ e $\delta = 0.03$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a)	
Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.....	66
Figura 5.43 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.25$ e $\delta = 0.03$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a)	
Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros da SMA. (Savi M. A., Paiva, Baêta-Neves, & Pacheco, 2002).....	21
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos

A	Área	[m ²]
ω	Frequência de excitação	[Hz]
T	Temperatura	[K]
U	Coefficiente 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]
α	Difusividade térmica	[m ² /s]
Δ	Varição entre duas grandezas similares	
ρ	Densidade	[m ³ /kg]

Grupos Adimensionais

$\dot{\beta}_1$	Taxa de variação da fração volumétrica martensita não maclada (+)
$\dot{\beta}_2$	Taxa de variação da fração volumétrica martensita não maclada (-)
$\dot{\beta}_3$	Taxa de variação da fração volumétrica austenítica
ζ	Fator de amortecimento
γ_m	Razão entre massas
f	Razão entre frequências naturais

Subscritos

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

Sobrescritos

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

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Sistemas mecânicos de diversos tipos e em diferentes áreas 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 custos diversos. Nesse contexto, surgiu a necessidade de estudos que objetivassem a compreensão adequada desses fenômenos e uma consequente eliminação ou suavização deles.

Para Meirovitch (2001), um dos principais problemas a ser evitado na maioria dos sistemas é o fenômeno da ressonância. Neste contexto, dado um sistema forçado harmonicamente, dependendo de parâmetros do sistema 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 deformações plásticas de elementos que compõe o sistema devido a essas grandes amplitudes.

Uma técnica desenvolvida com o intuito de controlar, reduzir ou até mesmo eliminar vibrações indesejadas é a utilização de absorvedores dinâmicos de vibrações (ADVs). 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 (Inman, 1994). Os ADVs tradicionais funcionam como supressores de vibração em estreitas bandas operacionais de frequências impostas aos sistemas mecânicos por forças externas, ou seja, eles redistribuem energia do sistema de forma eficiente em frequências de excitação específicas. Agem de forma que sua oscilação se oponha a força de excitação aplicada no sistema primário.

O estudo e desenvolvimento de dispositivos absorvedores que compreendam uma faixa maior de frequência de operação têm tido grande importância no meio acadêmico e na indústria. Uma alternativa que vem sendo estudada é o uso de materiais inteligentes como elemento de rigidez. Como exemplo, pode-se citar as ligas de memória de forma (SMAs, Shape Memory Alloys), visto que elas podem ter seu valor de rigidez alterado devido a alguns parâmetros relacionados à tensão e à temperatura. Outra característica que merece destaque no contexto de reduzir vibrações indesejáveis é a grande capacidade dessas ligas em dissipar energia (Lagoudas, 2008).

Segundo Lagoudas (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, podem ter sua

rigidez, frequências naturais, dentre outras propriedades mecânicas alteradas, 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), 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) por meio 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 temperaturas consideradas altas, após a retirada da carga aplicada. Nesse ciclo de aplicação e retirada de carga, o material apresenta uma grande capacidade de dissipação de energia devido à presença de um laço de histerese relacionado com a rigidez do material. Esses fenômenos vêm possibilitando o emprego de SMAs em inúmeras aplicações.

1.2 OBJETIVOS

Nesse trabalho, objetiva-se caracterizar dinamicamente um absorvedor de vibrações (ADV) pseudoelástico constituído por elementos de liga com memória de forma (SMA). O dispositivo estudado consiste em um sistema massa-mola-amortecedor, sendo a mola de SMA NiTi. A ideia básica norteadora é que o comportamento pseudoelástico do elemento de rigidez do ADV resulte em melhores resultados, quando comparado a um ADV linear clássico, no que se refere à redução da amplitude máxima de oscilação nas frequências de ressonância ou a um aumento da banda operacional do absorvedor. Vale mencionar que, comumente, os trabalhos que envolvem a utilização de SMA em absorvedores exploram a mudança das propriedades da liga com a variação da temperatura, ou seja, consistem em um dispositivo ativo ou semi-ativo, como apresenta Tiseo *et al.*(2010), Williams *et al.*(2002 e 2005) e Brennan (2006) . Neste trabalho, o objetivo é explorar apenas a capacidade de dissipar energia do material, devido à presença do laço de histerese no regime pseudoelástico, em um absorvedor passivo.

1.3 METODOLOGIA

Toda as análises apresentadas neste trabalho são realizadas a partir de uma abordagem numérica. O absorvedor é modelado como um oscilador 1GL cuja rigidez é representada por um elemento de SMA. Inicialmente, o comportamento dinâmico desse sistema 1GL é investigado buscando-se compreender a complexidade da resposta dinâmica de um sistema 1GL pseudoelástico.

Em seguida, esse oscilador de SMA com 1GL, representando a absorvedor, é acoplado a um oscilador de 1GL linear, que representa o sistema primário. Nessa etapa, pretende-se investigar a

dinâmica desse sistema 2GL para diferentes forçamentos e razões de massa (do absorvedor em relação ao sistema primário) e também comparar o desempenho desse sistema com um sistema equivalente com ADV linear.

Cabe mencionar que as variedades de fenômenos exibidos pelas SMAs tornam sua modelagem bastante complexa, o que dificulta a formulação de um modelo geral capaz de capturar todos esses fenômenos que possam ocorrer. Além disso, devido às suas características não lineares 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.

Ressalta-se que no desenvolvimento de um projeto que contemple esses materiais, é extremamente importante o conhecimento sobre o seu comportamento termomecânico estático e dinâmico, ou seja, 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. Complementarmente, é vital o entendimento sobre o modelo constitutivo que descreve o comportamento termomecânico desses materiais, visto que toda a análise numérica será governada pelos parâmetros estabelecidos no modelo.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Neste primeiro capítulo é apresentada a introdução do trabalho, incluindo objetivos, metodologia e organização do texto. O segundo capítulo apresenta os fundamentos teóricos necessários para o entendimento do trabalho. Inicialmente, apresentam-se algumas ferramentas qualitativas utilizadas na investigação da dinâmica de sistemas não-lineares. Em seguida, alguns conceitos sobre absorvedores dinâmicos amortecidos e não amortecidos são apresentados com o objetivo de fornecer uma compreensão necessária acerca desse dispositivo que é o tema central do trabalho.

O terceiro capítulo apresenta uma descrição sobre as ligas de memória de forma com ênfase no comportamento pseudoelástico do material, em que são abordados aspectos cristalográficos e aspectos termomecânicos. Nesse capítulo, apresenta-se ainda uma introdução sobre os diversos modelos termomecânicos existentes que descrevem o comportamento das SMA, incluindo o modelo utilizado neste trabalho. Por último, apresentam-se alguns trabalhos que utilizam SMAs para a redução de vibrações.

No quarto capítulo, apresenta-se a modelagem do oscilador 1GL pseudoelástico, assim como os resultados das simulações realizadas para dois tipos de forçamento diferentes: forçamento aplicado diretamente na massa do sistema e excitação da base.

No quinto capítulo, de forma semelhante ao realizado no capítulo quarto, apresenta-se a modelagem e uma análise dinâmica do oscilador 2GL estudado. Nesse caso, o sistema 1GL pseudoelástico avaliado no capítulo quatro é acoplado a um oscilador 1GL linear, formando um sistema 2GL. O desempenho do absorvedor é avaliado a partir das amplitudes máximas de resposta do sistema primário, e os desempenhos do ADV pseudoelástico e do ADV linear clássico são comparados.

No sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 DINÂMICA NÃO LINEAR

O objetivo desta seção é apresentar ferramentas para análise da dinâmica de sistemas não-lineares que serão utilizadas neste trabalho. A análise de sistemas não-lineares possui duas abordagens distintas. Uma delas é qualitativa, onde o objetivo principal é entender o comportamento global da evolução do sistema dinâmico. Enquanto a outra é quantitativa e procura analisar a evolução do sistema no tempo (Savi, Apostila: Dinâmica Não Linear e Caos, 2003).

Nessa seção são introduzidos os conceitos fundamentais para uma análise qualitativa do sistema dinâmico: o espaço de fase, a seção de Poincaré e o diagrama de bifurcação. Para uma análise quantitativa, esses conceitos são essenciais, na medida em que fornecem uma compreensão global do comportamento do sistema.

2.1.2 ESPAÇO DE FASE

O espaço de fase ou espaço de estado pode ser definido como o espaço vetorial de um sistema dinâmico, representado pelas suas variáveis dependentes. Cada ponto do espaço de fase representa um estado do sistema, e por esse ponto, passa apenas uma trajetória. À medida que o sistema evolui no tempo, os sucessivos pontos representativos traçam uma curva no espaço de fase, definindo uma trajetória.

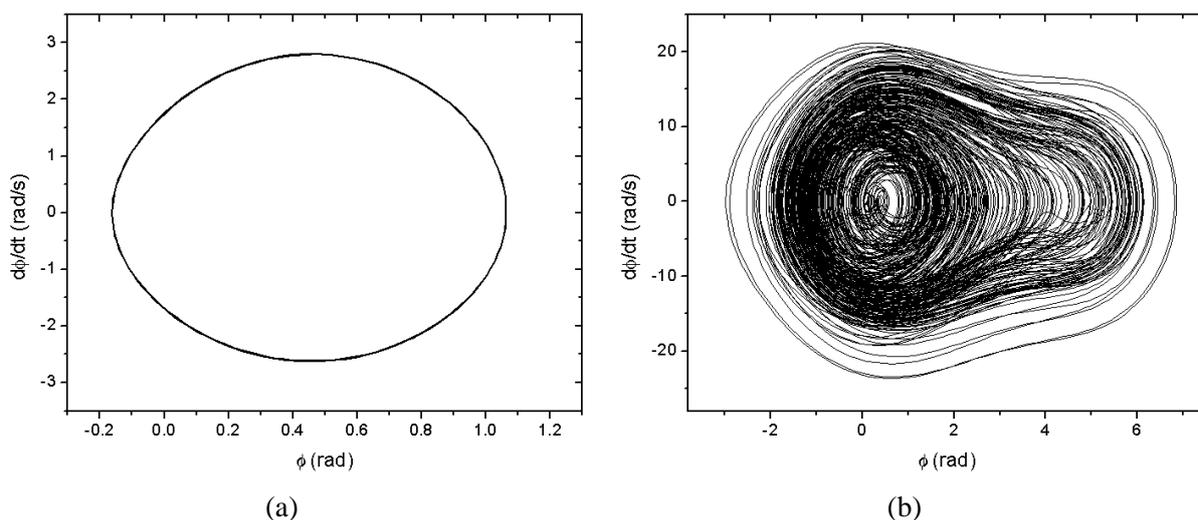


Figura 2.1 - Espaços de Fase: (a) Periódico, período 1; (b) Caótico. (De Paula, 2005)

Quando o sistema exibe um comportamento periódico, ele visita repetidas vezes o mesmo conjunto de pontos, originando, assim, uma curva fechada. No entanto, no caso de sistemas em regime caótico, devido à falta de periodicidade, as trajetórias nunca se fecham. Cabe ressaltar que sistemas quasiperiódicos também apresentam como trajetória uma curva aberta. A Figura 2.1(a) apresenta uma

trajetória periódica de periodicidade 1, enquanto a Figura 2.1(b) apresenta uma trajetória caótica típica. Ambas as trajetórias foram geradas numericamente. Uma solução periódica é aquela que se repete em um dado intervalo de tempo denominado período. Se T é o período de um movimento periódico, então kT também é, onde k é qualquer número inteiro.

2.1.3 SEÇÃO DE POINCARÉ

A seção de Poincaré é uma ferramenta muito utilizada, que possibilita uma melhor compreensão da dinâmica global do sistema, identificando o comportamento no espaço de fase. Este procedimento permite que um sistema dinâmico contínuo no tempo (fluxo) seja modelado como um sistema discreto (mapa), reduzindo-se, desta forma, a dimensão do sistema.

A construção do mapa baseia-se na determinação dos pontos de interseção da trajetória do sistema com um hiperplano. Este é definido por um ponto escolhido arbitrariamente no espaço de fase e pela condição de perpendicularidade desse hiperplano com a trajetória que passa pelo plano escolhido. O conjunto desses pontos de interseção constitui um mapa de Poincaré do sistema e o hiperplano escolhido é chamado de seção de Poincaré (Otani & Jones, 1997).

Não existe um método geral para a construção de uma seção de Poincaré. No entanto, para sistemas sujeitos a um forçamento periódico, é comum a adoção como seção de Poincaré uma superfície relacionada a uma determinada fase de forçamento, como mostrado na Figura 2.2. Portanto, a trajetória é amostrada a cada intervalo discreto de tempo, dando origem à seção de Poincaré. Desta forma, a variável de tempo é eliminada.

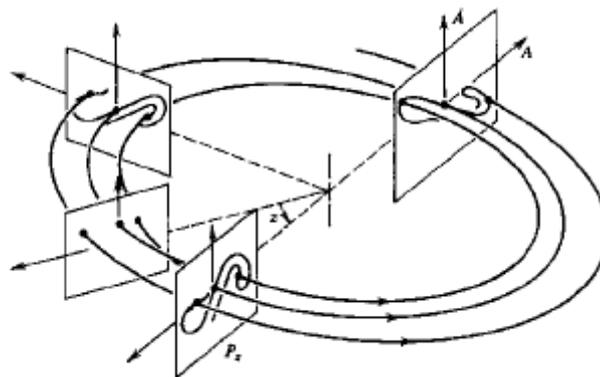


Figura 2.2 - Construção da seção de Poincaré. (Moon, 1992).

Desse modo, o intervalo de tempo entre cada amostragem é igual ao período de forçamento, $T = \frac{2\pi}{\omega}$. Neste caso, pode-se ter algumas representações em uma seção de Poincaré, conforme apresenta a Figura 2.3:

- Um único ponto para casos de órbitas de período-1, com frequência igual a ω .

- Um conjunto de pontos para o caso de órbitas com uma frequência múltipla de ω . Por exemplo, dois pontos para órbita de período-2 e três pontos para órbitas de período-3.
- Uma curva fechada para o caso de quase-periodicidade; e
- Um conjunto infinito de pontos organizados, usualmente possuindo uma geometria fractal com regiões vazias e regiões densas, organizadas em lamelas. Esse conjunto pode representar um atrator estranho, para o caso de movimento caótico; ou uma sela caótica, para o caso de caos transiente.

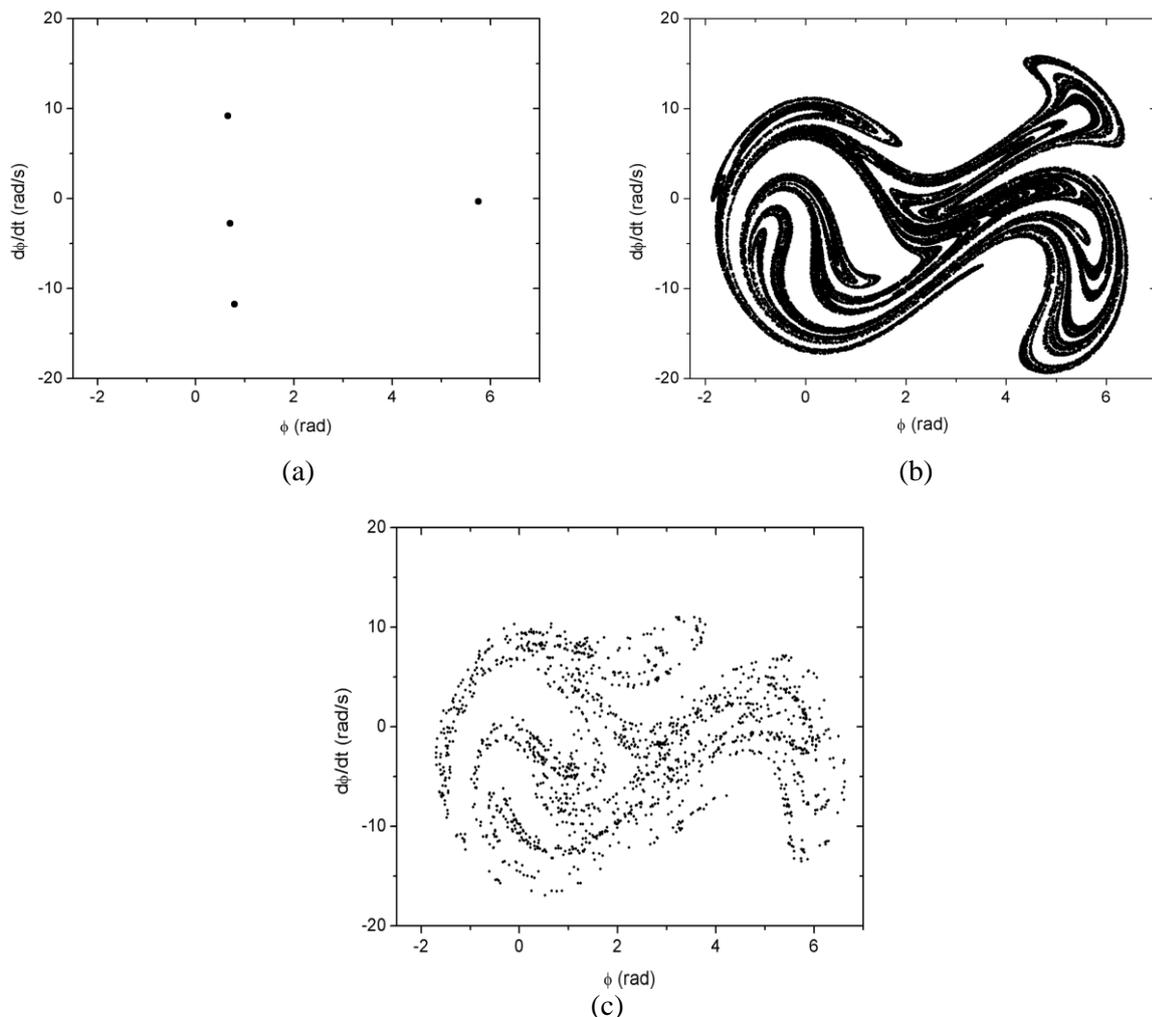


Figura 2.3 - Seções de Poincaré. (De Paula, 2005).

2.1.4 DIAGRAMA DE BIFURCAÇÃO

O termo bifurcação está associado a uma mudança qualitativa na natureza da resposta do sistema, como consequência da variação de qualquer um de seus parâmetros. Os diagramas de bifurcação são bastante utilizados para analisar o comportamento global do sistema, avaliando onde e como ocorrem mudanças na resposta do sistema (Savi, Dinâmica não linear e caos, 2006).

As variações na reposta de um sistema que conduzem ao surgimento do comportamento caótico são chamadas de rotas para o caos, e podem ser divididas em duas categorias:

- Bifurcações locais, que incluem as sequências de bifurcações, como por exemplo, duplicação de período; e
- Bifurcações globais, que são caracterizadas por mudanças bruscas de comportamentos regulares para caóticos e vice-versa, como no caso de ocorrência de crise, fenômeno que ocasiona mudanças repentinas na dinâmica caótica.

O fenômeno da bifurcação está estreitamente relacionado com a existência do caos no sentido de que um sistema dinâmico que não apresenta algum tipo de bifurcação não apresenta uma resposta caótica. Deve-se destacar, no entanto, que a recíproca não é verdadeira, ou seja, um sistema que apresente bifurcações não necessariamente apresenta uma resposta caótica. A representação do diagrama de bifurcação é feita através de um gráfico que relaciona alguma variável do sistema, como posição ou velocidade, versus algum parâmetro do sistema, que é variado de forma quase estática (Savi, Apostila: Dinâmica Não Linear e Caos, 2003).

2.2 ABSORVEDOR DINÂMICO DE VIBRAÇÕES NÃO AMORTECIDO

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 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.

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.

Considerando-se um sistema massa-mola de um grau de liberdade, sem amortecimento, sujeito a uma excitação harmônica. Objetiva-se reduzir as amplitudes de oscilação desse sistema por meio do acoplamento de um absorvedor dinâmico de vibrações composto para um sistema massa-mola secundário, conforma apresentado na Figura 2.4.

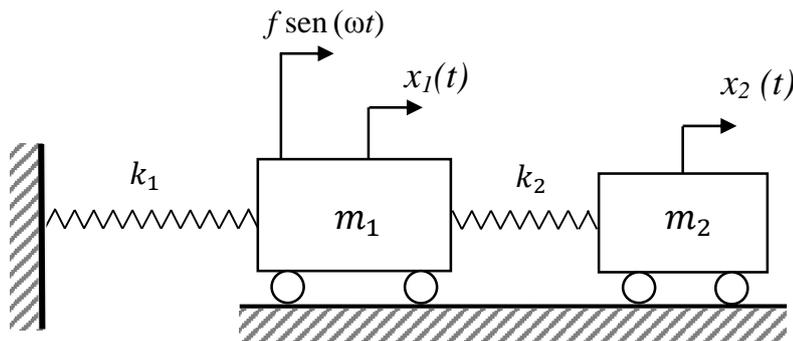


Figura 2.4 – Oscilador 2GL: absorvedor dinâmico acoplado a um sistema primário.

Conforme apresentado por Meirovitch (2001) e Inman (1994), tem-se que as amplitudes máximas do sistema primário, X_1 , e do sistema secundário, X_2 , são dadas por:

$$X_1 = \frac{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] x_{est}}{\left[1 + \gamma \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \gamma \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2} \quad e \quad 2.1$$

$$X_2 = \frac{x_{est}}{\left[1 + \gamma \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \gamma \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2} \quad 2.2$$

Sendo:

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

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

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

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

Como pode ser observado a partir das Equações 2.1 e 2.2, 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 igual à 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.

A Figura 2.5 apresenta as amplitudes máximas de resposta de um sistema que se deseja diminuir os níveis de vibração sem e com o absorvedor dinâmico acoplado. A partir do gráfico pode-se observar a banda operacional do ADV, onde os níveis de vibração do sistema primário são menores em comparação ao caso sem absorvedor. Fora dessa banda operacional, no entanto, surgem dois novos picos que devem ser evitados. .

O objetivo de estudar um absorvedor pseudoelástico é avaliar a possibilidade de melhorar o desempenho do absorvedor de vibrações clássico, seja por aumentar a banda operacional ou diminuir esses dois picos novos.

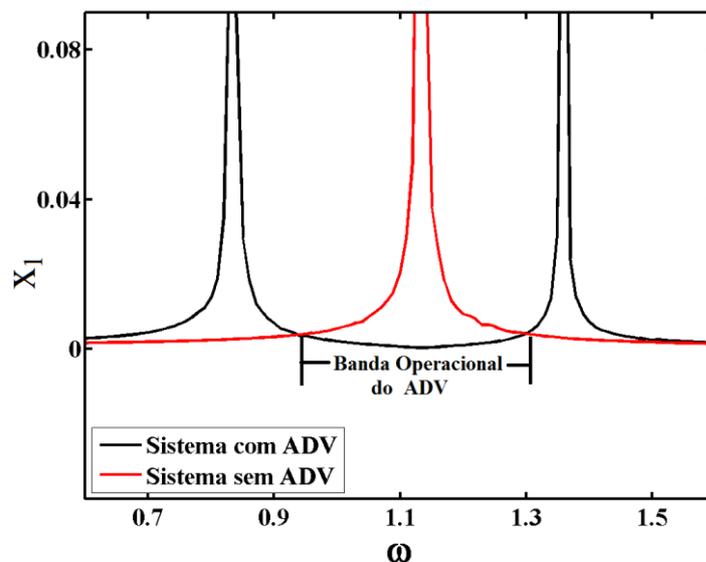


Figura 2.5 – FRF do sistema primário em função da variação da frequência de excitação.

2.3 ABSORVEDOR DINÂMICO DE VIBRAÇÕES AMORTECIDO

Segundo Inman (1994) e Meirovich (2001), assim como no caso do 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 amplitudes de oscilação. No caso com amortecimento, no entanto, a energia recebida pelo absorvedor é gradualmente dissipada. Como apresentado no final da seção anterior, na Figura 2.5, os picos gerados com a adição do absorvedor possuem uma magnitude que tende ao infinito na ausência de amortecimento. O amortecimento faz que esses picos sejam limitados.

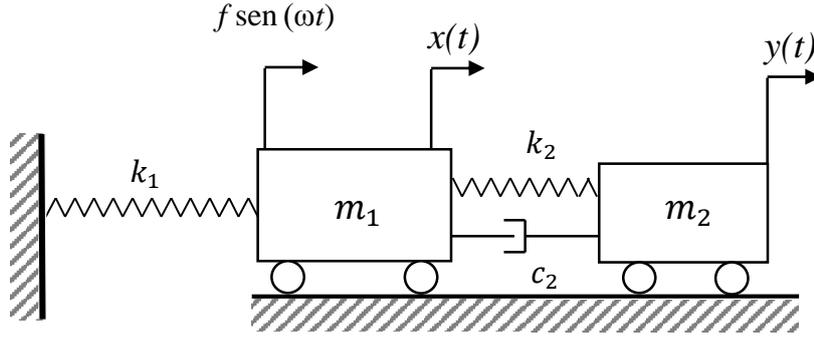


Figura 2.6 – Oscilador 2GL: ADV com amortecimento acoplado a um sistema primário.

Considera-se agora um sistema de um grau de liberdade, denominado sistema primário, com a adição de um ADV amortecido, como apresentado na Figura 2.6. As Equações 2.3 e 2.4 apresentam a amplitude de resposta do sistema primário e do absorvedor dinâmico, respectivamente.

$$\frac{X_1}{x_{est}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + (g^2 - f^2)^2}{[(2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \gamma g^2)^2 + [\gamma f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)]^2]} \right]^{1/2} e \quad 2.3$$

$$\frac{X_2}{x_{est}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + f^4}{[(2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \gamma g^2)^2 + [\gamma f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)]^2]} \right]^{1/2}, \quad 2.4$$

sendo:

$x_{est} = F_1/k_1$: 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

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

A Figura 2.7 apresenta as amplitudes de resposta do sistema primário em um caso genérico, para diferentes fatores de amortecimento ζ . Por meio desse resultado, pode-se observar a ação de um absorvedor dinâmico amortecido na amplitude de oscilação do sistema primário. É fácil perceber que quanto maior o valor de ζ , menores são as amplitudes máximas para cada frequência.

Cabe mencionar que 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 alcançar os valores das frequências de ressonância e o sistema experimentará grandes amplitudes. Com o amortecimento, essas vibrações são reduzidas, mas continuam sendo um problema.

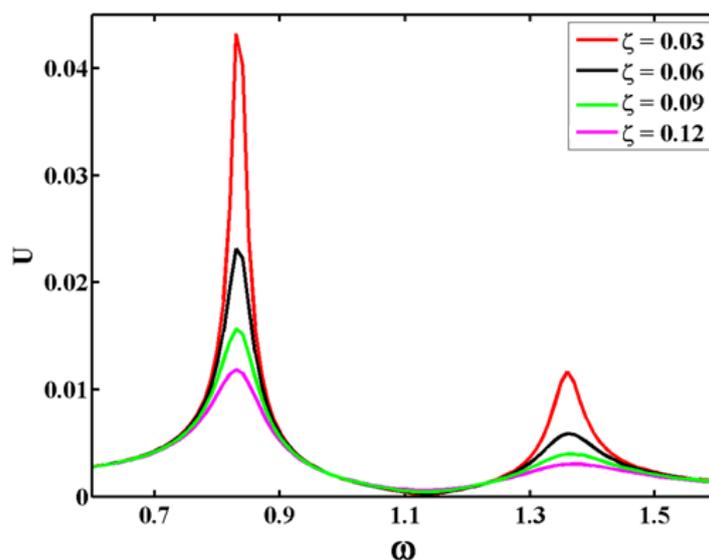


Figura 2.7 –FRFs do sistema primário para diferente fatores de amortecimento.

3 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

3.1 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) 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 quasiplasticidade constituem-se nos principais fatores que têm induzido a grande maioria das pesquisas sobre esse tipo de material.

No fenômeno quasiplástico, 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 a reorientação da estrutura cristalina do 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 temperaturas maiores que A_f após retirada da carga aplicada. A_f corresponde à temperatura acima da qual há somente a presença de austenita estável. Quando $T > A_f$ comumente se refere à altas temperaturas. Nesse ciclo de aplicação e remoção de carga, o material apresenta uma grande capacidade de dissipação de energia devido à presença de um laço de histerese. Em geral, essa resposta histerética está associada a transformações microestruturais martensíticas do material. Além disso, Savi & Paiva (2004) em uma análise qualitativa e quantitativa demonstram que a resposta dinâmica de sistemas com atuadores de SMA apresenta um comportamento intrínseco não-linear.

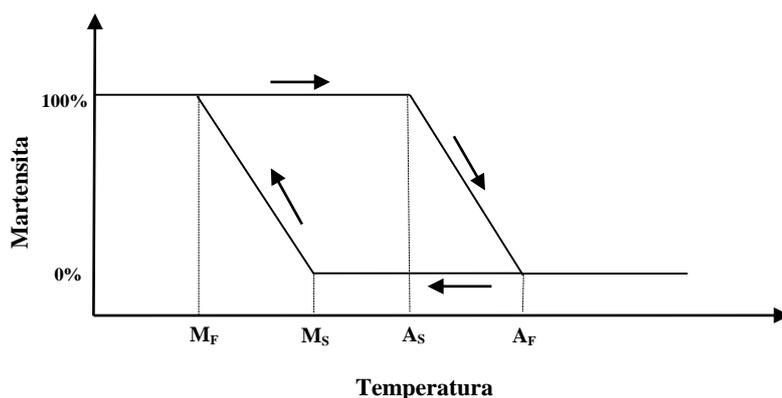


Figura 3.1 – Relação entre temperaturas e fases. (Da Silva, 2003).

No que tange aos fenômenos de mudanças de fase, Savi & Paiva (2006), Tiseo *et al.*(2010), Otsuka & Wayman (1998) e Da Silva (2003) afirmam que as propriedades características das SMAs possuem uma forte relação com temperatura e com tensão, haja vista que esses fenômenos ocorrem

devido às transformações martensíticas induzidas por elas. 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 3.1 apresenta a relação entre temperatura e porcentagem de fases na SMAs. A Figura 3.2 mostra como as temperaturas características das SMAs mudam com uma aplicação de carga.

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

Como se pode observar na Figura 3.1, 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 possíveis 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 estável 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 acima da qual há somente austenita.

Por meio da Figura 3.3, 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).

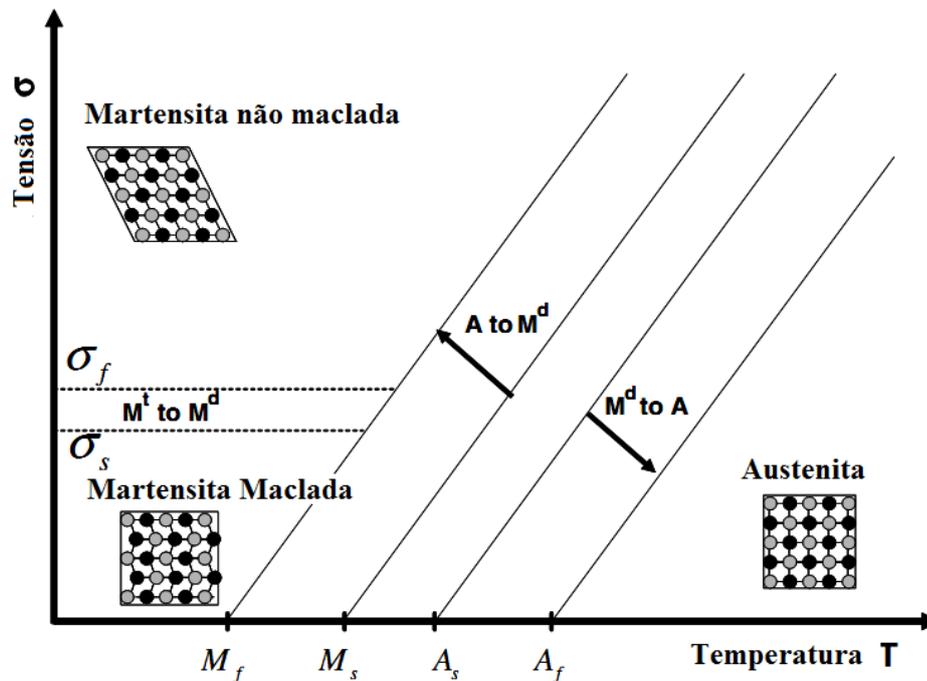


Figura 3.2 – Relação entre carga aplicada e temperaturas características. (Lagoudas, 2008).

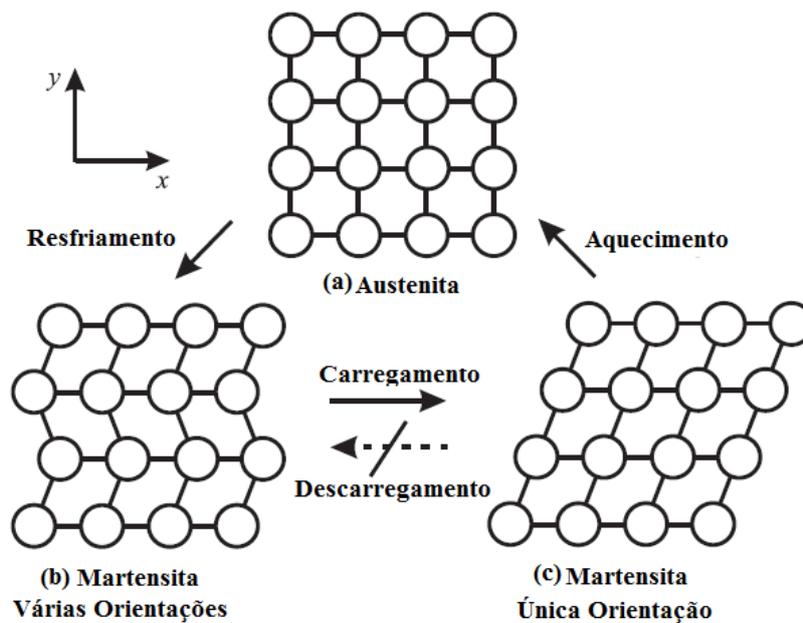


Figura 3.3–Figura esquemática da deformação e recuperação de forma da SMA em nível atômico. (Uehara, 2010).

3.2 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 termoelásticas”. 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 termoelástica consiste principalmente

em dois termos termoelásticos, 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 termoelásticos.

Para Otsuka & Wayman (1998), nas transformações termoelásticas 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 termoelásticas 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 3.4. Nessa figura, T_0 representa a temperatura de equilíbrio termodinâmico entre as duas fases e $\Delta G^{P-m}|_{m_s}$ 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 3.1.

$$T_0 = \frac{1}{2}(M_s + A_s) . \quad 3.1$$

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

$$\Delta G = \Delta G_c + \Delta G_s + \Delta G_e = \Delta G_c + \Delta G_{nc} , \quad 3.2$$

em que 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.

Conforme citado por 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 super esfriamento 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.

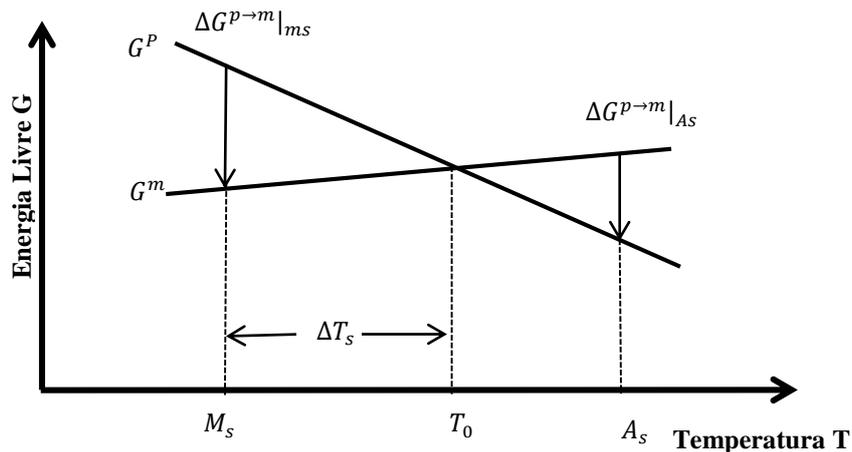


Figura 3.4 – Representação esquemática para as curvas de energia para a fase austenítica e a fase martensítica e suas relações com as temperaturas M_s e A_s . (Otsuka & Wayman, 1998).

3.2.1 ASPECTOS CRISTALOGRAFICOS DAS TRANSFORMAÇÕES MARTENSÍTICAS

Para Lagoudas (2008), Miyazaki *et al.*(2009) e Otsuka & Wayman (1998), 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 Figura 3.5, pode-se ver esquematicamente o *habit plane* entre a fase martensítica maclada e a austenítica.

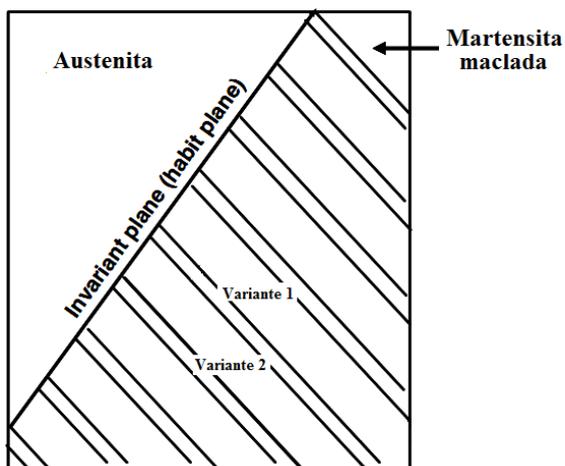


Figura 3.5 – Representação esquemática da interface entre as fases austeníticas e martensíticas. (Lagoudas, 2008).

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 (Lagoudas, 2008).

3.2.3 EFEITO DE PSEUDOELASTICIDADE

Para Tiseo *et al.*(2010), Otsuka & Wayman (1998) 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 Figura 3.6 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.

Ainda na Figura 3.6, 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 e o 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), apresentam 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.

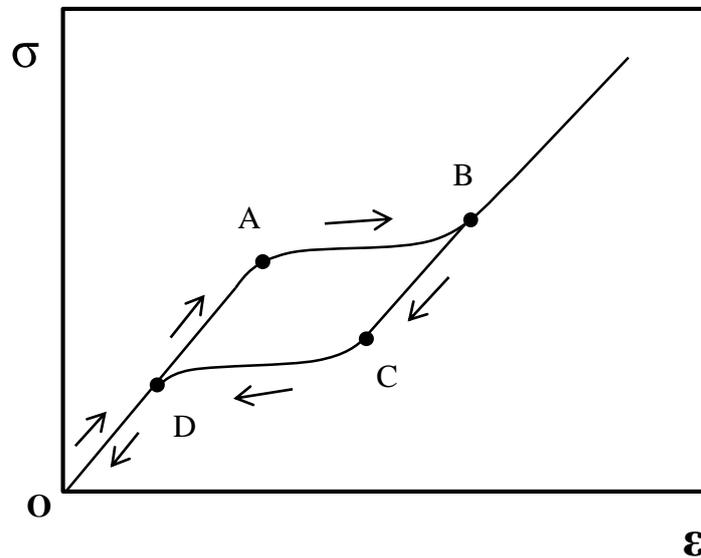


Figura 3.6 – Diagrama σ - ϵ para as ligas de memória de forma.

3.3 MODELO CONSTITUTIVOS PARA SMAS

Para que dispositivos compostos por elementos de SMA sejam desenvolvidos ou aprimorados, conforme elucidado Otsuka & Wayman (1998) , faz-se necessário um completo entendimento de suas características termomecânicas. No mesmo trabalho, os autores ainda pontuam que devido ao fato de o comportamento das SMAs depender 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 físico-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, afirmam 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) justificam 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. Essas limitações, no entanto, vem sendo contornada com os modelos desenvolvidos por diversos autores (Paiva et al., 2005; Müller & Wilmanski, 1980; Achenbach, 1989; Xu & Morris, 1993; Falk, 1980).

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 Fremond (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) utilizam o mesmo modelo descrito anteriormente 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), Baeta Neves *et al.*(2004) e 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.

$$\sigma = E\varepsilon + [E\alpha_h + \alpha](\beta_2 - \beta_1) - \Omega(T - T_0), \quad 3.3$$

$$\dot{\beta}_1 = \frac{1}{\eta} \{ \alpha \varepsilon + \Lambda(T) + (2\alpha\alpha_h + E\alpha_h^2)(\beta_2 - \beta_1) + \alpha_h [E\varepsilon - \Omega(T - T_0)] - \partial_{\beta_1} J_\pi \} + \partial_{\dot{\beta}_1} J_\chi, \quad 3.4$$

$$\dot{\beta}_2 = \frac{1}{\eta} \{ -\alpha \varepsilon + \Lambda(T) - (2\alpha\alpha_h + E\alpha_h^2)(\beta_2 - \beta_1) - \alpha_h [E\varepsilon - \Omega(T - T_0)] - \partial_{\beta_2} J_\pi \} + \partial_{\dot{\beta}_2} J_\chi, \quad 3.5$$

$$\dot{\beta}_3 = \frac{1}{\eta_3} \left\{ -\frac{1}{2}(E_A - E_M) [\varepsilon + \alpha_h(\beta_2 - \beta_1)]^2 + \Lambda_3(T) + (\Omega_A - \Omega_M)(T - T_0) [\varepsilon + \alpha_h(\beta_2 - \beta_1)] - \partial_{\beta_3} J_\pi \right\} + \partial_{\dot{\beta}_3} J_\chi \quad 3.6$$

em que 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, $\Omega = \Omega_M + \beta_A(\Omega_A -$

Ω_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 $\sigma - \varepsilon$. 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 à 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:

$$\Lambda = -L_0 + \frac{L}{T_M}(T - T_M) \quad e \quad 3.7$$

$$\Lambda_A = -L_0^A + \frac{L^A}{T_M}(T - T_M), \quad 3.8$$

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.

3.4 COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO ESTÁTICO DE UMA SMA NI-TI

Nessa seção as características das SMAs apresentadas na seção 3.2 são avaliadas a partir de simulações numéricas utilizando-se o modelo constitutivo proposto por Paiva *et al.*(2005). A liga avaliada é do tipo Ni-Ti e seus parâmetros são elucidados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros do SMA. (Savi M. A., Paiva, Pacheco, & Baeta Neves, 2002)

E_A [GPa]	E_M [GPa]	α [Pa]	α_h [MPa]	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]	T_A [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

3.4.1 PSEUDOELASTICIDADE EM UMA SMA NI-TI

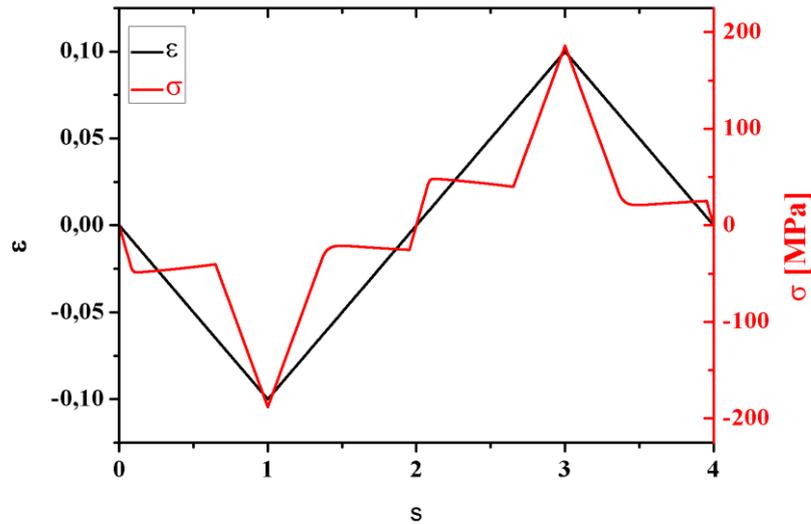


Figura 3.7 - Desenvolvimento da tensão e da deformação com relação ao tempo.

De forma a apresentar o comportamento pseudoelástico da SMA elucidado na seção 3.2, 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 A_f .

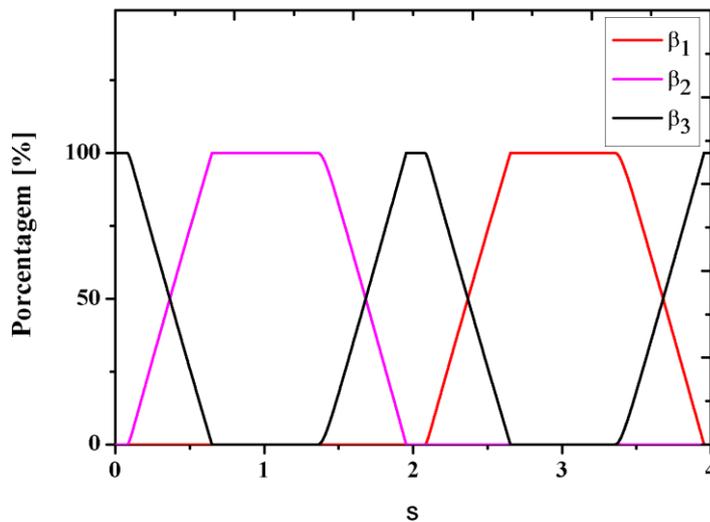


Figura 3.8 – Transformação e porcentagem de fase ao longo do tempo para a pseudoelasticidade.

A Figura 3.7 apresenta o desenvolvimento do carregamento e da deformação no tempo, enquanto a Figura 3.8 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.

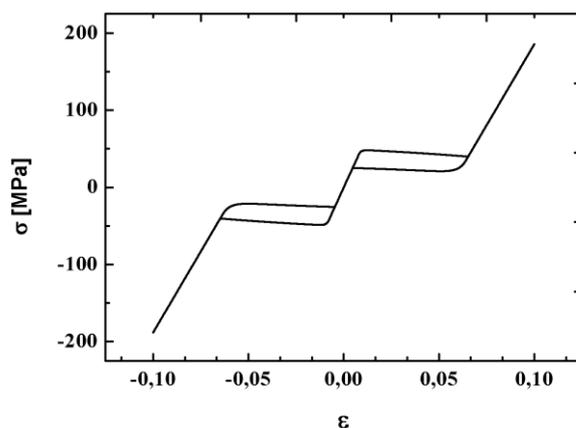


Figura 3.9 - Diagrama $\sigma - \epsilon$ para a liga de memória de forma

A Figura 3.9 apresenta o diagrama tensão-deformação, em que pode ser notada a presença de laços de um 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.

3.5. UTILIZAÇÃO DE SMAS EM PROBLEMAS DE VIBRAÇÃO

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 existam diversas aplicações, como na área médica, segundo apresenta Machado & Savi (2002 e 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, como mostra Tiseo *et al.*(2010), Stinikova *et al.*(2009) e Savi *et al.*(2011), até aplicações em estruturas civis submetidas a excitação por terremotos, conforme pode-se verificar em van Humbeek (2003) e Oberaigner *et al.*(2002).

A seguir, são abordados dois trabalhos que utilizam SMAs em problemas de vibração. 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 à ADV adaptativos com SMA exploram apenas a qualiplasticidade dessas ligas. O último trabalho apresentado explora a pseudoelasticidade das SMAs para o controle de propagação de trincas.

3.5.1 SMA EM REGIME QUASIPLÁSTICO

Tiseo *et al.*(2010) apresentam 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 3.10 apresenta o dispositivo em questão.

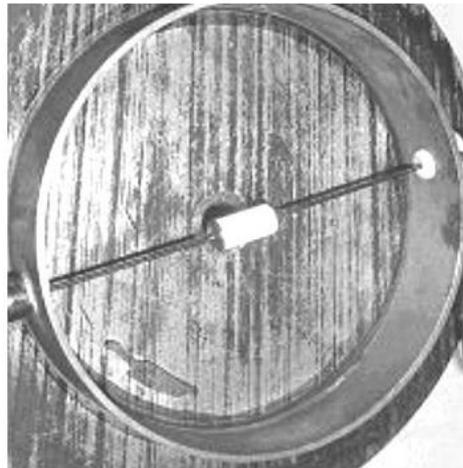


Figura 3.10 – Absorvedor dinâmico adaptativo proposto por (Tiseo, Concilio, Ameduri, & Gianvito, 2010).

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. Os autores reforçam 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 observada na Figura 2.5.

Em seu dispositivo, Tiseo *et al.*(2010) se valem 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.

3.5.2 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 (Li & Qian, 2010).

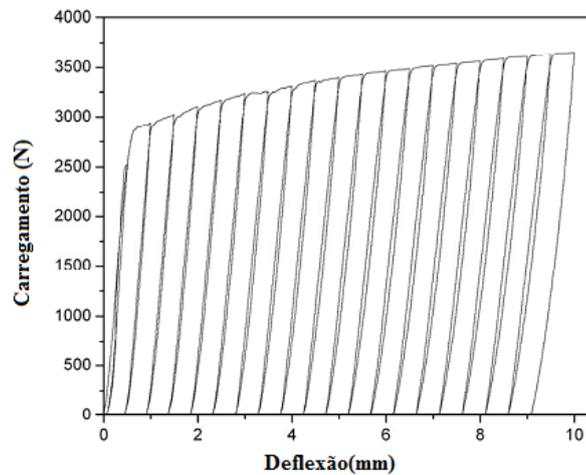


Figura 3.11 – Viga de Concreto Reforçada com Aço Comum. (Li & Qian, 2010).

Para Li & Qian (2010), um número significativo 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 3.11 têm-se os resultados para a viga reforçada com aço comum, enquanto na Figura 3.12 são apresentados os resultados para a viga reforçada com SMA. Na Figura 3.12, pode-se perceber o comportamento histerético apresentado pelas SMAs. Depois do surgimento de trincas, a deformação da SMA permanece pequena e a tensão também, visto que seu módulo de elasticidade é cerca de 1/5 do do aço comum.

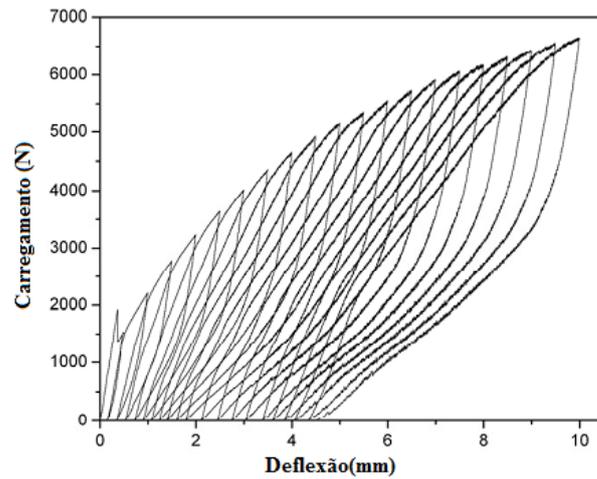


Figura 3.12– Viga de Concreto Reforçada com SMA. (Li & Qian, 2010).

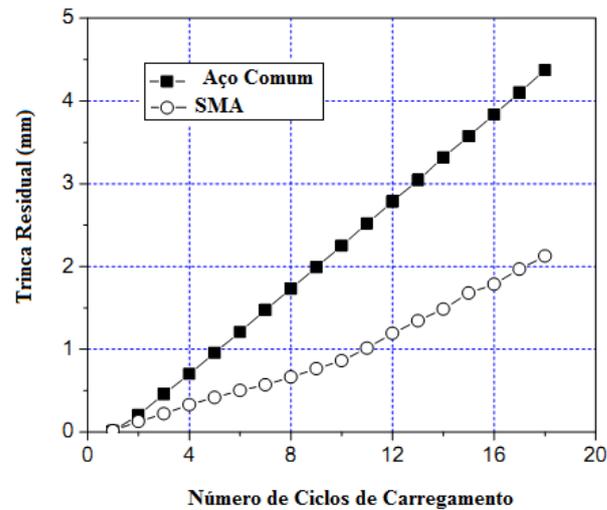


Figura 3.13 – Análise do Crescimento de Trincas. (Li & Qian, 2010).

Para ilustrar os efeitos superelásticos no controle de trincas, a

Figura 3.13 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.

4 OSCILADOR 1GL PSEUDOELÁSTICO

Este capítulo apresenta uma investigação do comportamento dinâmico de um oscilador 1GL composto por uma massa, um amortecimento viscoso linear e um elemento de rigidez de SMA, representando um absorvedor dinâmico. Duas possibilidades de forçamento diferentes são consideradas, conforme apresentado na Figura 4.1. Inicialmente, considera-se um forçamento harmônico aplicado diretamente na massa do sistema, conforme feito em Oliveira *et al.*(2012). Em seguida, considera-se uma excitação de base também harmônica com velocidade, $\dot{y}(t)$, constante, de acordo com Oliveira *et al.*(2013). As duas condições de forçamento são consideradas pois os modelos podem representar situações reais distintas. Dessa forma, é interessante avaliar o comportamento dinâmicos para cada forçamento.

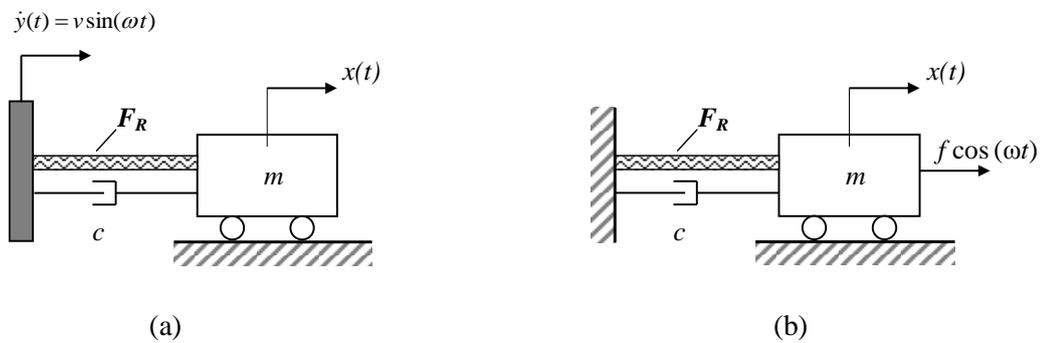


Figura 4.1 - Oscilador de 1 grau de liberdade: (a) Excitação harmônica de base. (b) Forçamento harmônico aplicado diretamente ao corpo.

4.3 MODELAGEM DO OSCILADOR

O elemento de rigidez de SMA consiste em um elemento de comprimento L e área de seção transversal b . A equação governante do sistema pode ser obtida a partir do balanço de forças e assumindo que a força de restituição fornecida pelo elemento de SMA, F_R , é dada por meio das equações constitutivas apresentadas na seção 3.3. Assim, têm-se a seguinte equação:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + F_R = F_0 \cos(\omega t), \quad 4.1$$

em que a força de restituição é dada por $F_R = \sigma A$ e $u = (x - y)$. Para o caso em que o forçamento é aplicado diretamente no oscilador tem-se que a amplitude de forçamento é $F_0 = f$ e $y=0$. Para forçamento de base, tem-se que $F_0 = -m\dot{v}\omega$. Utilizando a equação constitutiva relativa à tensão na SMA, obtêm-se:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + E\varepsilon + [\dot{E}\dot{\alpha}_n + \alpha](\beta_1 + \beta_2) - \Omega(T - T_0) = F_0 \cos(\omega t). \quad 4.2$$

Para obtenção da forma adimensional da equação, são considerados os seguintes termos:

$$\begin{aligned}\omega_0 &= \frac{E_{RA}}{mL}; \bar{\alpha}^{C,T} = \frac{\alpha^{C,T}A}{mL\omega_0^2} = \frac{\alpha^{C,T}}{E_R}; \bar{\alpha}_h^{C,T} = \frac{\bar{\alpha}_h^{C,T}E_{RA}}{mL\omega_0^2} = \alpha_h^{C,T}; \\ \bar{\Omega} &= \frac{\Omega_{RA}T_R}{\omega_0^2}; \mu_\Omega = \frac{\Omega}{\Omega_R}; \delta = \frac{F_0}{mL\omega_0^2} = \frac{F}{E_{RA}}; \bar{\alpha}_h^{C,T} = \frac{\bar{\alpha}_h^{C,T}E_{RA}}{mL\omega_0^2} = \alpha_h^{C,T}; \\ \varpi &= \frac{\omega}{\omega_0}; \mu_E = \frac{E}{E_R}; \xi = \frac{c}{m\omega_0}; \nu = \frac{\dot{y}}{\omega_0 l}.\end{aligned}\tag{4.3}$$

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 linearizado.

$$U = \frac{u}{L}; \quad \theta = \frac{T}{T_R}; \quad \tau = \omega_0 t.\tag{4.4}$$

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:

$$U'' + \xi U' + \mu_E U + (\bar{\alpha}^c + \mu_E \alpha_h^c) \beta_2 - (\bar{\alpha}^T + \mu_E \alpha_h^T) \beta_1 - \mu_\Omega \bar{\Omega} (\theta - \theta_0) = \delta \text{sen}(\varpi \tau).\tag{4.5}$$

Na Equação 4.5, as derivadas com relação ao tempo são representadas por $(\)' = d(\)/d\tau$. Para o caso em que se tem excitação harmônica na base, $\delta = -\frac{mv\omega}{ml\omega_0^2} = -\frac{mv\omega}{E_{RA}}$. No caso de forçamento aplicado diretamente ao oscilador, $\delta = \frac{f}{ml\omega_0^2} = \frac{f}{E_{RA}}$.

4.4 COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA 1GL PSEUDOELÁSTICO COM FORÇAMENTO APLICADO DIRETAMENTE NO OSCILADOR

A partir da Equação 4.5, 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, no que se refere às amplitudes máximas. Nesta análise, avaliam-se a dinâmica do sistema e como ele está relacionado com a evolução do diagrama tensão-deformação da SMA.

Três amplitudes de forçamento são estudadas. Para cada amplitude, aumenta-se e diminui-se a frequência de forçamento na região de ressonância. Em cada frequência de forçamento, as equações de governo são integradas e a amplitude máxima de resposta em regime permanente é obtida. Quando a frequência é variada, o último estado do sistema na frequência anterior é considerado como condição inicial para a nova frequência. A seguir são apresentados os resultados para cada amplitude de forçamento avaliada.

- **Análise com $\delta = 0.0001$**

Inicialmente, considera-se uma amplitude de forçamento consideravelmente pequena, $\delta = 0.001$. Para esta amplitude são realizadas duas análises. Na primeira, a frequência de forçamento, é aumentada de $\varpi = 0.8$ até $\varpi = 1.5$ de forma quasi-estática e as amplitudes máximas de resposta do oscilador em regime permanente são verificadas. Em seguida, é realizado um procedimento semelhante, no entanto, diminuindo-se a frequência de forçamento. A Figura 4.2 apresenta os resultados das duas análises, em que se verifica comportamentos iguais em ambos os casos. Nessa primeira análise, observa-se um comportamento típico de sistemas lineares. Isso ocorre devido ao fato de a tensão no material não ser suficiente para induzir a formação do laço de histerese e consequente mudança na rigidez.

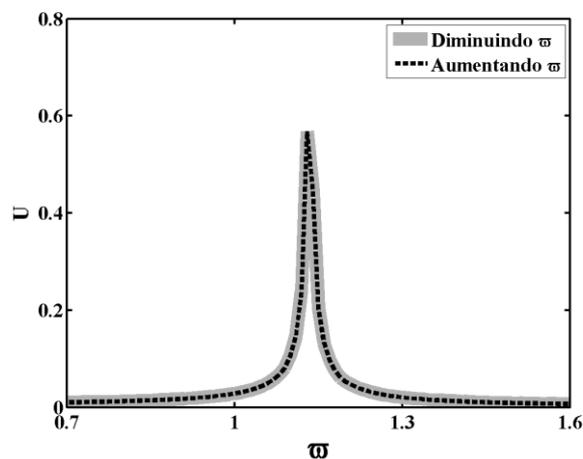


Figura 4.2 – Amplitudes máximas de resposta aumentando-se e diminuindo-se a frequência de forçamento para $\delta = 0.001$.

- **Análise com $\delta = 0.008$**

A mesma análise considerada anteriormente é agora realizada para $\delta = 0.008$. A Figura 4.3 apresenta os resultados para o caso de aumento da frequência de forçamento. Na frequência de aproximadamente $\varpi = 0.82$, observa-se a ocorrência de um salto dinâmico.

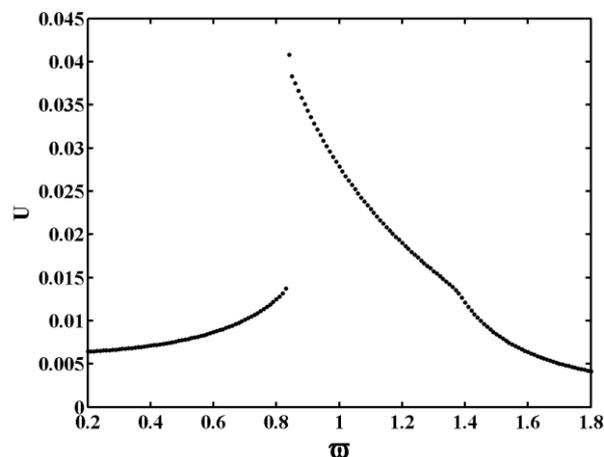
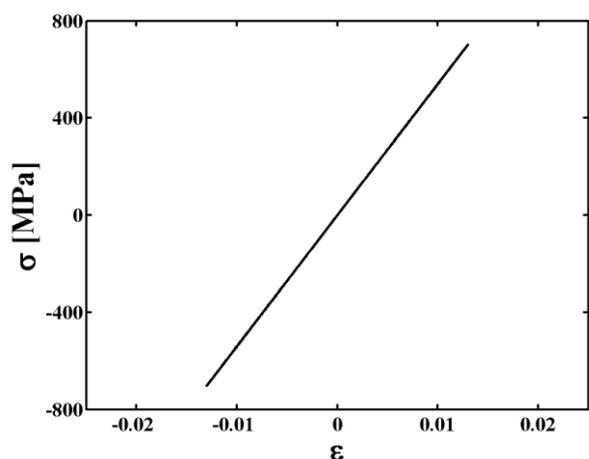
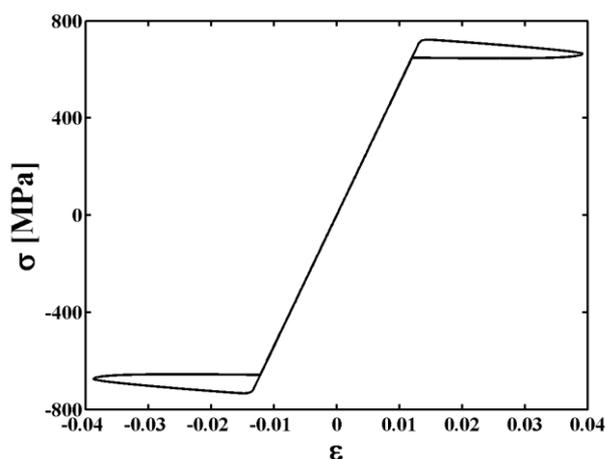


Figura 4.3 – Amplitudes máximas de resposta aumentando-se a frequência de forçamento com $\delta = 0.008$.

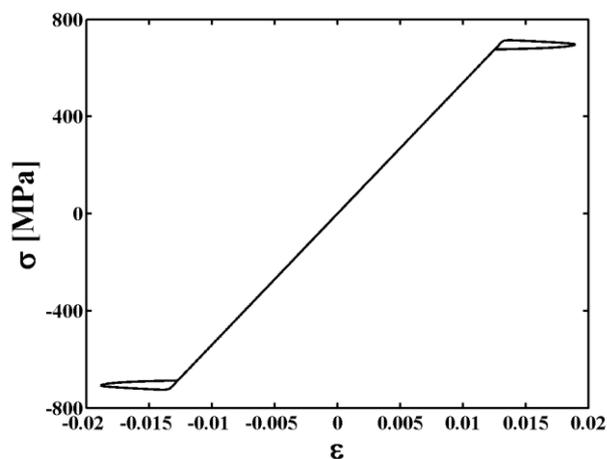
Para entender o que acontece no material quando ocorre o salto dinâmico, avalia-se o diagrama tensão deformação para diferentes frequências de forçamento, conforme apresentado na Figura 4.4.



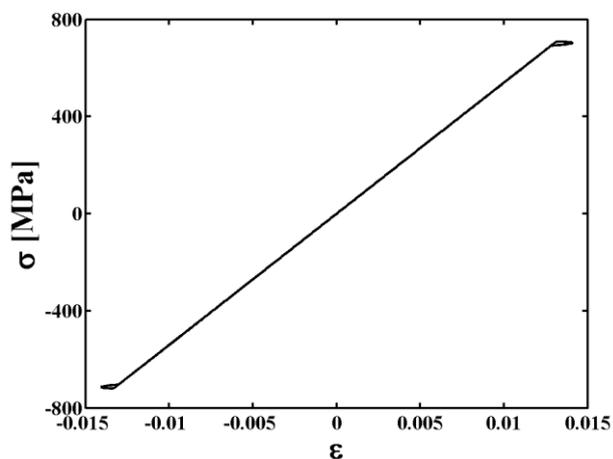
(a) $\varpi = 0.82$.



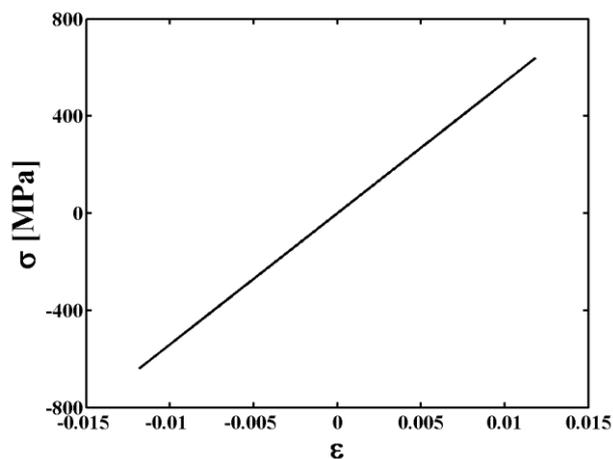
(b) $\varpi = 0.84$.



(c) $\varpi = 1.2$.



(d) $\varpi = 1.35$.



(e) $\varpi = 1.4$.

Figura 4.4– Diagramas σ - ϵ para diferentes frequências de forçamento com $\delta = 0.008$

Nas frequências menores que $\varpi = 0.82$, Figura 4.4(a), o sistema se comporta de forma linear. Conforme a frequência é aumentada, o laço de histerese se estabelece Figura 4.4(b). 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 Figura 4.4(c)-(d). Finalmente, por volta de $\varpi = 1.4$, a tensão decorrente da oscilação do sistema não é mais suficiente para induzir uma transformação na microestrutura.

Analisando esses gráficos de tensão deformação, Figura 4.4, juntamente com o gráfico de amplitudes máximas, Figura 4.3, 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, que é um pouco após $\varpi = 0.82$, o sistema começa a entrar no laço de histerese, Figura 4.4(b). 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, $\varpi = 1.4$, Figura 4.4(e).

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 seção 3, essa transformação gera uma alteração na rigidez do material. Segundo Tiseo *et al.*(2010), a fase austenítica geralmente apresenta uma rigidez pelo menos 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 brusca que ocorre na amplitude do sistema para uma frequência um pouco maior que $\varpi = 0.82$, Figura 4.4(b).

Agora, avaliam-se as amplitudes máximas quando a frequência de forçamento é diminuída. Por meio da Figura 4.5, nota-se que ocorrem dois saltos dinâmicos, o primeiro próximo de $\varpi = 0.62$ e o segundo em torno de $\varpi = 0.36$.

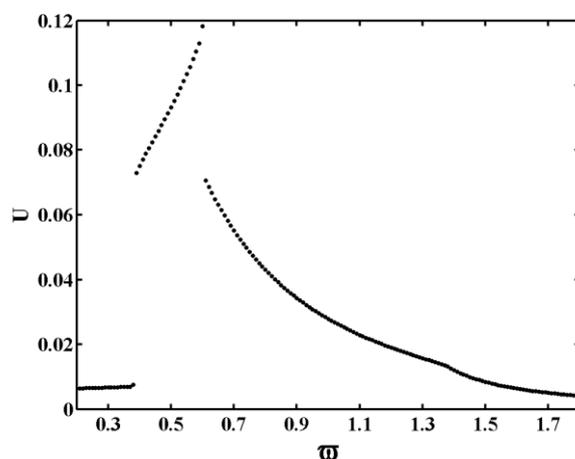


Figura 4.5 – Amplitudes máximas de resposta diminuindo-se a frequência de forçamento com $\delta = 0.008$.

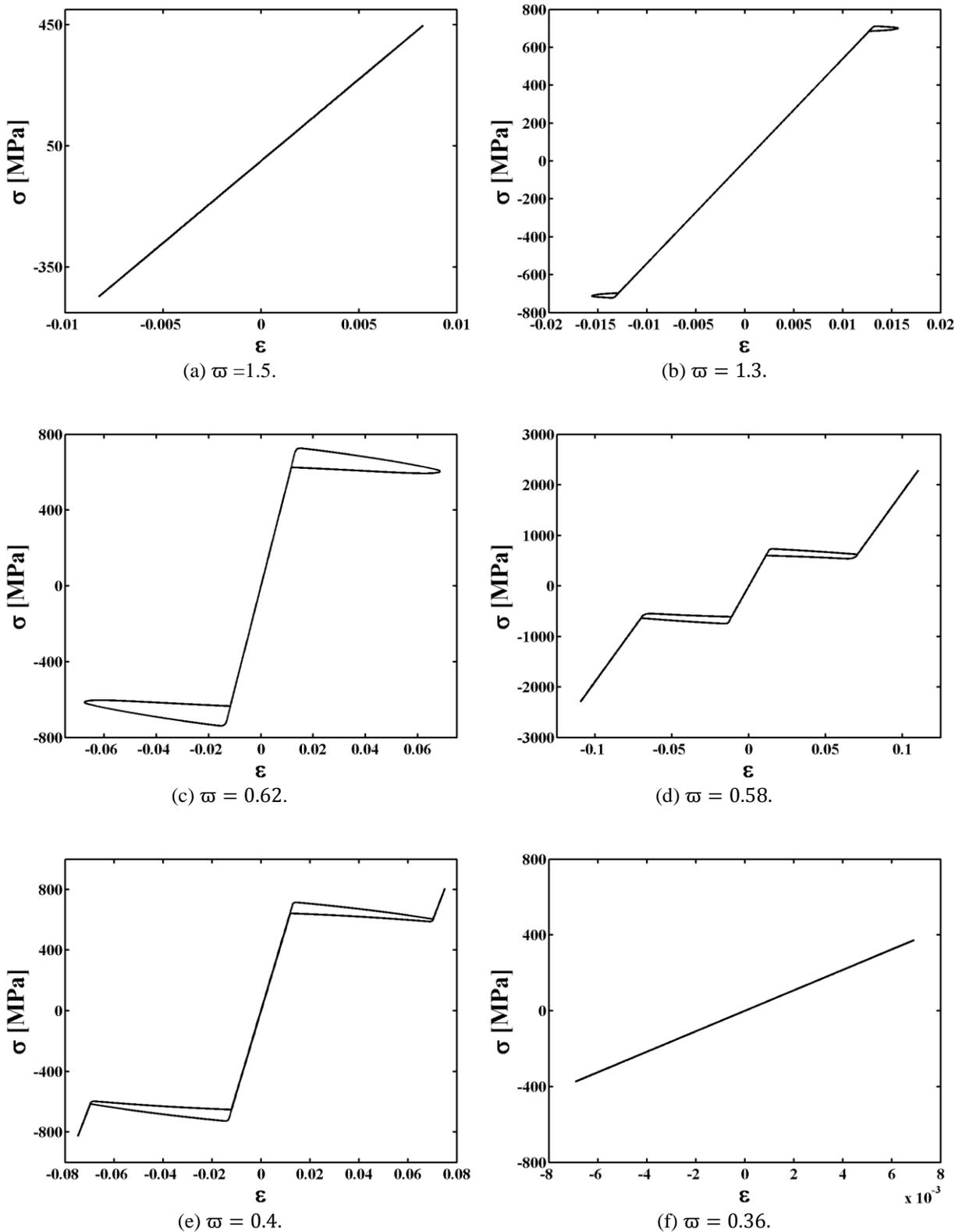


Figura 4.6 – Diagramas σ - ϵ para diferentes frequências de forçamento com $\delta = 0.008$.

No início da diminuição da frequência, o sistema apresenta um comportamento linear, Figura 4.6(a). Conforme mostra a Figura 4.6(b), o comportamento não linear do sistema se inicia na frequência de $\omega = 1.3$, 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, Figura 4.5, apenas uma

mudança de comportamento suave. Continuando com a diminuição da frequência, o sistema apresenta o primeiro salto dinâmico, em $\varpi = 0.58$. 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 Figura 4.6(d). Nessa frequência, a tensão é alta o suficiente para que ocorra a completa transformação microestrutural, apresentando uma resposta elástica relacionada com fase martensítica no diagrama tensão-deformação. Seguindo a diminuição da frequência, apenas a amplitude da oscilação diminui até a frequência de $\varpi = 0.4$, mas sempre com o laço de histerese completo. Finalmente, para as frequências abaixo de $\varpi = 0.4$, o sistema volta a apresentar um comportamento elástico linear de forma abrupta, Figura 4.6(f). Ressalta-se a não ocorrência de uma situação intermediária antes desse comportamento linear, ou seja, não ocorre a presença de laços incompletos de histerese como nas frequências antes do primeiro salto, a saber, as frequências entre $\varpi = 1.3$ e $\varpi = 0.62$.

- **Análise com $\delta = 0.012$:**

Com o aumento da amplitude de forçamento para $\delta = 0.012$, nota-se um aumento nas amplitudes máximas de oscilação em comparação ao caso com $\delta = 0.008$ tanto no aumento como na diminuição da frequência, conforme apresentado na Figura 4.7 e na Figura 4.9. Em ambos os casos, ocorrem mais saltos dinâmicos que os verificados com $\delta = 0.008$ nas situações semelhantes.

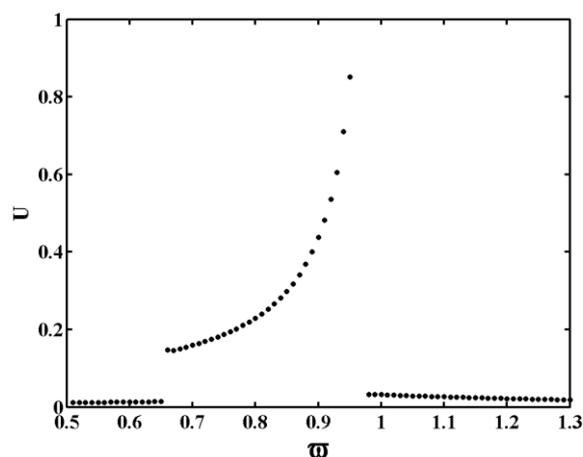


Figura 4.7 – Amplitudes máximas de resposta aumentando-se a frequência de forçamento com $\delta = 0.012$.

No gráfico das amplitudes máximas com o aumento das frequências, Figura 4.7, o primeiro salto ocorre aproximadamente em $\varpi = 0.66$, quando o material passa de um comportamento linear para um laço completo de histerese, conforme apresentado na Figura 4.8(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 $\varpi = 0.97$ ocorre o segundo salto dinâmico, Figura 4.8(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.

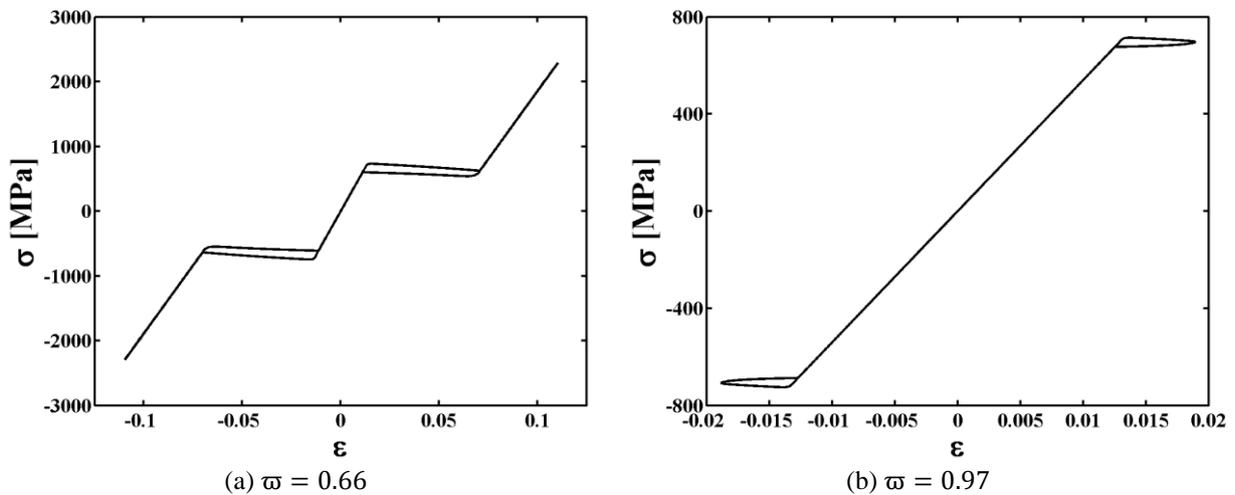


Figura 4.8 – Diagramas σ - ϵ para diferentes frequências de forçamento com $\delta = 0.012$.

Na análise das amplitudes máximas com a diminuição da frequência de forçamento ocorrem três saltos dinâmicos, Figura 4.9. O primeiro, em $\varpi = 0.36$, 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. Continuando-se a 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. Esse salto é a grande diferença na análise de diminuição de frequências para os dois casos analisados, com $\delta = 0.008$ e $\delta = 0.012$.

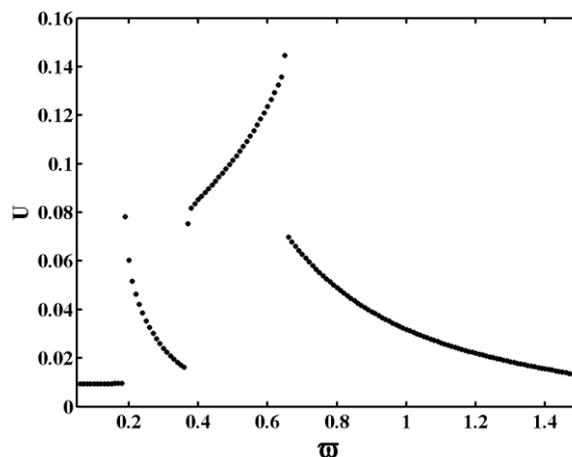


Figura 4.9 – Amplitudes máximas de resposta diminuindo-se a frequência de forçamento com $\delta = 0.012$.

A análise apresentada indica que a resposta dinâmica do sistema pode mudar consideravelmente em decorrência das mudanças de fase do material. 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 a resposta do sistema depende da forma de variação da frequência de forçamento, ou seja, depende das condições iniciais.

4.5 COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA 1GL PSEUDOELÁSTICO PARA EXCITAÇÃO DE BASE COM VELOCIDADE CONSTANTE

A mesma análise realizada na seção anterior é realizada novamente, no entanto, considerando excitação da base com velocidade constante conforme apresentado na seção 4.3.

- **Análise para $v = 0.0025$ m/s:**

Para a primeira velocidade prescrita, considera-se amortecimento viscoso $\xi = 0.05$. A Figura 4.10(esquerda) apresenta as amplitudes máximas de resposta do sistema aumentando-se a frequência de excitação com $v = 0.0025$ m/s, onde se observa apenas um salto dinâmico. No caso em que a frequência é diminuída, apresentado na Figura 4.10(direita), dois saltos são verificados.

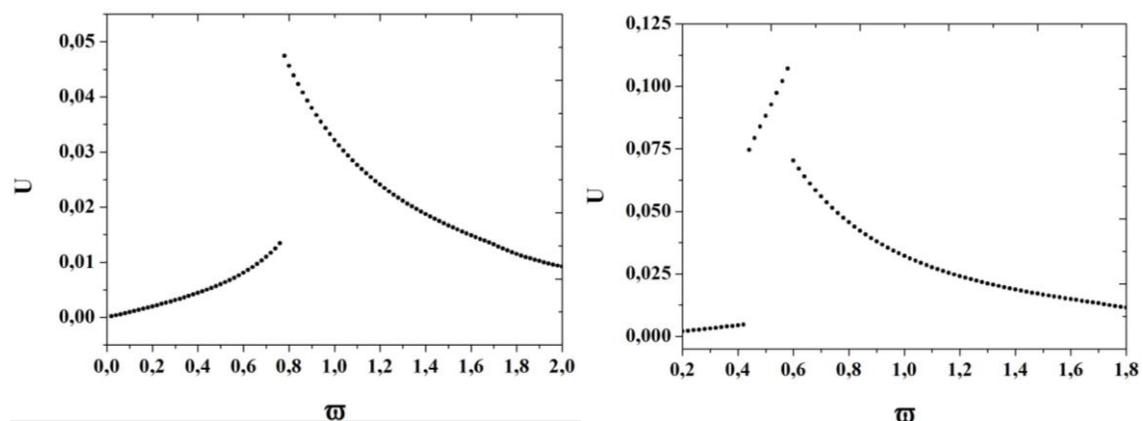
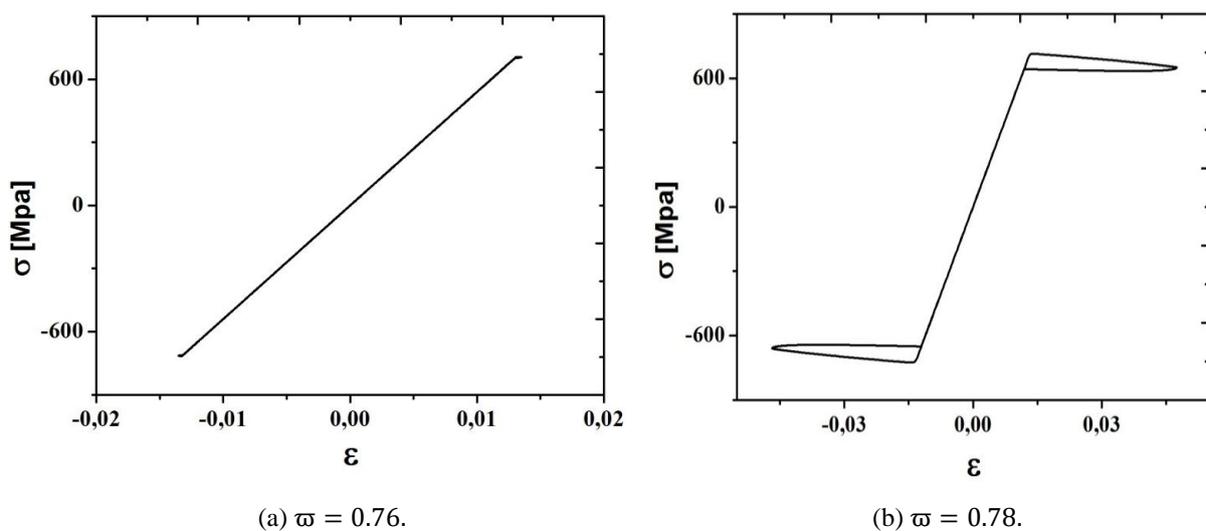


Figura 4.10 – Amplitudes máximas de resposta com $v = 0.0025$ m/s. Esquerda: aumentando-se a frequência de forçamento; direita: diminuindo-se a frequência de forçamento.



(a) $\omega = 0.76$.

(b) $\omega = 0.78$.

Figura 4.11 – Diagramas σ - ϵ aumentando-se de forçamento com $v = 0.0025$ m/s.

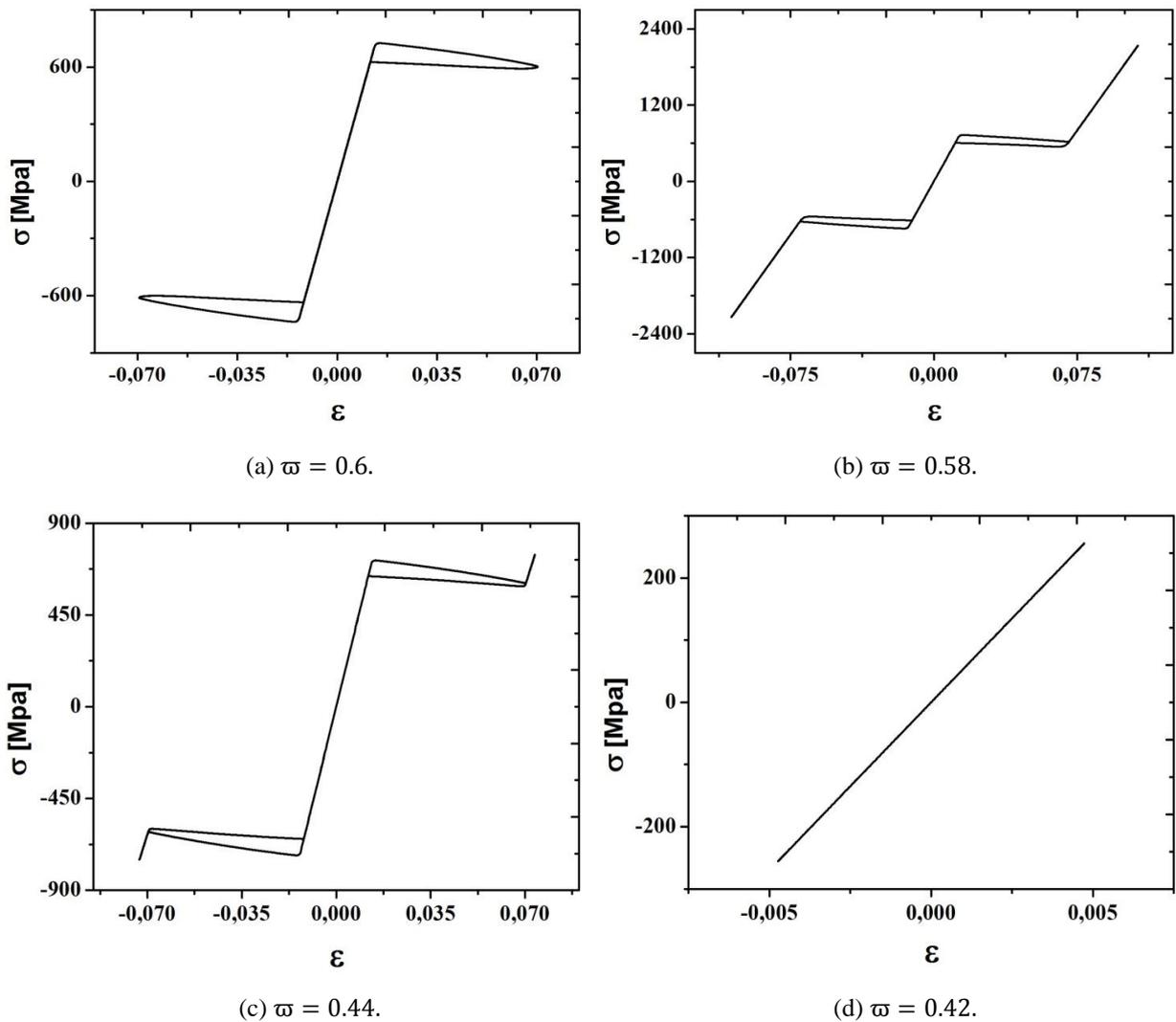


Figura 4.12 – Diagramas σ - ϵ diminuindo-se a frequência de forçamento com $v = 0.0025\text{m/s}$.

No caso de aumento de frequência, o salto ocorre em torno de $\omega = 0.78$, quando ocorre a transição do comportamento linear, Figura 4.11(a), para um comportamento não linear com laço de histerese incompleto, Figura 4.11(b). Percebe-se que para a velocidade prescrita considerada, os resultados são semelhantes aos apresentados na Figura 4.4.

No caso em que a frequência de forçamento é diminuída, Figura 4.10(direita), o primeiro ocorre em torno de $\omega = 0.59$, enquanto o segundo em $\omega = 0.43$. O primeiro salto ocorre quando o sistema passa de uma situação em que há transformações de fase incompletas para uma em que há transformações de fase completas, apresentando uma resposta elástica na fase martensítica, conforme Figura 4.12.

O segundo salto, por outro lado, ocorre devido à passagem de um comportamento não linear devido a uma transformação de fase completa para um comportamento linear de forma abrupta por volta de $\omega = 0.42$, Figura 4.12. Nesse caso, os resultados são semelhantes aos apresentados na Figura 4.6, em que o forçamento é aplicado diretamente ao corpo.

- **Análise com $v = 0.075 \text{ m/s}$**

Para essa velocidade de base maior, o sistema apresenta dois saltos no caso em que há aumento da frequência e três saltos na diminuição, conforme apresenta a Figura 4.13.

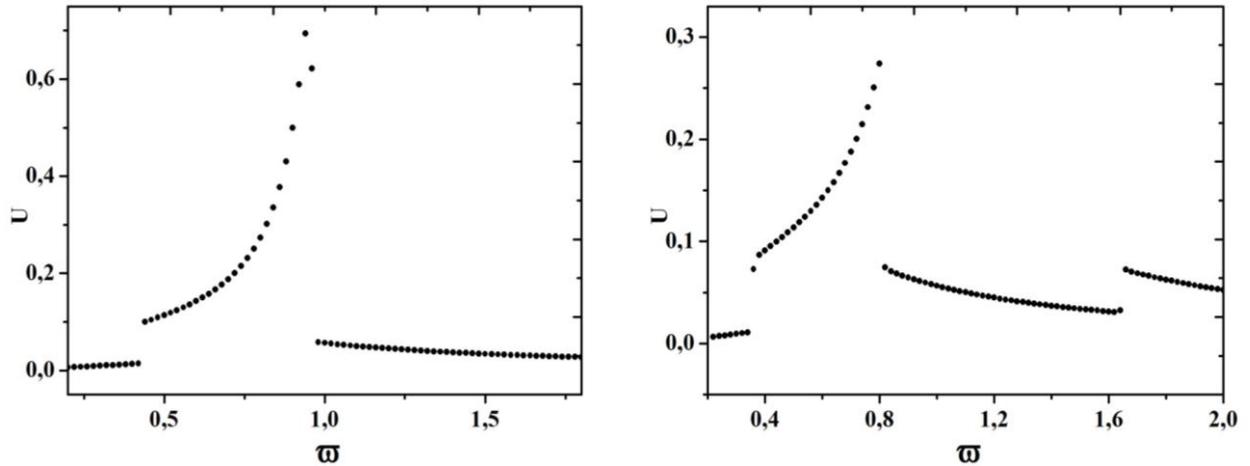


Figura 4.13 – Amplitudes máximas de resposta $v = 0.075 \text{ m/s}$. Esquerda: aumentando-se a frequência de forçamento; direita: diminuindo-se a frequência de forçamento.

No caso em que a frequência é aumentada, o primeiro salto ocorre quando a resposta muda de um comportamento linear para um comportamento não linear com o laço de histerese completo. O segundo salto está relacionado com a transição a partir de uma transformação de fase completa para incompleta, conforme apresenta a Figura 4.14. Nessa situação, é perceptível que o comportamento do sistema também é muito semelhante ao caso apresentado na Figura 4.7 com $\delta=0.012$ no aumento de frequência.

A Figura 4.13(direita) apresenta a resposta do sistema quando a frequência é diminuída. O primeiro salto ocorre em torno de $\omega = 1.64$, em que a amplitude máxima diminui um pouco e o sistema passa de um laço completo com subloop para um laço incompleto. Vale ressaltar que é a primeira vez que esse tipo de transição é verificada na ocorrência de saltos dinâmicos nesse trabalho. O segundo salto ocorre em $\omega = 0.80$, em que há uma mudança de comportamento de laço incompleto para laço completo. O último salto dinâmico ocorre quando sistema passa de um comportamento não linear com laço de histerese completo para um comportamento linear, conforme apresenta a Figura 4.15.

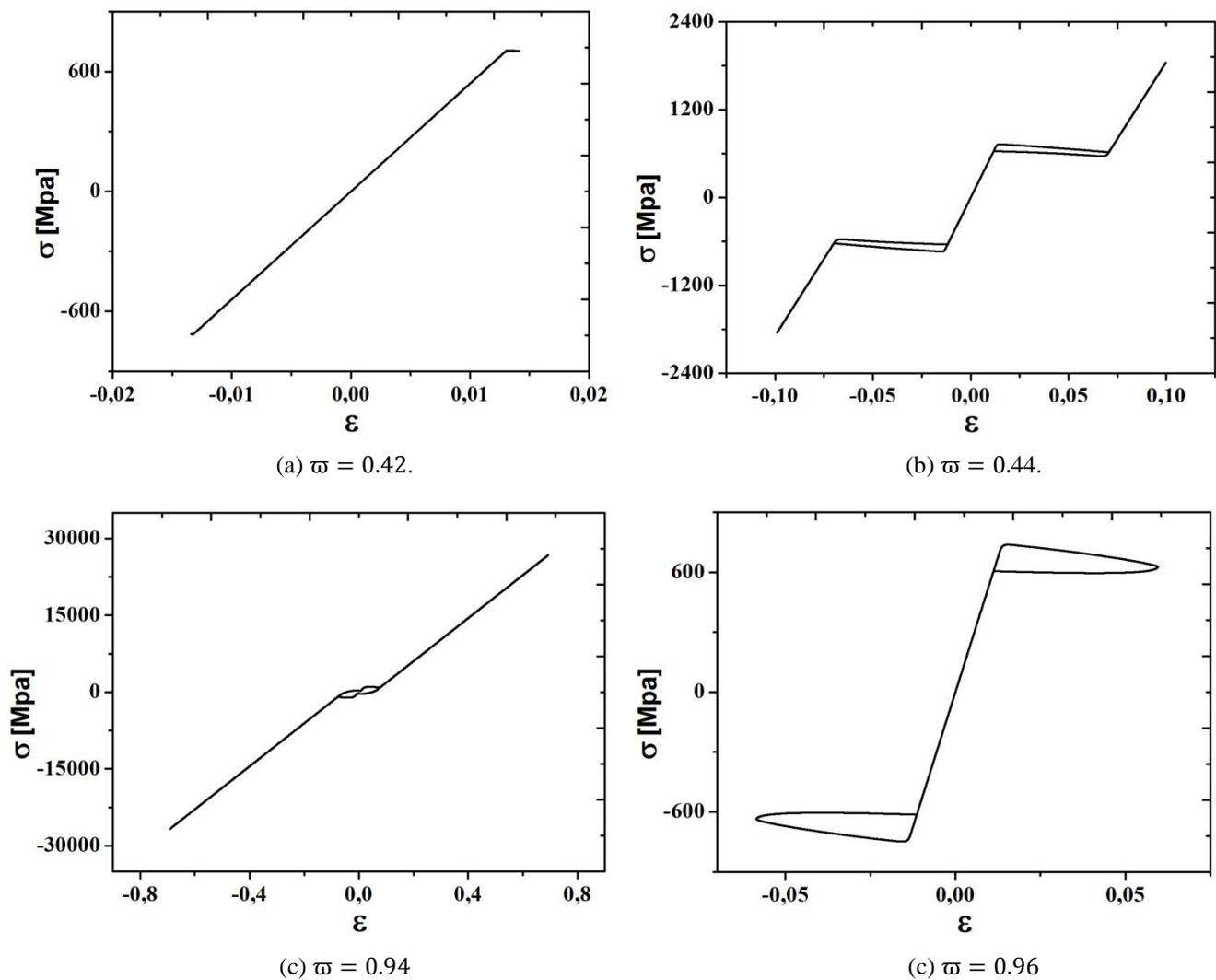
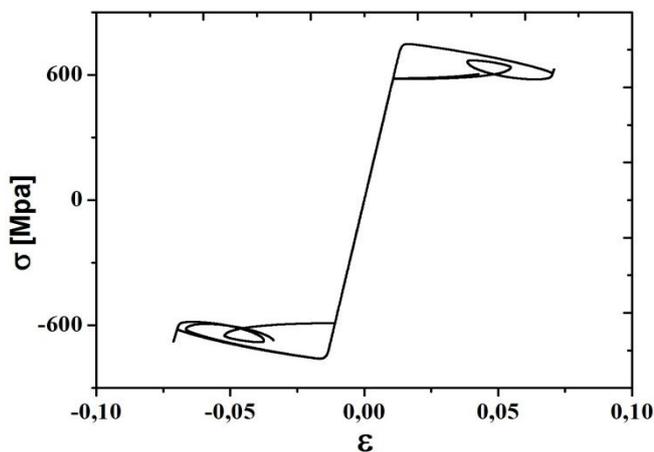
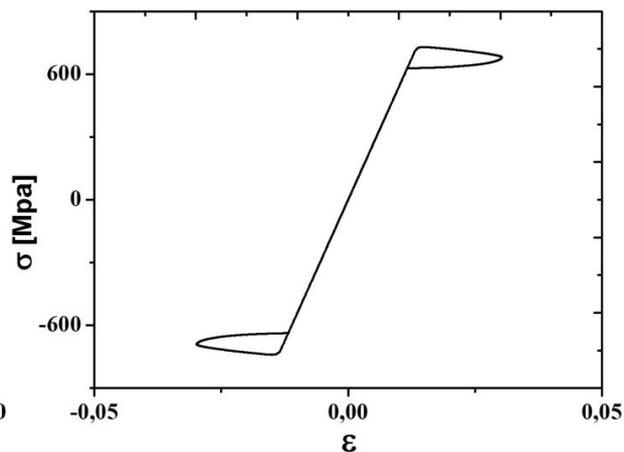


Figura 4.14 – Diagramas tensão-deformação para diferentes frequências de forçamento com $v = 0.075\text{m/s}$. Aumentando-se a frequência de forçamento.

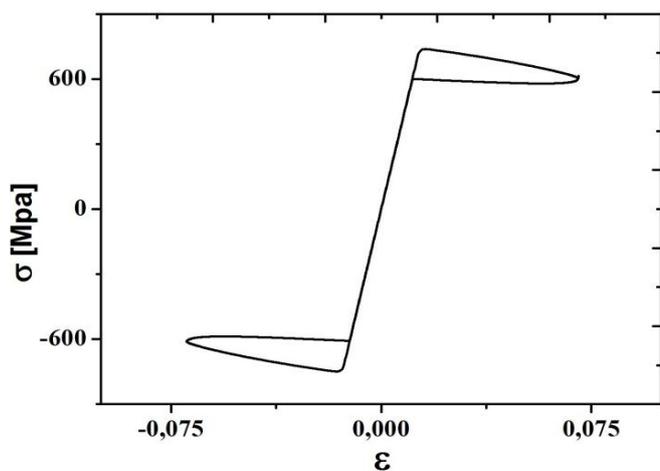
A partir da análise apresentada no capítulo 4, os principais aspectos observados, importantes para o desenvolvimento de um absorvedor dinâmico pseudoelástico, são a diferença de respostas apresentadas aumentando-se e diminuindo-se a frequência de forçamento e a presença de saltos dinâmicos. No primeiro 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. Essas características podem ser prejudiciais ao sistema, por isso torna-se importante realizar uma análise adequada do sistema, para que seja possível avaliar e evitar situações críticas.



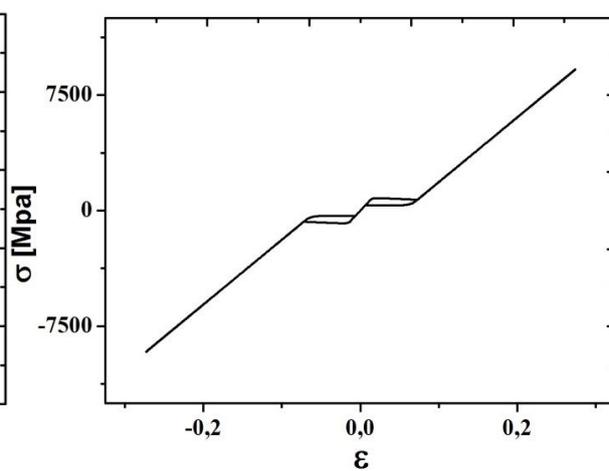
(a) $\omega = 1.66.$



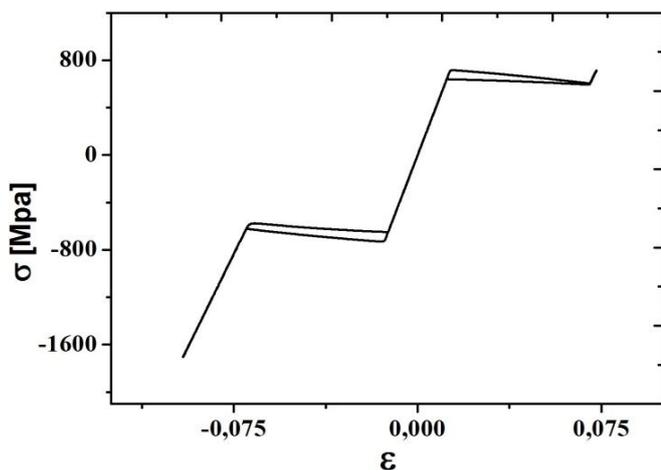
(b) $\omega = 1.64.$



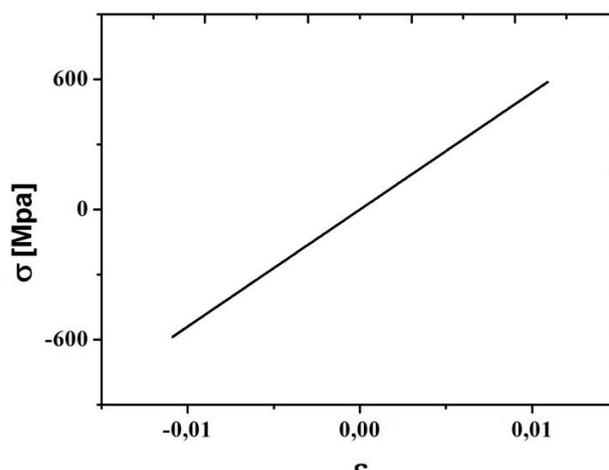
(c) $\omega = 0.84.$



(d) $\omega = 0.80.$



(d) $\omega = 0.36.$



(e) $\omega = 0.34.$

Figura 4.15 – Diagrama σ - ϵ para diferentes frequências de forçamento com $v = 0.075\text{m/s}$. Diminuindo-se a frequência de forçamento.

Vale mencionar que (Bernadini & Rega, 2005) identificaram saltos dinâmicos semelhantes também em um oscilador 1GL de SMA, no entanto, utilizando um modelo constitutivo diferente. O

objetivo da análise apresentada neste trabalho é realizar uma investigação mais detalhada, estabelecendo uma relação entre os saltos e as transformações de fase.

5 ABSORVEDOR DINÂMICO PSEUDOELÁSTICO ACOPLADO A UM OSCILADOR LINEAR 1GL

O desempenho dos absorvedores dinâmicos de vibrações lineares está intimamente relacionado com as frequências nas quais ele pode atuar e, conseqüentemente, com a rigidez desse dispositivo, sua massa e amortecimento. No caso dos absorvedores clássicos, embora o pico de oscilação para a frequência de projeto seja reduzido ou até eliminado, surgem dois picos devido à adição de mais um grau de liberdade, que é o absorvedor.

A ideia de desenvolver um ADV pseudoelástico tem como base explorar a capacidade de dissipação relacionada à presença do laço de histerese. Dessa forma, acredita-se que o uso de SMAs (em regime pseudoelástico) em absorvedores possa representar uma melhora em termos de desempenho, seja por aumento da faixa de trabalho do absorvedor ou pela redução das amplitudes de vibração do sistema primário. Por outro lado, a presença do laço de histerese está associada a uma não linearidade, conseqüentemente, o comportamento dinâmico pode se tornar bastante complexo e deve ser avaliado com ferramentas apropriadas.

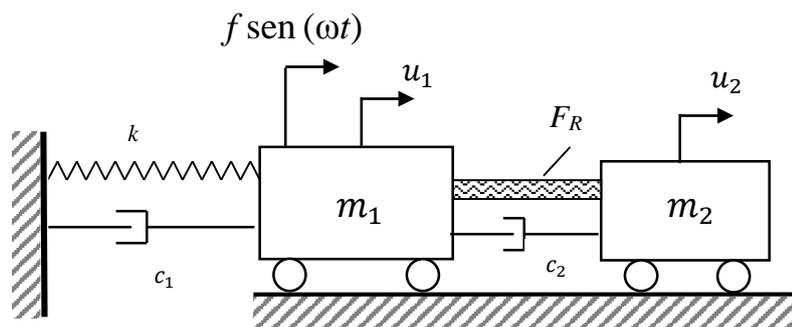


Figura 5.1 – Oscilador 2GLSMA

Para o projeto e desenvolvimento de ADVs com SMA, 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, de forma a avaliar o seu desempenho em diversas situações.

Neste trabalho, considera-se como absorvedor um oscilador semelhante ao analisado no capítulo 4, no entanto, sem forçamento. O absorvedor, ou sistema secundário, é acoplado a um sistema primário, que consiste em um oscilador 1GL, com massa m_1 , rigidez k e amortecimento viscoso c_1 . A Figura 5.1 apresenta um desenho esquemático do sistema 2GL, em que o deslocamento do sistema primário é dado por u_1 e do absorvedor é dado por u_2 .

5.1 MODELAGEM DO OSCILADOR

De forma semelhante ao realizado com o oscilador 1GL, as equações que regem o oscilador 2GL com SMA podem ser obtidas a partir do balanço das forças que atuam em cada corpo e assumindo que a força de restituição do elemento de SMA, F_R , é dada por meio das equações constitutivas apresentadas no capítulo 3. Portanto, conforme apresentado na Figura 5.1, têm-se as equações de movimento do sistema.

$$\begin{cases} m_1 \ddot{u}_1 + (c_1 + c_2) \dot{u}_1 - c_2 \dot{u}_2 + k u_1 - \frac{EA}{l} (u_2 - u_1) = f \text{ sen}(\omega t), \\ m_2 \ddot{u}_2 - c_2 \dot{u}_1 + c_2 \dot{u}_2 + \frac{EA}{l} (u_2 - u_1) + (A\alpha + EA\alpha_h)(\beta_2 - \beta_1) - \Omega A(T - T_0) = 0. \end{cases} \quad 5.1$$

Para obtenção da forma adimensional da Equação 5.1, definem-se os seguintes parâmetros adimensionais:

$$\begin{aligned} \omega_{01}^2 &= \frac{k}{m_1}; \quad \omega_{02}^2 = \frac{E_{RA}}{m_2 l}; \quad \xi_1 = \frac{c_1}{m_1 \omega_{02}}; \quad \xi_2 = \frac{c_2}{m_2 \omega_{02}}; \quad \gamma_\omega = \frac{\omega_{01}^2}{\omega_{02}^2}; \quad \bar{\alpha} = \frac{\alpha A}{m_2 l \omega_{02}^2} = \frac{\alpha}{E_R}; \quad \bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_{02}}; \\ \bar{\alpha}_h &= \frac{\alpha_h E_{RA}}{m_2 l \omega_{02}^2} = \alpha_h; \quad \delta = \frac{F_0}{m_1 l \omega_{02}^2} = \frac{m_2 F_0}{m_1 E_{RA}}; \quad \bar{\Omega} = \frac{\Omega_R A T_R}{m_2 l \omega_{02}^2} = \frac{\Omega_R T_R}{E_R}; \quad \mu_E = \frac{E}{E_R}; \quad \mu_\Omega = \frac{\Omega}{\Omega_R}. \end{aligned} \quad 5.2$$

Além disso, definem-se as variáveis adimensionais para deslocamento da massa U_1 e U_2 , da temperatura θ e do tempo τ :

$$U_1 = \frac{u_1}{l}; \quad U_2 = \frac{u_2}{l}; \quad \theta = \frac{T}{T_R}; \quad \tau = \omega_{02} t. \quad 5.3$$

Utilizando as quantidades adimensionais, obtém-se a seguinte equação para a dinâmica do oscilador 2GL:

$$\begin{cases} U_1'' + (\xi_1 + \gamma_m \xi_2) U_1' - \gamma_m \xi_2 U_2' + \gamma_\omega U_1 - \gamma_m \mu_E (U_2 - U_1) = \delta \text{ sen}(\bar{\omega} \tau), \\ (U_2'' - \xi_2 U_1' + \xi_2 U_2' + \mu_E (U_2 - U_1) + (\bar{\alpha} + \mu_E \bar{\alpha}_h)(\beta_2 - \beta_1) - \mu_\Omega \bar{\Omega} (\theta - \theta_0)) = 0. \end{cases} \quad 5.4$$

O desempenho do ADV de SMA é comparado a um ADV linear clássico. O oscilador 2GL linear é semelhante ao apresentado na Fig 5.1, no entanto, com um elemento de rigidez linear ao invés do elemento de SMA, conforme apresentado na Figura 5.2. A rigidez do absorvedor linear é considerada igual à rigidez da SMA em sua fase austenítica, ou seja, $k_2 = \frac{EA}{l}$. As equações de governo são dadas pela Equação 5.5.

$$\begin{cases} m_1 \ddot{u}_1 + (c_1 + c_2) \dot{u}_1 - c_2 \dot{u}_2 + k_1 u_1 - \frac{EA}{l} (u_2 - u_1) = f \text{ sen}(\omega t), \\ m_2 \ddot{u}_2 - c_2 \dot{u}_1 + c_2 \dot{u}_2 + \frac{EA}{l} (u_2 - u_1) = 0. \end{cases} \quad 5.5$$

Utilizando os parâmetros adimensionais definidos nas Equações. 5.2 e 5.3 obtém-se a forma adimensional da Equação 5.5, a Equação 5.6.

$$\begin{cases} U_1'' + (\xi_1 + \gamma_m \xi_2) U_1' - \gamma_m \xi_2 U_2' + \gamma_\omega U_1 - \gamma_m \mu_E (U_2 - U_1) = \delta \text{sen}(\omega \tau), \\ U_2'' - \xi_2 U_1' + \xi_2 U_2' + \mu_E (U_2 - U_1) = 0. \end{cases} \quad 5.6$$

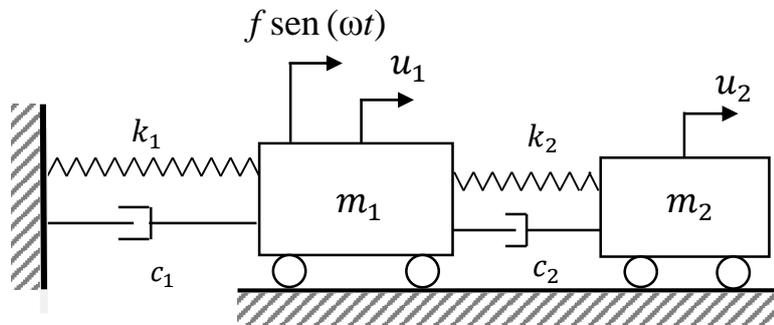


Figura 5.2 – Oscilador 2GL linear.

5.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS ABSORVEDORES PSEUDOELÁSTICO E LINEAR

Da teoria de vibrações, conforme apresentado no capítulo 2, sabe-se que o ADV linear é eficiente em uma banda operacional limitada e é sintonizado em uma frequência específica de acordo com a razão de massas $\gamma_m = \frac{m_2}{m_1}$ e com a rigidez do absorvedor. No caso de um ADV pseudoelástico, não existe na literatura uma metodologia estabelecida para avaliar o seu desempenho. Inicialmente, tentou-se avaliar o desempenho do ADV proposto a partir do cálculo da potência dissipada, de acordo com as normas CEI IEC 61897:1998 e IEEE Std 664TM-1993(R2007), específicas para determinar a potência mecânica dissipada em *stockbridges*. No entanto, devido ao comportamento não linear da SMA, a norma não pode ser aplicada de forma apropriada e os resultados obtidos não foram válidos. Dessa forma, foi preciso estabelecer uma forma de avaliar o desempenho do ADV. Optou-se, então, por avaliar a amplitude máxima de vibração do sistema primário, uma vez que se deseja diminuir os seus níveis de vibração.

É interessante avaliar o desempenho do ADV considerando diferentes razões de massas, que é obtido alterando-se a massa do sistema secundário. Essa forma de variação em γ_m se justifica pelo fato de que normalmente o ADV é quem sofre alterações para que seja sintonizado com a frequência de ressonância do sistema primário. Outro fato importante está relacionado à característica passiva do ADV com SMA, isto é, não há ação de controle externo para que a rigidez seja alterada nesse sistema, conforme explorado por Tiseo *et al.*(2010) por meio da variação de temperatura. Portanto, a melhor forma de modificar as características do absorvedor, considerando uma mesma liga com memória de forma, é considerar diferentes razões de massa γ_m .

Outro ponto importante, como visto nas simulações de 1GL, é o fato da curva de ressonância de sistemas não lineares não apresentarem um pico de ressonância definido, conforme apresentado por Savi (2006). Na verdade, têm-se uma faixa de frequências em que a amplitude é maior, ou seja, uma região de ressonância. No entanto, para facilitar o entendimento da análise realizada para o oscilador 2GL, o texto se refere às regiões de amplitude máxima como picos de ressonância. Como o interesse da análise é o comportamento do sistema primário, U_1 , dá-se mais atenção a ele nas simulações apresentadas a seguir.

5.2.1 ANÁLISE PARA $\delta = 0.000625$ E $\gamma_m = 0.25$

Inicialmente, um forçamento de $\delta = 0.000625$ e uma razão de massa $\gamma_m = 0.25$ são considerados. Para esses parâmetros, vê-se que o sistema apresenta um comportamento exatamente igual ao de um sistema linear, conforme apresentado na Figura 5.3. Nesse caso, a tensão na SMA é insuficiente para induzir transformações de fase e não se observa saltos dinâmicos.

Ressalta-se que para diferentes razões de massa γ_m e mesma amplitude de forçamento, a resposta do sistema é idêntica ao sistema linear. Então, faz-se necessário aumentar o valor do forçamento δ , para que a tensão na SMA seja suficiente para induzir transformação de fase do material e mudança em sua rigidez. Essa análise inicial foi realizada com objetivo principal de verificar a implementação computacional o modelo.

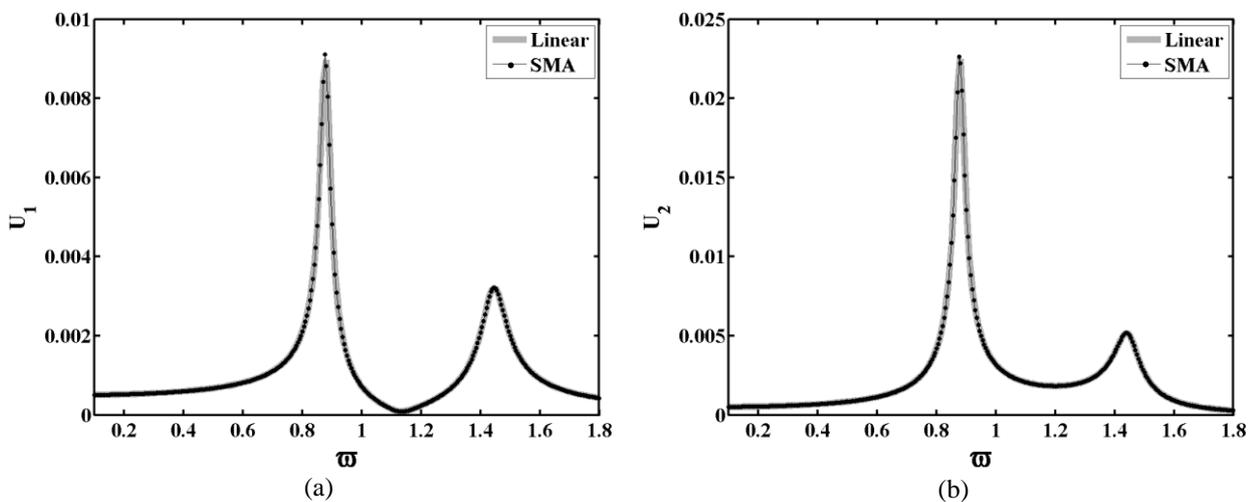


Figura 5.3 – Amplitudes máximas de resposta: (a) Sistema primário. (b) Sistema secundário

5.2.2 ANÁLISE PARA $\delta = 0.0011$ E $\gamma_m = 0.15$

Para esses parâmetros, a análise é realizada em duas etapas: aumentando-se e diminuindo-se a frequência de forçamento.

- **Aumento da Frequência de Forçamento:**

As amplitudes máximas de resposta do sistema primário e do absorvedor são apresentadas na Figura 5.4(a) e na Figura 5.4(b), respectivamente, para o ADV linear e o ADV pseudoelástico. Percebe-se que há uma redução significativa do primeiro pico de ressonância na faixa de frequência que vai de $\varpi = 0.70$ a $\varpi = 0.80$. A redução alcança aproximadamente 25% considerando as situações mais críticas. Com relação ao segundo pico do sistema primário, há um ligeiro aumento da amplitude máxima, que pode ser considerado desprezível em termos práticos, que ocorre próximo a um salto dinâmico. Na faixa de frequência entre os dois picos, região em que está localizada a banda operacional do ADV linear, conforme apresentado no capítulo 2, o ADV pseudoelástico apresenta um bom desempenho, idêntico ao ADV linear.

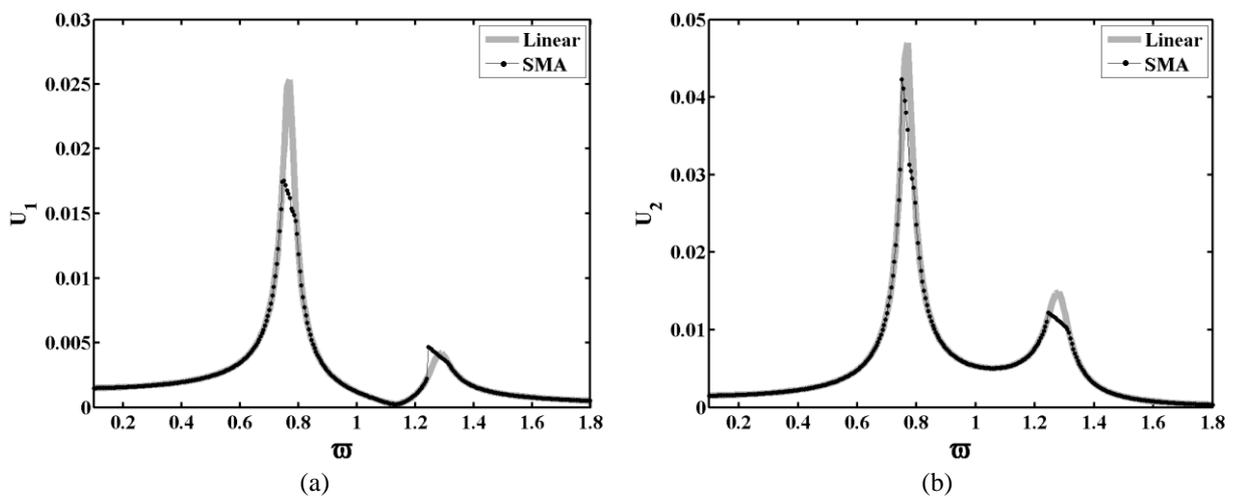


Figura 5.4 - Amplitudes máximas do sistema primário para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0011$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) ADV Linear. (b) ADV pseudoelástico.

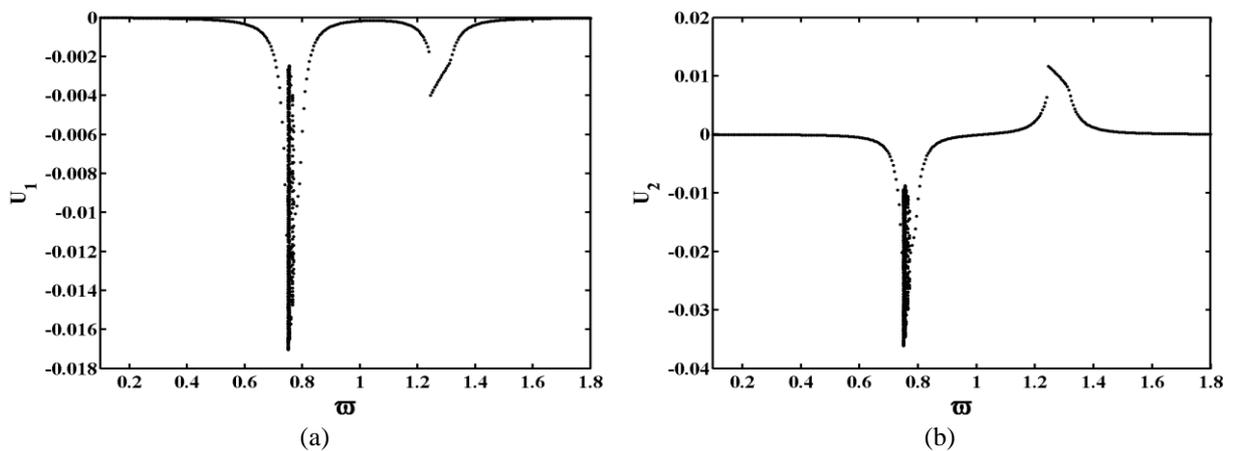


Figura 5.5 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0011$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.

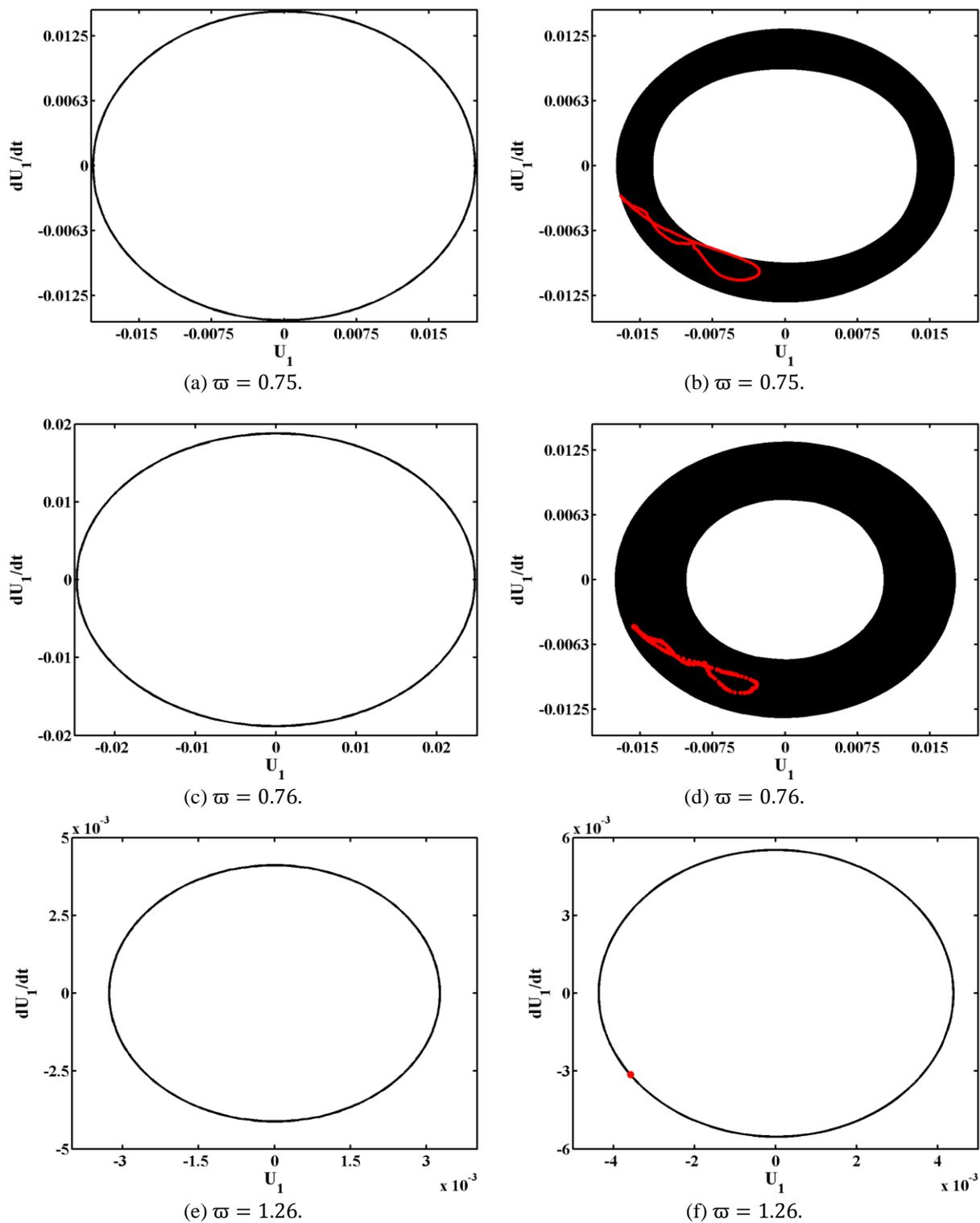


Figura 5.6 – Espaço de fase do sistema primário para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0011$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a), (c), (e) - Com ADV linear. (b), (d), (f) – Com ADV pseudoelástico.

De forma a avaliar o que ocorre nos picos de ressonância, onde ocorre um desempenho melhor do ADV de SMA, os diagramas de bifurcação do sistema principal e do absorvedor são apresentados na Figura 5.5. Percebe-se que a redução significativa na amplitude de oscilação está associada a uma resposta complexa do sistema.

Para investigar esse comportamento complexo, a Figura 5.6 apresenta o espaço de fase do sistema primário, considerando os absorvedores linear e pseudoelástico. No caso do ADV pseudoelástico, a seção de Poincaré é apresentada junto ao espaço de fase, em que é possível verificar a complexidade da resposta do sistema não linear nas regiões de ressonância.

Para melhorar o entendimento do que gera esse comportamento complexo, a Figura 5.7 apresenta o diagrama $\sigma - \varepsilon$ do elemento de SMA. Por meio desse resultado, é possível notar que na faixa de $\varpi = 0.70$ a $\varpi = 0.80$, a tensão no material é suficiente para induzir um laço de histerese incompleto, Figura 5.7(a). Cabe ressaltar que diferentes laços incompletos são percorridos, preenchendo a região de histerese, diferente do verificado nos casos apresentados no capítulo 4, onde o sistema estava estabilizado em apenas um laço.

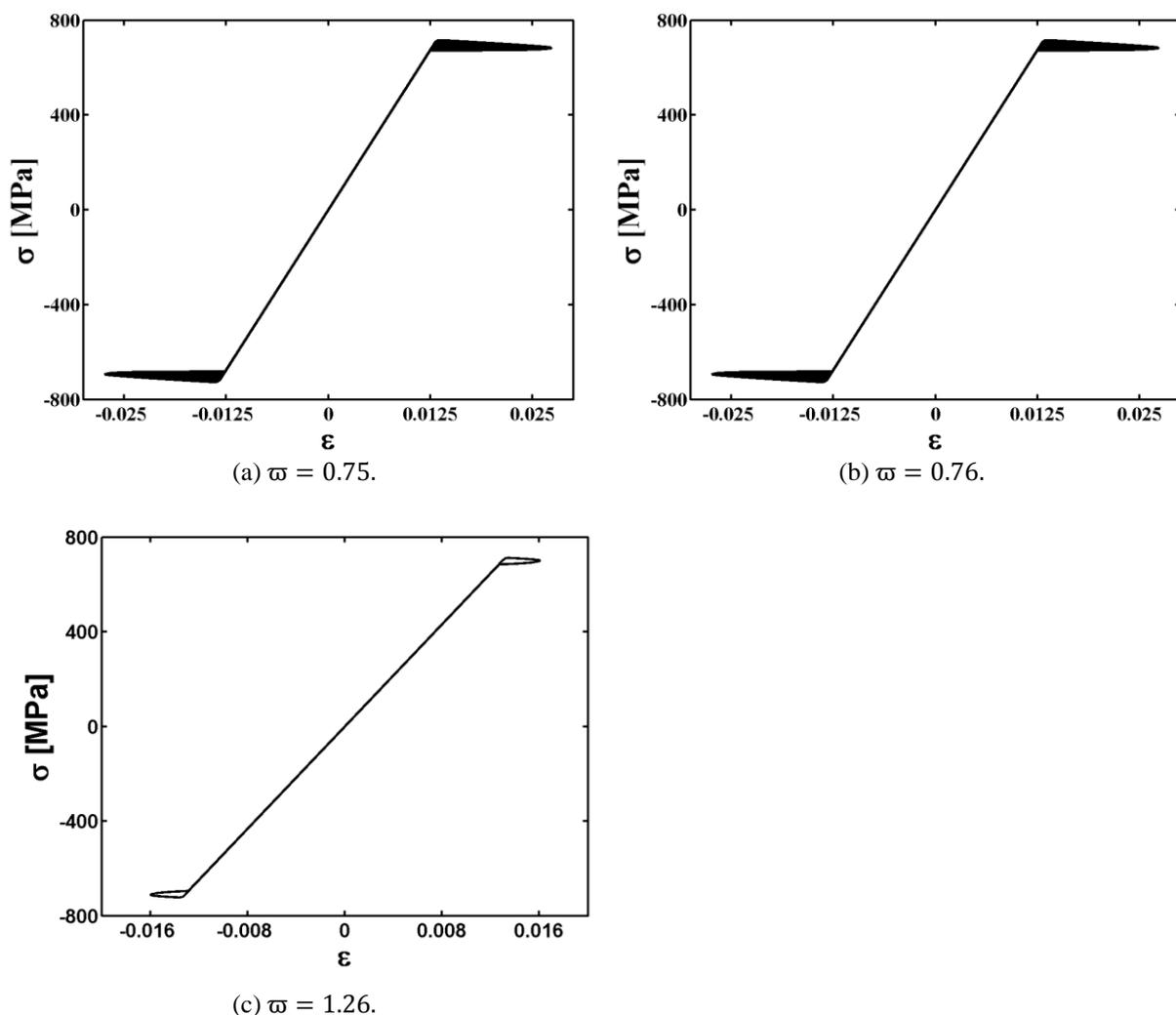


Figura 5.7 – Diagramas σ - ε para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0011$ aumentando-se a frequência de forçamento.

Com relação ao segundo pico de ressonância, vê-se que ele surge logo após um salto dinâmico, salto esse semelhante ao apresentado no caso 1GL, Figura 4.3, quando o sistema passa de um comportamento linear para um comportamento não linear associado a um laço de histerese incompleto e à medida que a frequência é aumentada, o laço diminui até que o sistema volte a apresentar um

comportamento linear. A Figura 5.7(b) apresenta o laço de histerese nessa região. É interessante notar que nesse segundo pico não há comportamento complexo associado e o sistema se comporta de forma periódica, Figura 5.6(f), muito semelhante ao caso linear, Figura 5.6(e), mas com uma amplitude máxima de oscilação ligeiramente maior.

Simulações para razões da massa menor que $\gamma_m = 0.15$ foram realizadas e os resultados obtidos foram semelhantes. Há uma redução da amplitude máxima de oscilação na faixa que compreende o primeiro pico de ressonância e no segundo pico há um salto dinâmico. Quanto menor é a razão de massa, menor é a redução no primeiro pico e menor é o salto dinâmico no segundo pico.

- **Diminuição da Frequência de Forçamento:**

A mesma análise com $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0011$ é feita, mas diminuindo-se a frequência de forçamento. Por meio da Figura 5.8(a), observa-se que o sistema primário apresenta amplitudes de oscilação máxima menores na região que corresponde ao primeiro pico de ressonância, por volta de $\varpi = 0.7$ a $\varpi = 0.8$, no caso do ADV pseudoelástico quando comparado ao ADV linear.

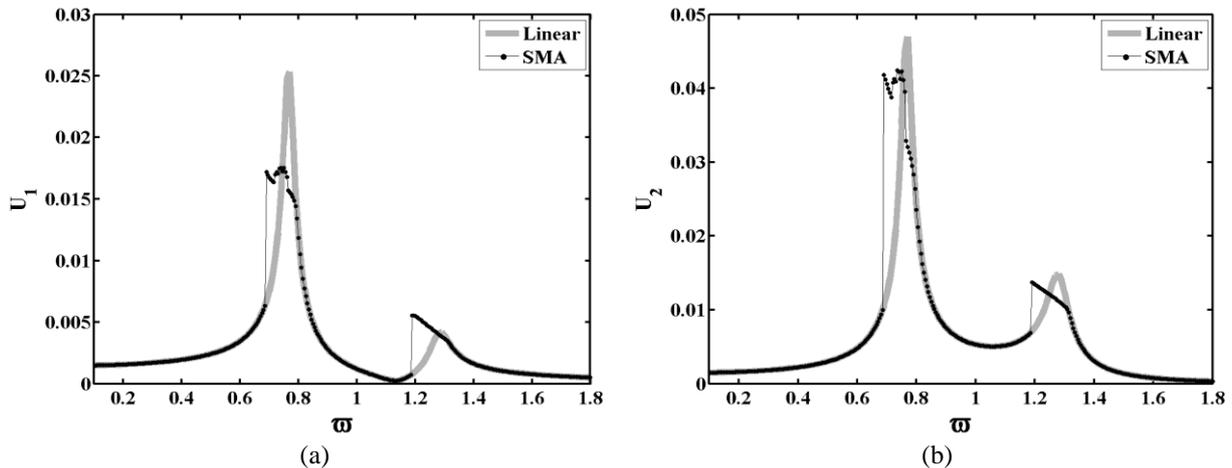


Figura 5.8 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.

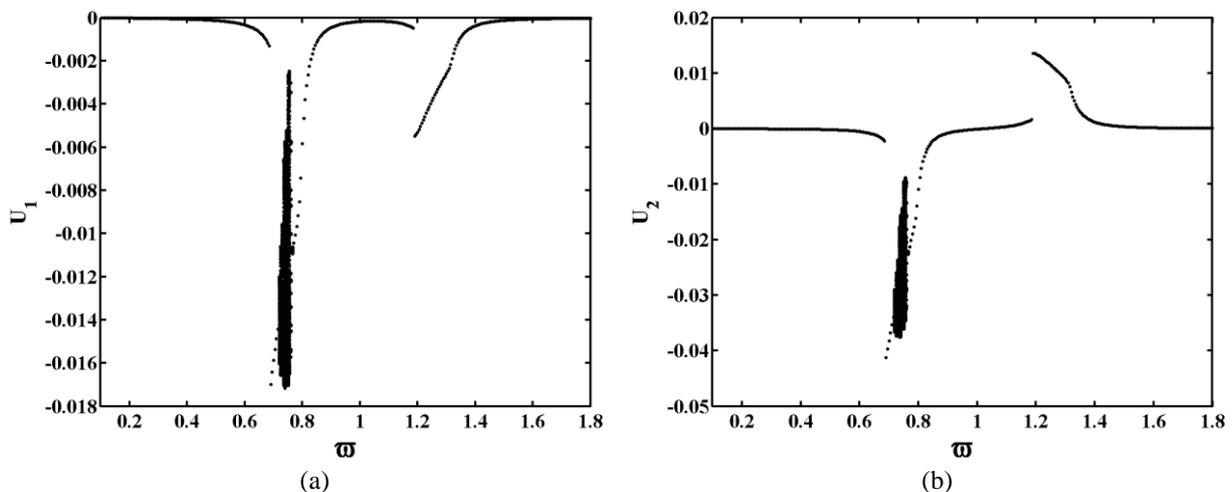


Figura 5.9 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema primário. (b) Sistema secundário.

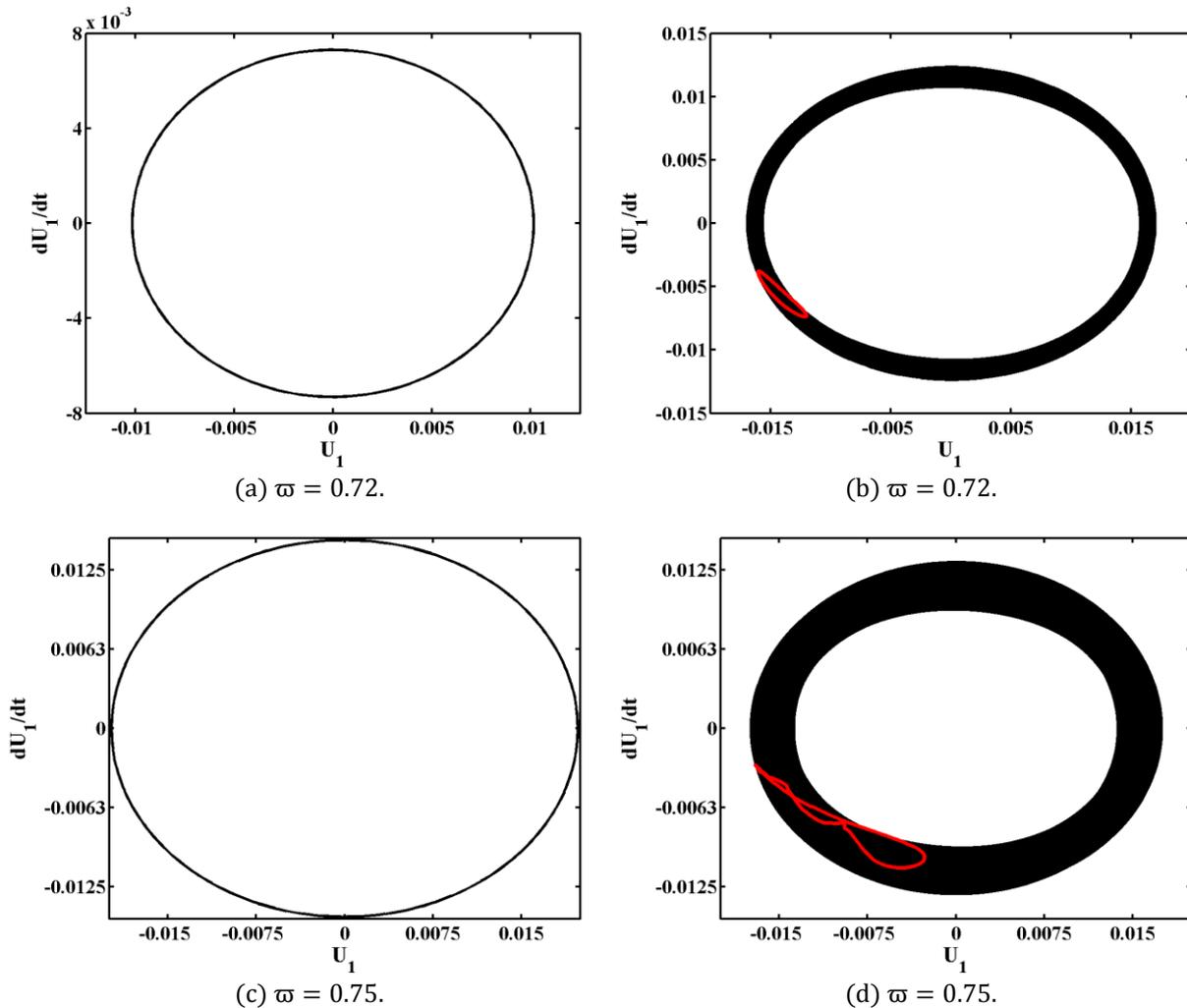


Figura 5.10 - Espaço de fase do sistema primário para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a), (c) - Com ADV Linear. (b), (d) - Com ADV pseudoelástico.

No que se refere ao segundo pico, entre $\varpi = 1.2$ e $\varpi = 1.3$, verifica-se a ocorrência de um salto dinâmico e, como no caso de aumento da frequência, o sistema primário apresenta amplitudes ligeiramente maiores no caso do ADV pseudoelástico. Nesse caso, no entanto, o desempenho é pior que o caso anterior, pois ocorre uma diminuição da faixa operacional do ADV. A ocorrência desse salto dinâmico se deve a passagem de um comportamento não linear com laço incompleto para um comportamento linear. Além disso, o sistema passa a apresentar um laço de histerese em início de formação a partir da frequência $\varpi = 1.3$ e depois volta a apresentar uma resposta linear por volta de $\varpi = 1.2$.

A Figura 5.9(a) e a Figura 5.9(b) apresentam o Diagrama de Bifurcação para os sistemas primário e secundário, respectivamente. Assim como no caso em que a frequência é aumentada, vê-se que a resposta do sistema é complexa para a faixa de frequências que varia de $\varpi = 0.70$ a $\varpi = 0.80$ e no segundo pico, que varia aproximadamente entre $\varpi = 1.2$ e $\varpi = 1.35$, o comportamento é periódico de periodicidade 1.

A Figura 5.10 apresenta a comparação entre a evolução temporal do sistema primário com ADV linear e com ADV pseudoelástico por meio do espaço de fase juntamente com a seção de Poincaré. A Figura 5.10(b) mostra que a resposta do sistema no segundo pico de ressonância é periódico e de período 1, além disso, possui amplitude maior do que o sistema linear, Figura 5.10(a). Os espaços de fase para as duas outras frequências apresentadas na região entre de $\varpi = 0.70$ e $\varpi = 0.80$, Figura 5.10(d) e Figura 5.10(f), são parecidos com o caso em que a frequência é aumentada, indicando um comportamento não periódico.

No que se refere ao Diagrama $\sigma - \varepsilon$, Figura 5.11, vê-se que são muito parecidos com o caso em que a frequência é aumentada. No segundo pico, entre $\varpi = 1.2$ e $\varpi = 1.3$, o sistema apresenta periodicidade 1 e o laço associado é incompleto e único. No pico que ocorre entre de $\varpi = 0.7$ e $\varpi = 0.8$, o laço de histerese também é incompleto, no entanto, diferentes laços incompletos são percorridos, preenchendo a região de histerese.

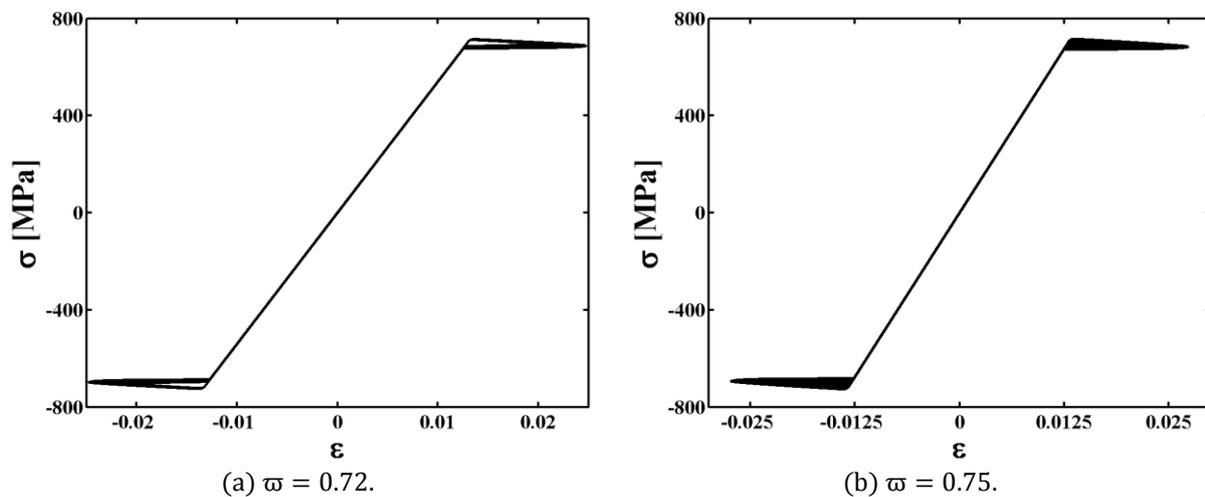


Figura 5.11 – Diagramas $\sigma - \varepsilon$ para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento.

5.2.3 ANÁLISE PARA $\delta = 0.0011$ E $\gamma_m = 0.2$

Considerando-se o mesmo forçamento anterior $\delta = 0.0011$, mas agora com uma razão de massa maior e igual a $\gamma_m = 0.2$, faz-se a análise do sistema.

- **Aumento da Frequência de Forçamento:**

O ADV pseudoelástico apresenta um resultado superior quando comparado ao ADV linear no primeiro pico de ressonância, conforme apresentado na Figura 5.12. Nesse caso, ocorre uma redução de cerca de 40% na amplitude de resposta do sistema primário. Com relação ao segundo pico, a resposta do sistema é semelhante ao caso com $\gamma_m = 0.15$.

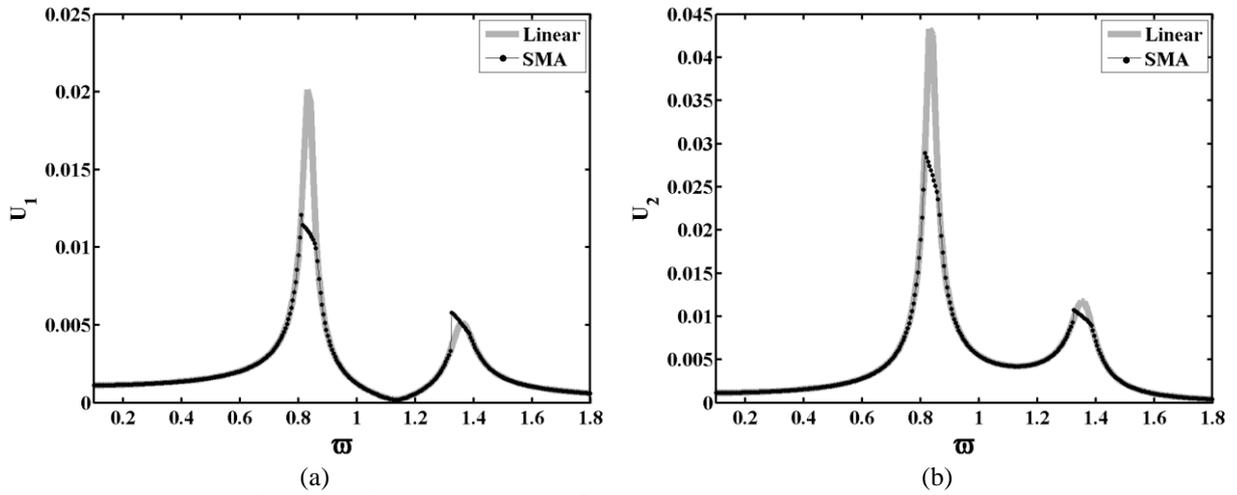


Figura 5.12 – Amplitude máxima para $\gamma_m = 0.2$ e $\delta = 0.0011$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.

A partir dos diagramas de bifurcação, apresentados na Figura 5.13, nota-se que na região do primeiro pico de ressonância, entre $\varpi = 0.80$ e $\varpi = 0.90$, não é verificado o comportamento complexo presente em razões de massa menores, como no caso $\gamma_m = 0.15$. A resposta do sistema nesse intervalo de frequência é periódica de periodicidade 1.

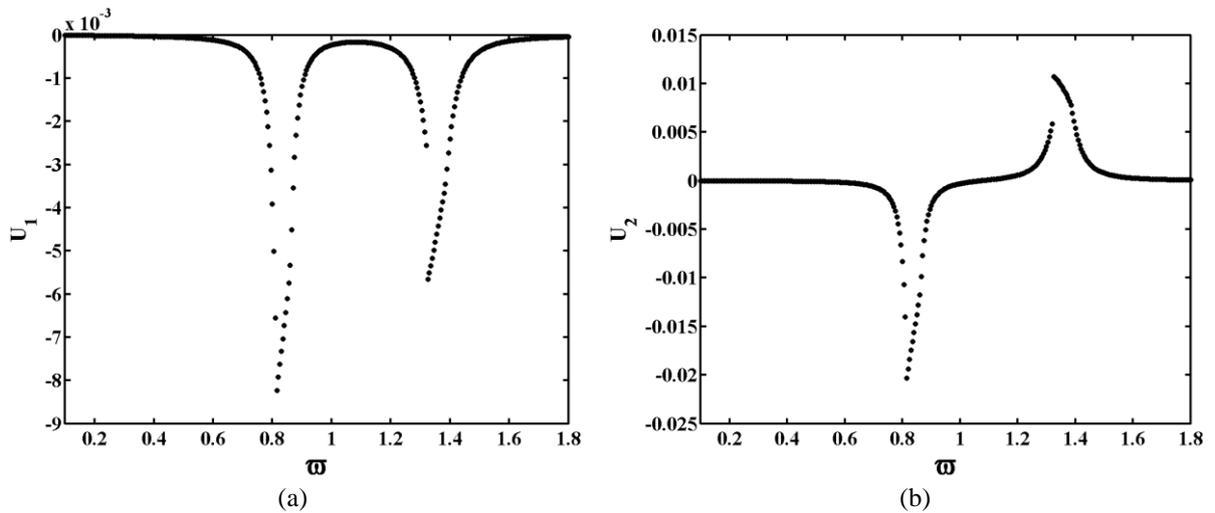


Figura 5.13 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.20$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema primário. (b) Sistema secundário.

A Figura 5.14 apresenta o espaço de fase e a seção de Poincaré nos casos do ADV linear e do ADV pseudoelástico em diferentes frequências de forçamento. Percebe-se a amplitude do sistema primário no caso com ADV pseudoelástico é menor e o comportamento é periódico.

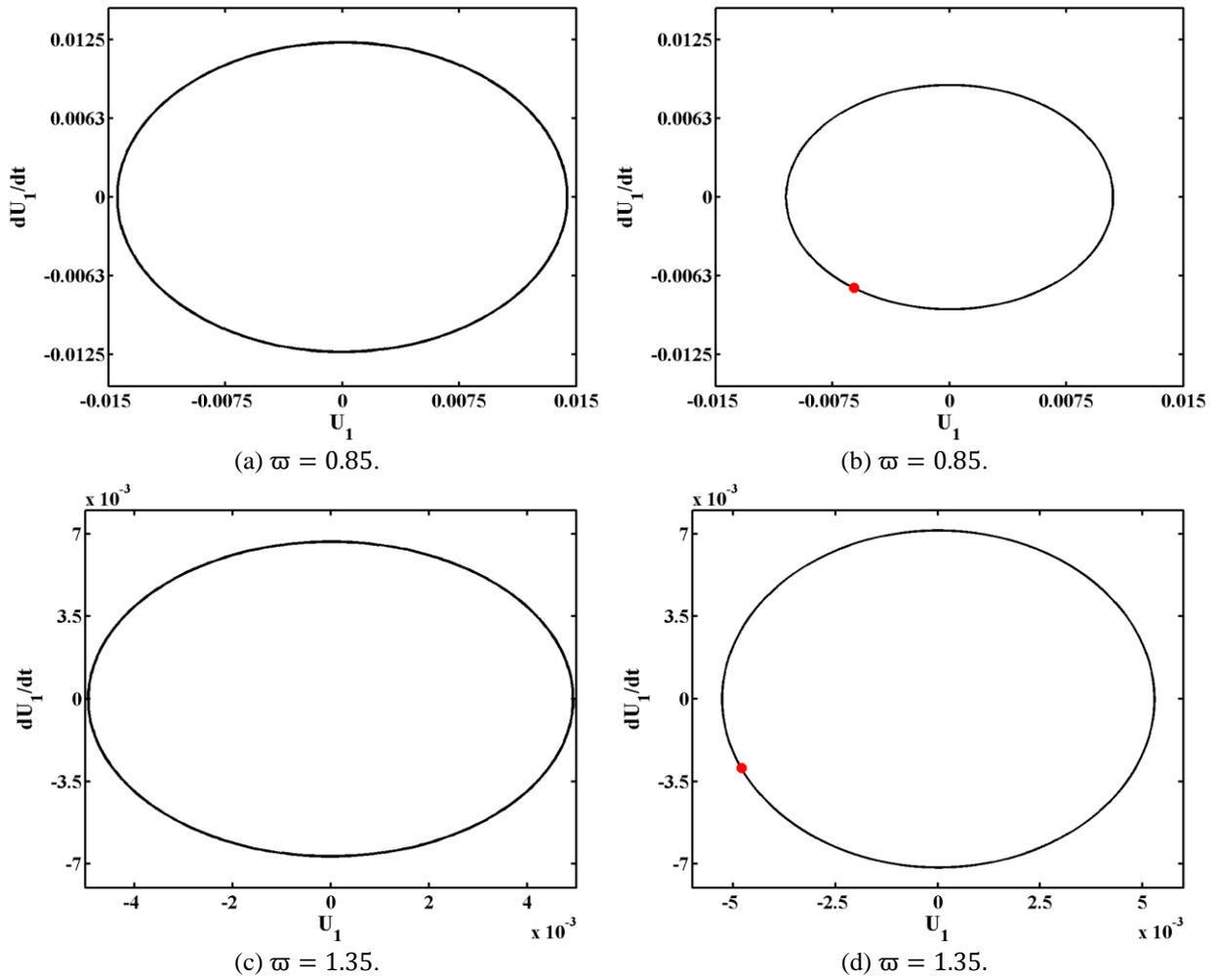


Figura 5.14 – Espaço de fase do sistema primário para $\gamma_m = 0.20$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a), (c) - ADV Linear. (b), (d) - ADV pseudoelástico.

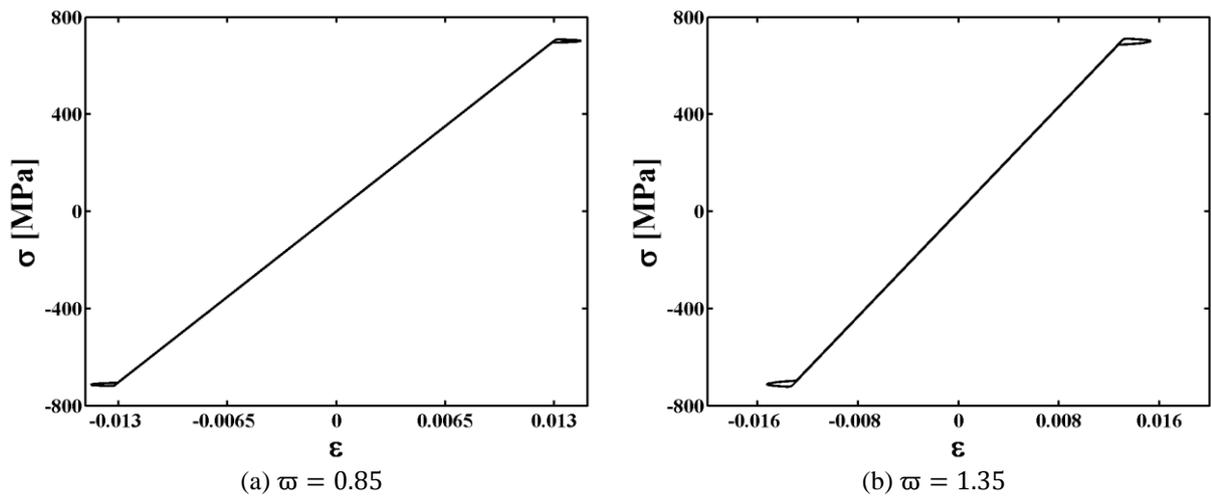


Figura 5.15 – Diagramas $\sigma - \epsilon$ para $\gamma_m = 0.20$ e $\delta = 0.0011$ aumentando-se a frequência de forçamento.

A Figura 5.15 apresenta os diagramas $\sigma - \epsilon$ para frequências de forçamento nos picos de ressonância, em que se verifica a presença de um pequeno laço de histerese incompleto.

- **Diminuição da Frequência de Forçamento:**

Com relação à diminuição da frequência de forçamento, novamente verifica-se um desempenho superior do ADV pseudoelástico no primeiro pico de ressonância e a ocorrência de um salto dinâmico no segundo pico, conforme mostrado na Figura 5.16. Nesse caso não há uma diminuição da faixa operacional do absorvedor como verificado no caso de diminuição da frequência de forçamento com para a razão de massa menor de $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0011$.

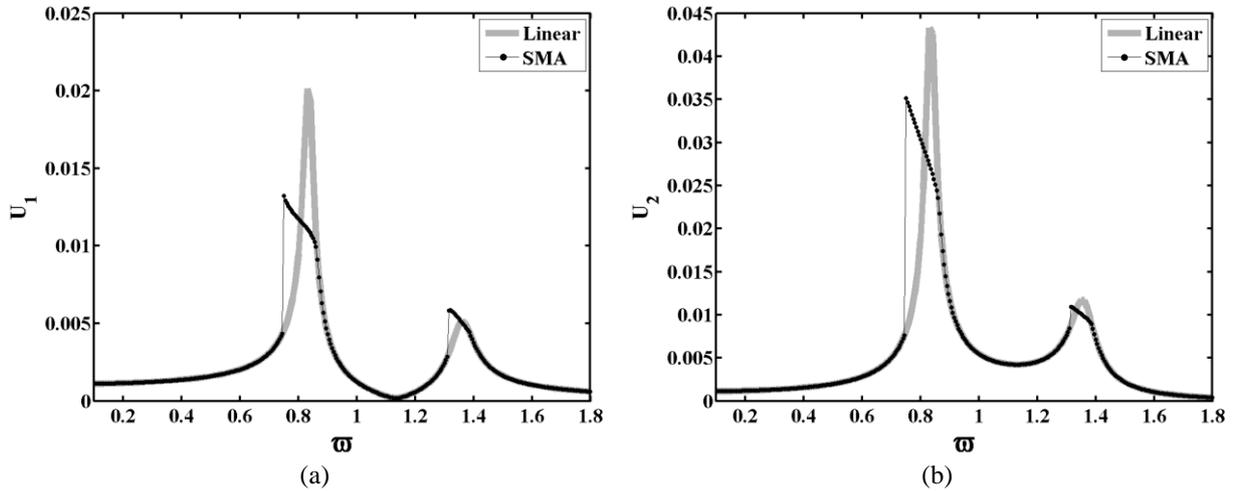


Figura 5.16 – Amplitudes máximas para $\gamma_m = 0.2$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.

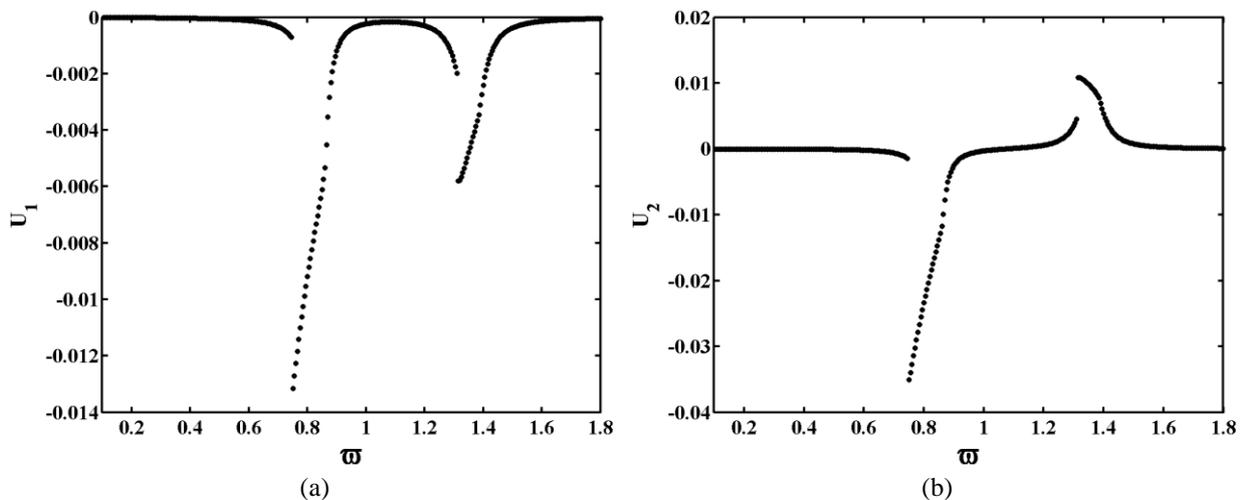


Figura 5.17 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.2$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema primário. (b) Sistema secundário.

A Figura 5.17(a) e Figura 5.17(b) apresentam os diagramas de bifurcação do sistema primário e secundário, respectivamente, onde é possível verificar que em toda a faixa de frequência analisada, a resposta é periódica de periodicidade 1. Essa resposta periódica também pode ser analisada por meio da Figura 5.18, que mostra uma comparação entre os espaços de fase do sistema não linear com o sistema linear. Nessa figura, é possível ver que, assim como no sistema linear, o sistema não linear apresenta uma órbita simples e fechada. A Figura 5.19 apresenta os diagramas $\sigma - \varepsilon$ para frequências de forçamento nos picos de ressonância, que apresentam um laço de histerese incompleto.

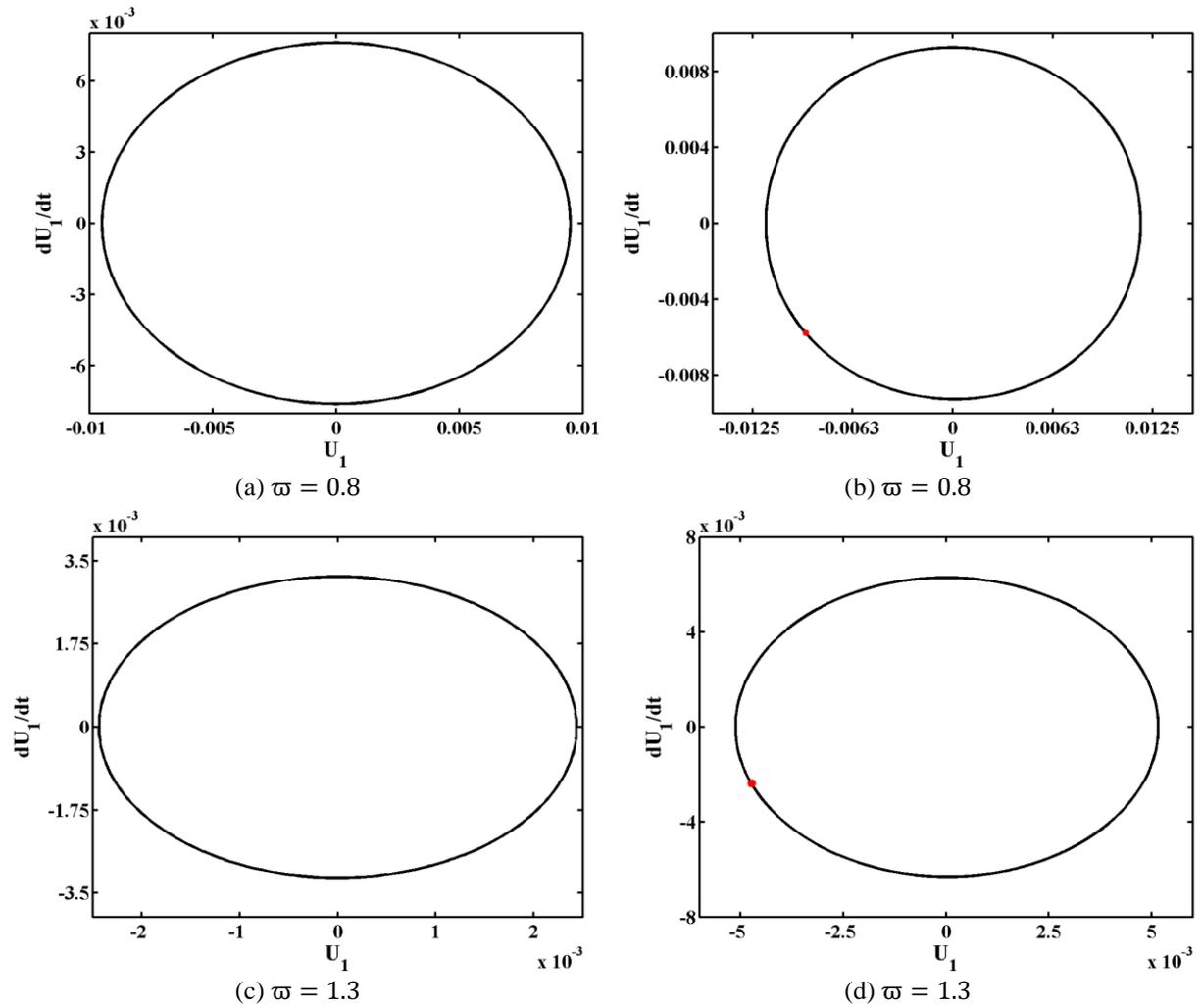


Figura 5.18 – Espaço de fase do sistema primário para $\gamma_m = 0.2$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a), (c) – Com ADV Linear. (b), (d) – Com ADV pseudoelástico.

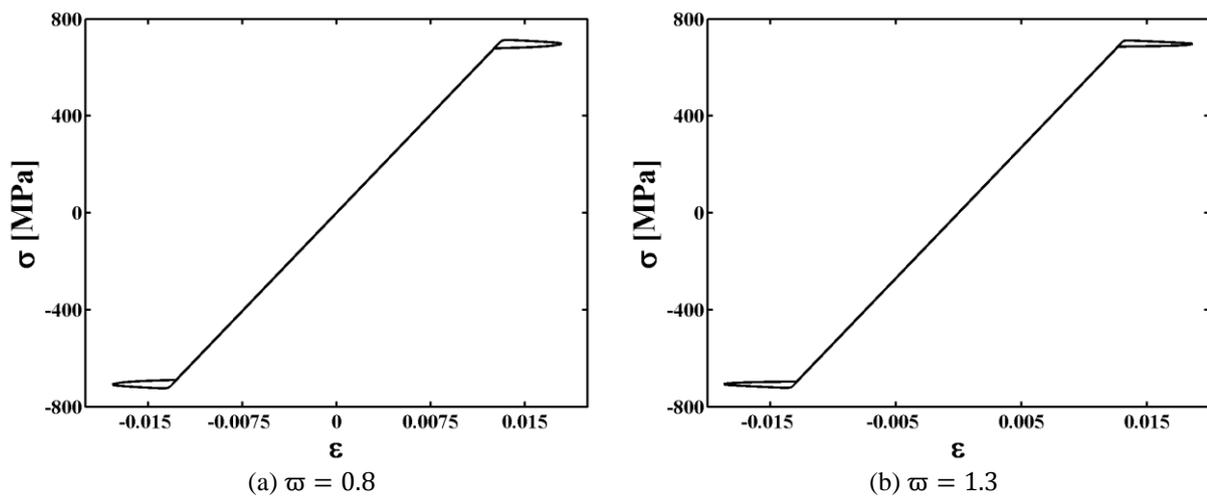


Figura 5.19 – Diagramas $\sigma - \epsilon$ para $\gamma_m = 0.2$ e $\delta = 0.0011$ diminuindo-se a frequência de forçamento.

5.2.4 ANÁLISE PARA $\delta = 0.0025$ E $\gamma_m = 0.10$

Nesse momento, aumenta-se o forçamento para $\delta = 0.0025$, e reduz-se a razão de massa para $\gamma_m = 0.1$.

- **Aumento da Frequência de Forçamento:**

Por meio da Figura 5.20(a), nota-se que quando o forçamento é aumentado para $\delta = 0.0025$, o sistema ainda apresenta um comportamento muito similar a casos com forçamentos menores. Com relação à amplitude máxima de deslocamento quando comparada ao sistema linear, os resultados apresentados para esse forçamento são menores. No entanto, a região de frequências em que há comportamento complexo é maior. Isso pode ser verificado por meio da Figura 5.21(a) e Figura 5.21(b).

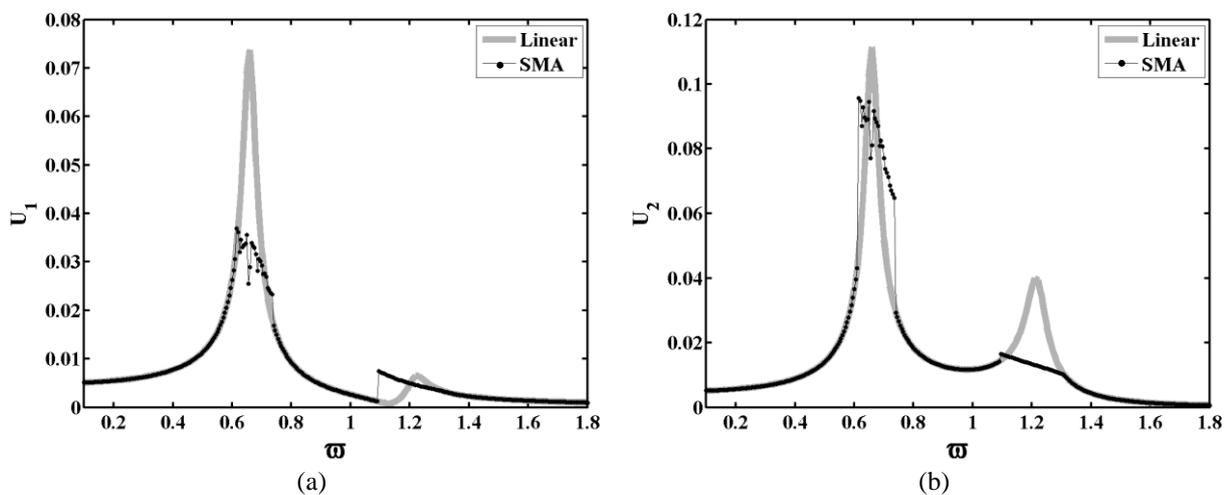


Figura 5.20 – Amplitude máxima para $\gamma_m = 0.10$ e $\delta = 0.0025$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.

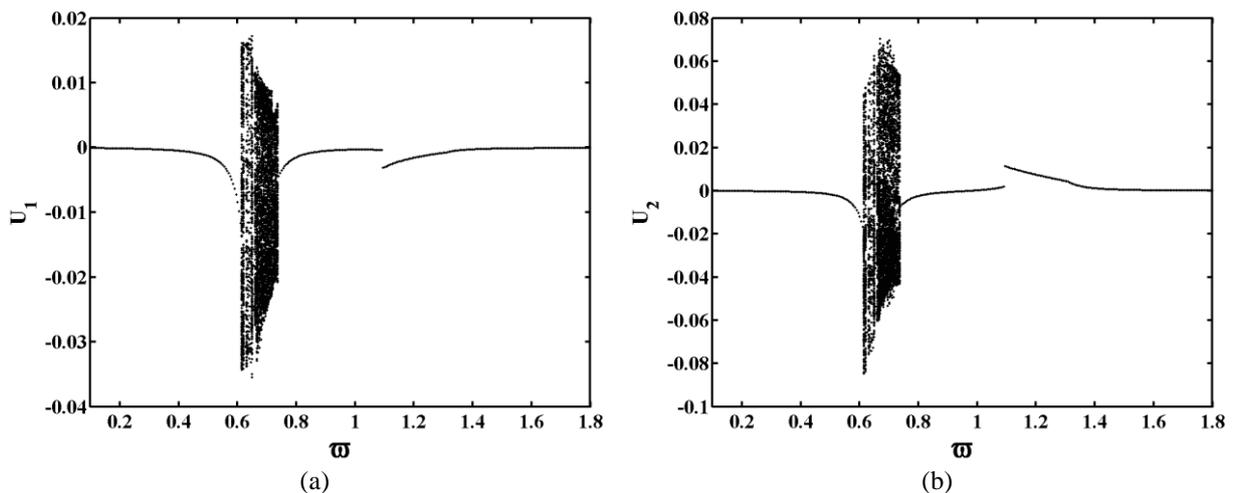
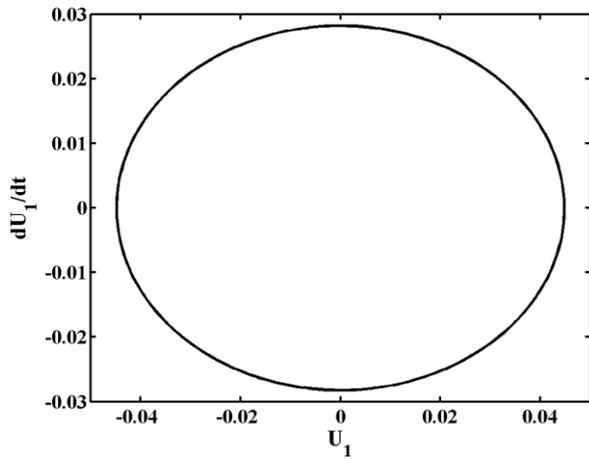
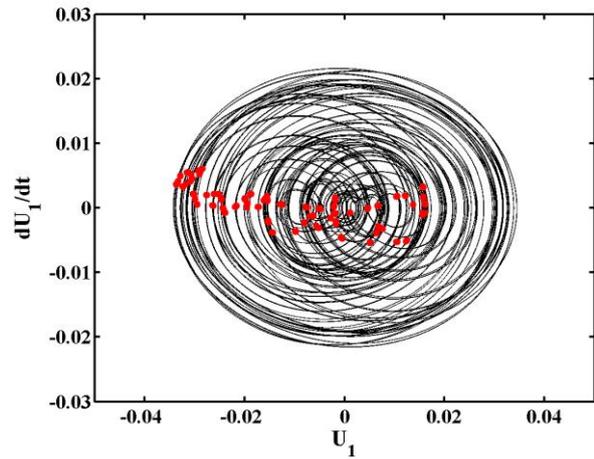


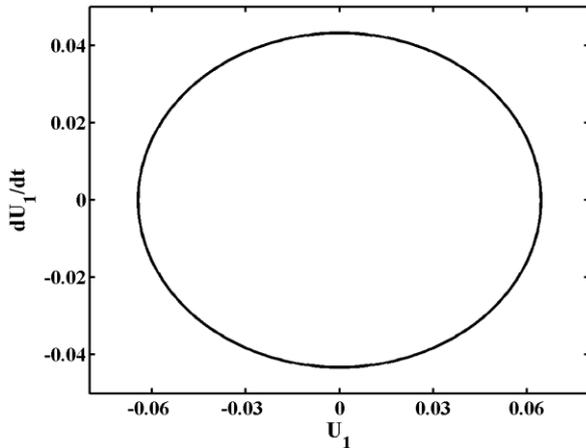
Figura 5.21 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.10$ e $\delta = 0.0025$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema primário. (b) Sistema secundário.



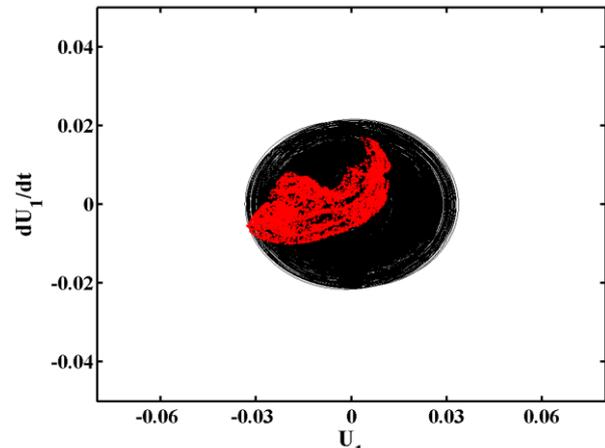
(a) $\varpi = 0.63$.



(b) $\varpi = 0.63$.

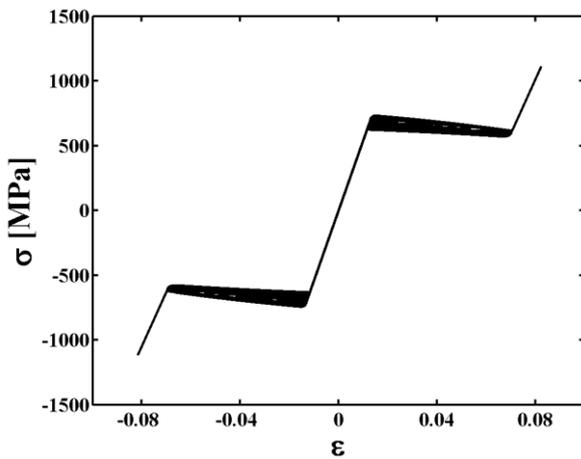


(c) $\varpi = 0.67$.

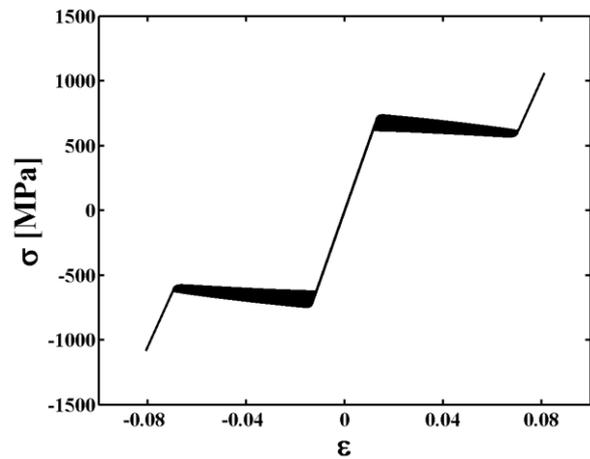


(d) $\varpi = 0.67$.

Figura 5.22 – Espaço de fase do sistema primário para $\gamma_m = 0.10$ e $\delta = 0.0025$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a), (c) - ADV Linear. (b), (d) - ADV pseudoelástico.



(a) $\varpi = 0.63$



(b) $\varpi = 0.67$

Figura 5.23 – Diagramas $\sigma - \epsilon$ para $\gamma_m = 0.10$ e $\delta = 0.0025$ aumentando-se a frequência de forçamento.

Analisando-se algumas frequências dentro da região complexa entre de $\varpi = 1.1$ a $\varpi = 1.3$, pode-se ver como é a evolução da resposta do sistema no tempo. Diferentemente dos casos já vistos, o sistema apresenta um comportamento muito mais complexo, conforme se verifica pela Figura 5.22. Para o caso $\varpi = 0.63$, vê-se que, mesmo depois de uma simulação considerando muitos períodos

além do transiente, o sistema tem uma periodicidade muito alta. Avaliando-se o diagrama $\sigma - \varepsilon$ relacionado a essa frequência, Figura 5.23(a), percebe-se um laço completo que percorre diversos caminhos. Para a frequência $\varpi = 0.67$, a resposta é semelhante, no entanto, não possui uma período definido, embora também esteja relacionado com um diagrama $\sigma - \varepsilon$ com laço completo que percorre diversos caminhos preenchendo a região de histerese, conforme apresenta a Figura 5.23(b).

- **Diminuição da Frequência de Forçamento:**

Diminuindo-se a frequência de forçamento, obtém-se uma resposta bastante rica e diferente do obtido anteriormente, como a apresenta a Figura 5.24. Vê-se que a amplitude máxima alcançada é por volta da metade da máxima amplitude no primeiro pico, $\varpi = 0.5$ a $\varpi = 0.7$ aproximadamente. Todavia, a região que corresponde à faixa de operação do ADV linear apresenta amplitudes maiores do que o sistema primário no caso linear.

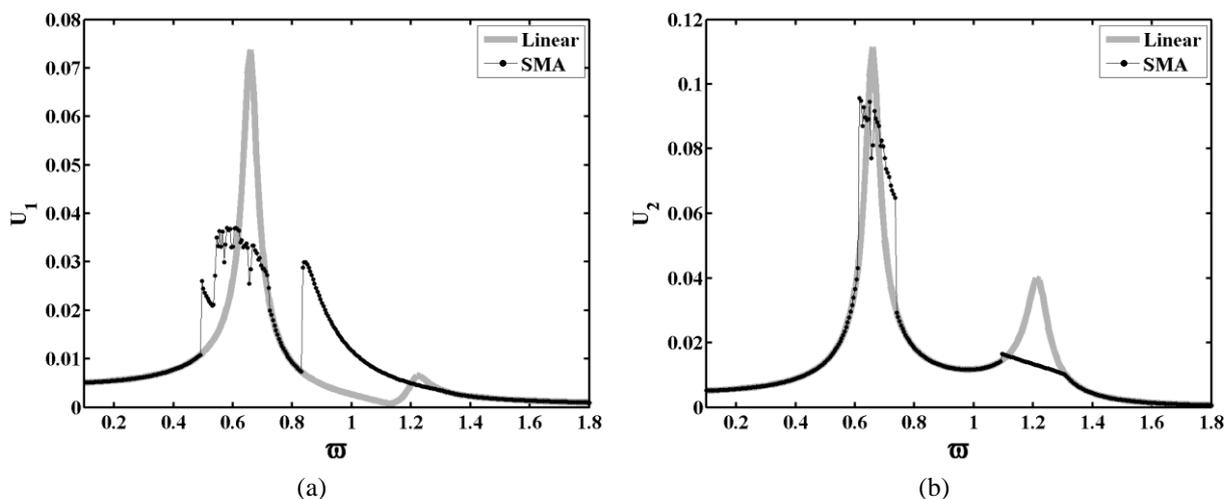


Figura 5.24 – Amplitude máxima para $\gamma_m = 0.10$ e $\delta = 0.0025$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.

Com a diminuição de Frequência, o sistema passa a apresentar uma resposta não linear por meio de um laço de histerese incompleto em início de formação que surge por volta de $\varpi = 1.4$. Com a contínua diminuição da frequência, o laço cresce até o ponto em que ocorre o salto dinâmico na frequência $\varpi = 0.82$, que representa a mudança do comportamento não linear com laço de histerese incompleto para um comportamento linear. Essa resposta linear é presente entre $\varpi = 0.82$ e $\varpi = 0.73$ aproximadamente. Depois desse intervalo, o sistema volta a apresentar um comportamento bastante complexo até aproximadamente $\varpi = 0.5$, como mostra Figura 5.25(a) e Figura 5.25(b), diagrama de bifurcação do sistema primário e secundário respectivamente. A Figura 5.26 dá uma melhor visualização do comportamento do sistema para frequências dentro da região de comportamento complexo.

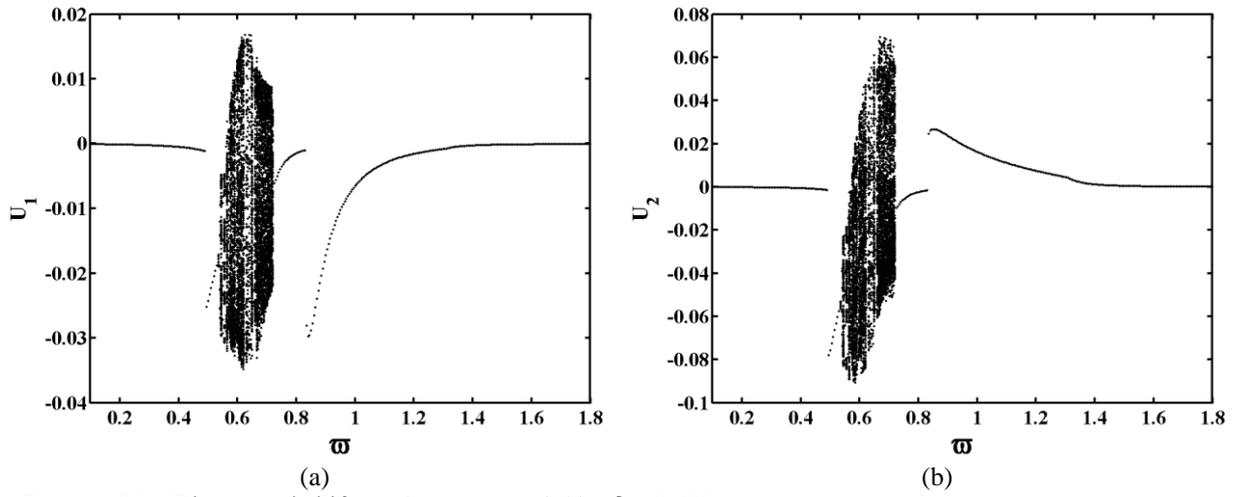


Figura 5.25 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.10$ e $\delta = 0.0025$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.

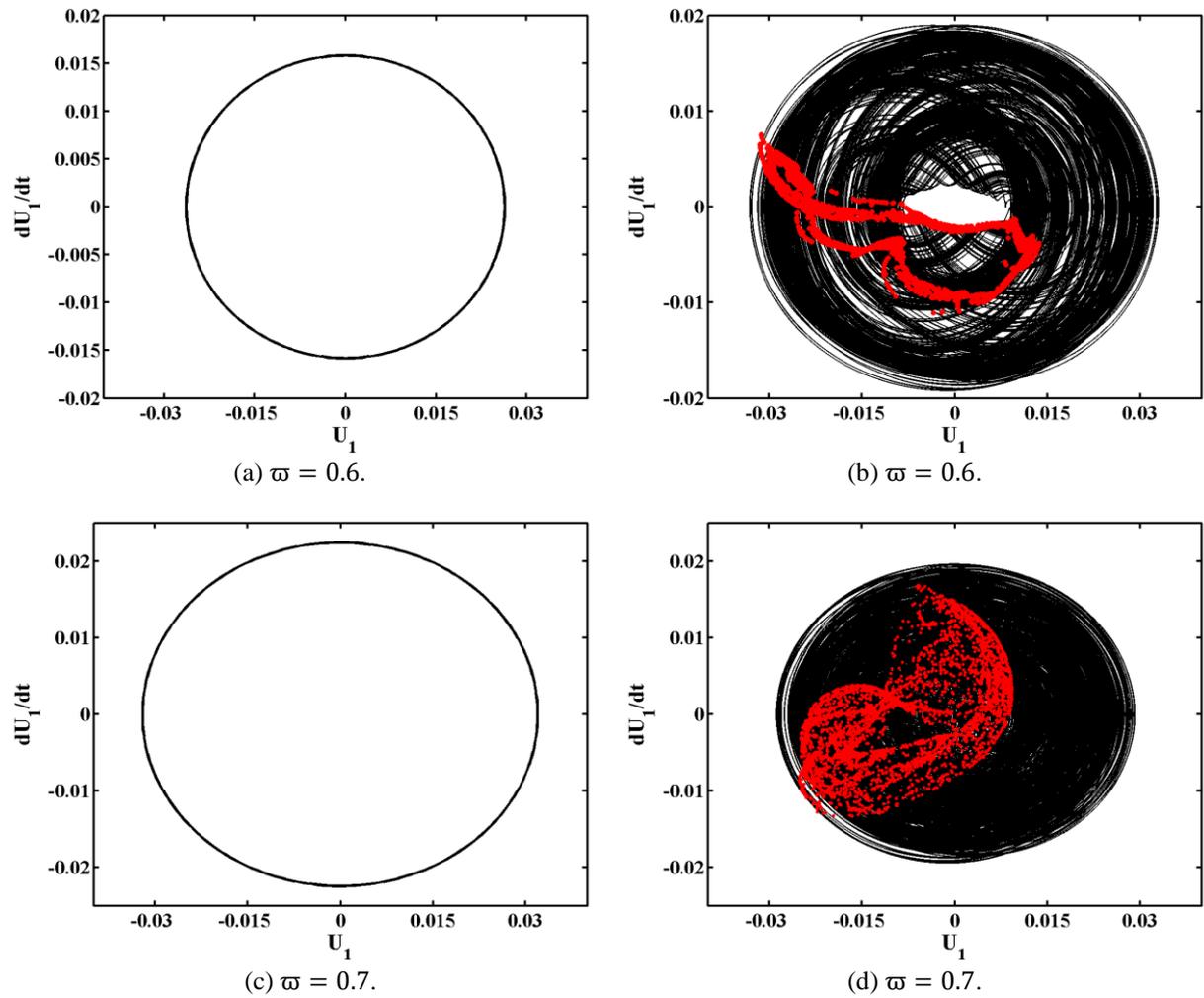


Figura 5.26 – Espaço de fase do sistema primário para $\gamma_m = 0.10$ e $\delta = 0.0025$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a), (c)- Com ADV linear. (b), (d) – Com ADV pseudoelástico.

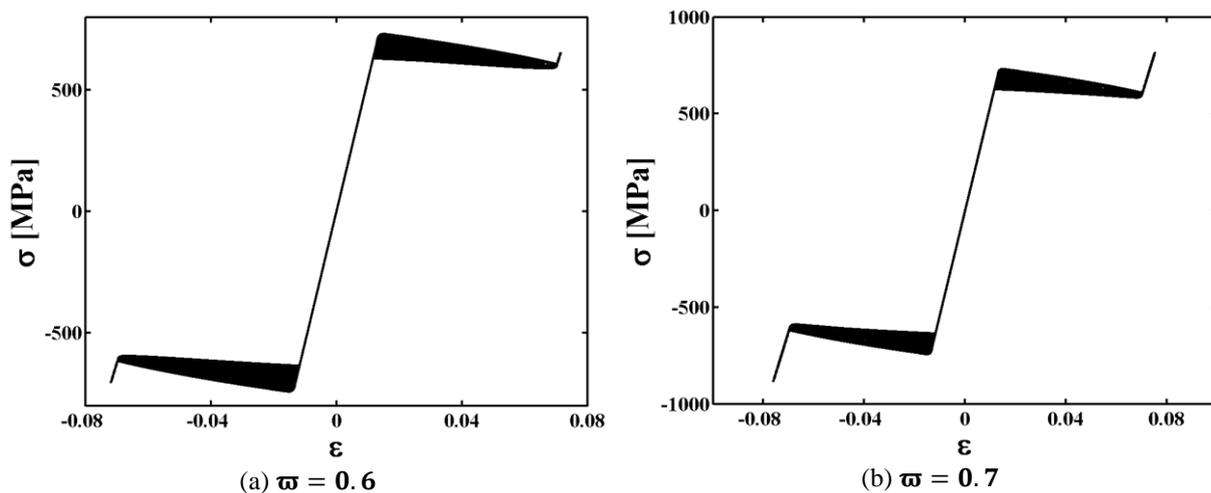


Figura 5.27 – Diagramas σ - ε para $\gamma_m = 0.10$ e $\delta = 0.0025$ diminuindo-se a frequência de forçamento.

Analisando-se duas frequências dentro da região complexa, $\varpi = 0.73$ a $\varpi = 0.5$, nota-se que a tensão nessa região é suficiente para que o laço de histerese seja completo, como apresenta a Figura 5.27(a), para a frequência de $\varpi = 0.6$, e a Figura 5.27(b), para a frequência de $\varpi = 0.7$.

5.2.5 ANÁLISE PARA $\delta = 0.0025$ E $\gamma_m = 0.15$

Nesse momento, aumenta-se a razão de massa para $\gamma_m = 0.15$ $\delta = 0.0025$, mantendo-se o mesmo forçamento $\delta = 0.0025$.

- **Aumento da Frequência de Forçamento:**

A partir das amplitudes máximas de resposta do sistema primário, apresentadas na Figura 5.28, verifica-se que na primeira região de ressonância, de aproximadamente $\varpi = 0.7$ a $\varpi = 0.85$, a amplitude máxima é bastante reduzida, chegando a aproximadamente 60% de redução, no caso do ADV pseudoelástico. O segundo pico está relacionado à região que vai de $\varpi = 1.1$ a $\varpi = 1.4$ aproximadamente. Nessa região, percebe-se que o sistema apresenta um salto e o que o segundo pico é deslocado para a esquerda, quando comparado ao caso com ADV linear.

A partir dos diagramas de bifurcação, apresentados na Figura 5.29, percebe-se um comportamento complexo do sistema na região do primeiro pico de ressonância, como verificado no caso analisada anteriormente para a mesma razão de massa. Detalhes desse comportamento complexo são mostrados através dos espaços de fase e seção de Poincaré apresentados na Figura 5.30. A Figura 5.31 apresenta o diagrama $\sigma - \varepsilon$ para esse caso, uma laço de histerese incompleto com que percorre diversos caminhos preenchendo a região de histerese. Esse tipo de laço ocorre em toda essa região de comportamento complexo.

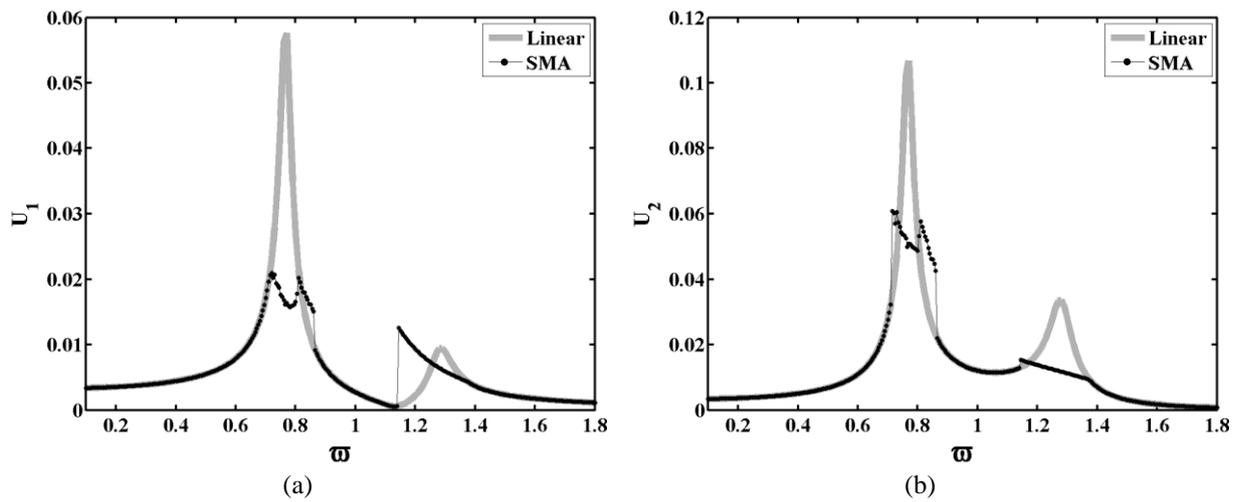


Figura 5.28 – Amplitude máxima para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.005$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.

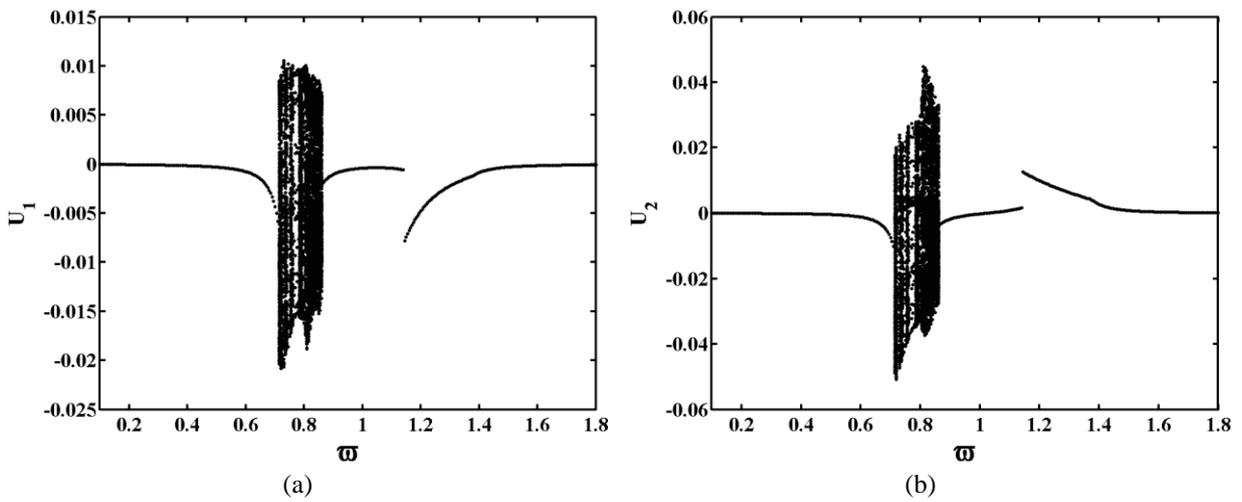


Figura 5.29 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0025$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.

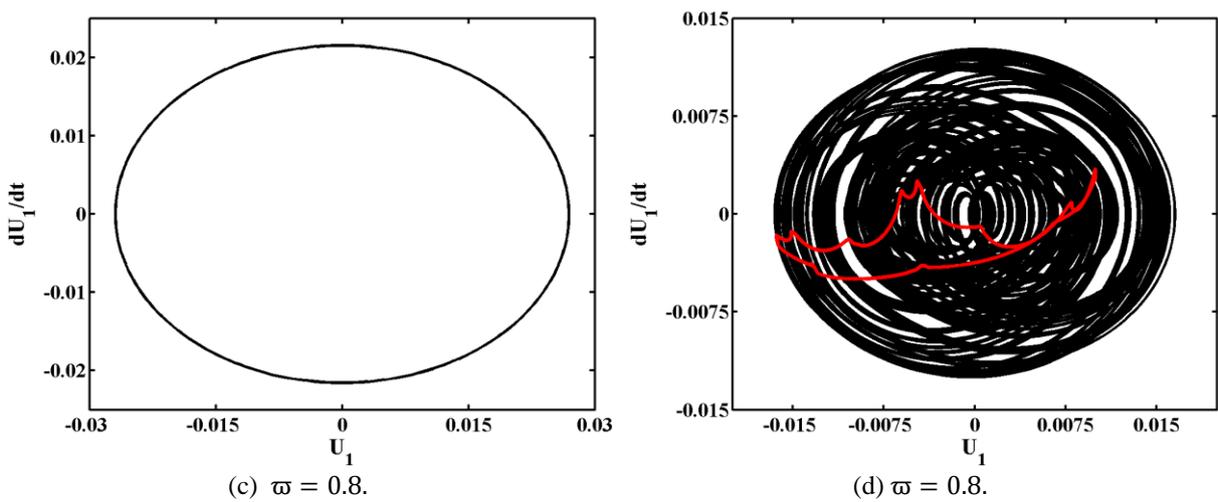


Figura 5.30 - Espaço de fase do sistema primário com ADV pseudoelástico para $\gamma_m = 0.15$, $\delta = 0.0025$ e $\omega = 0.8$

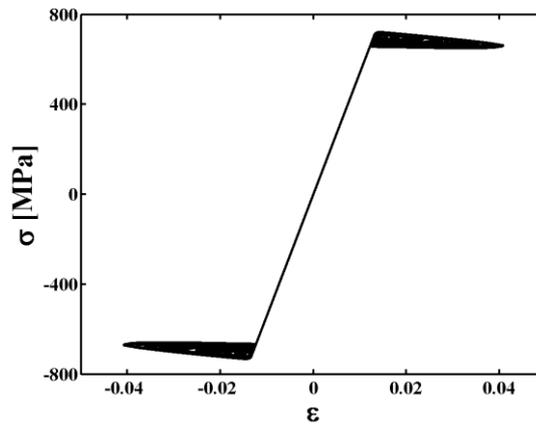


Figura 5.31– Diagramas σ - ϵ para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0025$ e $\varpi = 0.8$ aumentando-se a frequência de forçamento.

- **Diminuição da Frequência de Forçamento:**

No caso de diminuição de frequência, percebe-se uma grande diminuição nas amplitudes máximas de resposta, conforme apresentado na Figura 5.32. No caso do segundo pico de ressonância, há um deslocamento razoável para a esquerda, diminuindo consideravelmente a faixa de operação do ADV. Avaliando o comportamento apresentado, tem-se que o sistema passa de um comportamento linear para não linear com laço de histerese incompleto em torno de $\varpi = 1.3$. A partir dessa frequência ocorre um aumento da amplitude juntamente com o laço de histerese até o ponto em que há o salto dinâmico em $\varpi = 1.0$, que é a passagem de um comportamento não linear com laço incompleto para um comportamento linear. Depois de passar pela região com comportamento linear, o sistema volta a um comportamento complexo em $\varpi = 0.8$ e assim prossegue até aproximadamente $\varpi = 0.5$, em que há comportamento linear novamente. A Figura 5.33 apresenta os diagramas de bifurcação, onde é possível ter uma compreensão maior do comportamento.

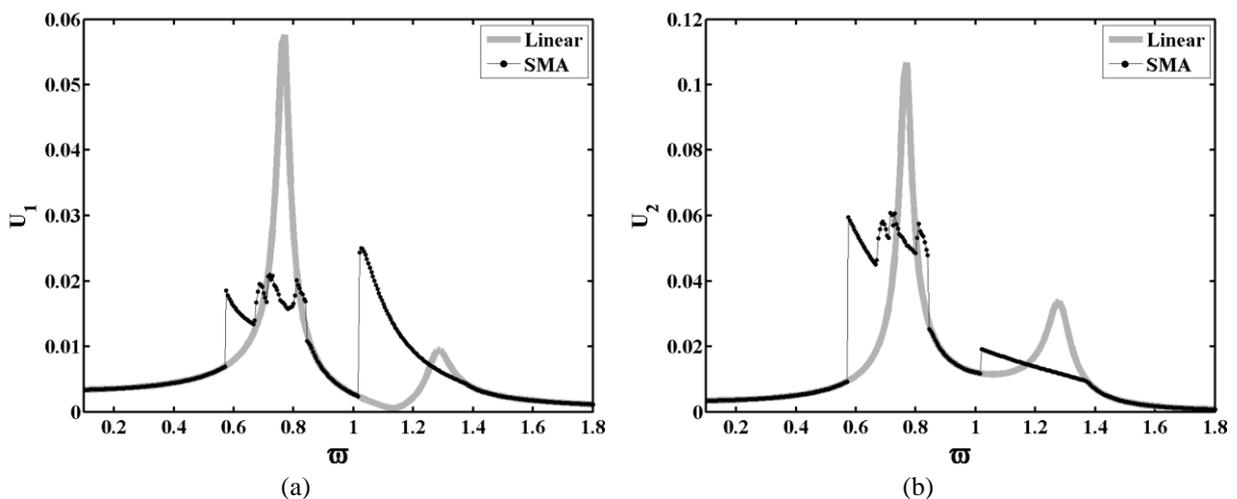


Figura 5.32- Amplitude máxima para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0025$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema primário. (b) Sistema secundário.

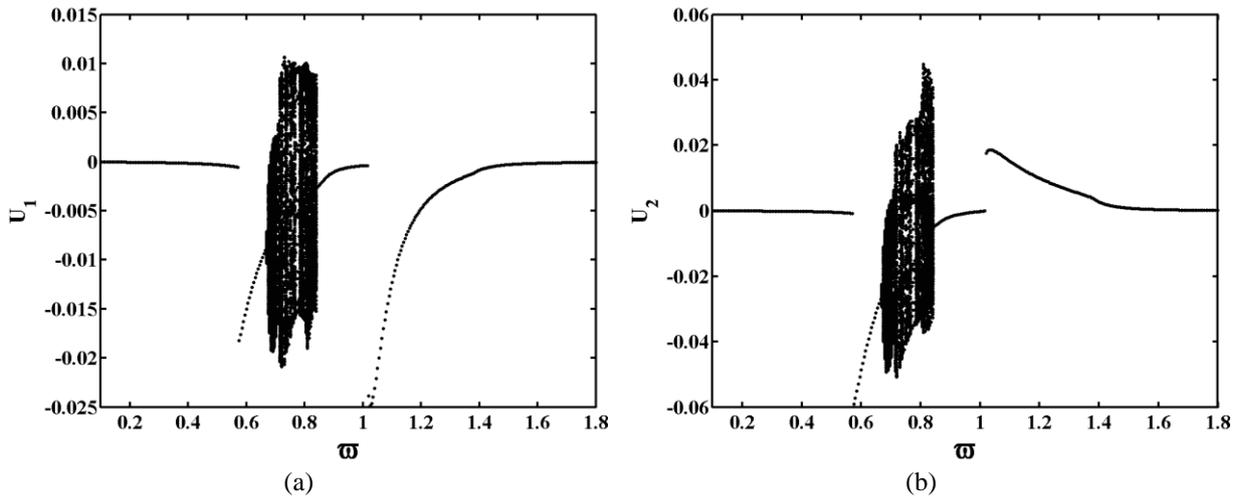


Figura 5.33 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0025$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.

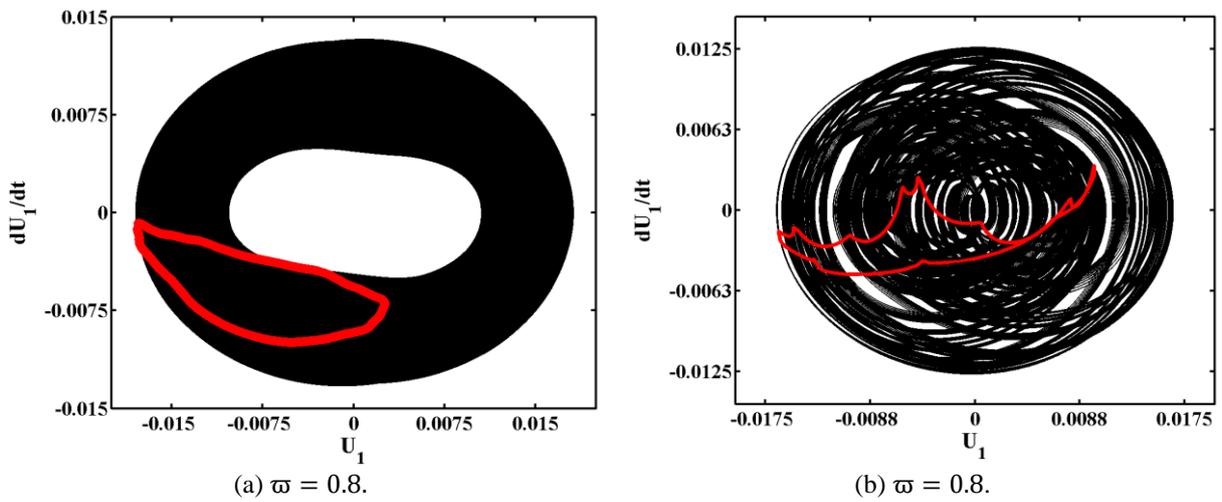


Figura 5.34 - Espaço de fase do sistema primário com ADV pseudoelástico para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0025$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário (b) Sistema Secundário.

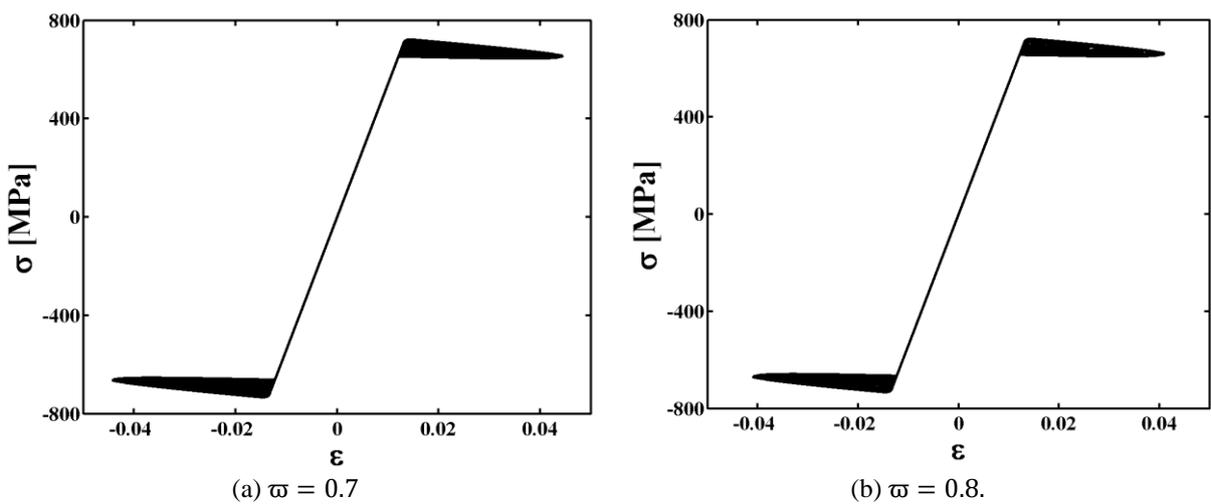


Figura 5.35 - Diagramas σ - ϵ para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.0025$ diminuindo-se a frequência de forçamento.

A Figura 5.34 apresenta detalhes do comportamento do sistema a partir do espaço de fase e seção de Poincaré, para duas frequências de forçamento na região do primeiro pico de ressonância. Figura 5.35 complementa a análise apresentando os diagramas $\sigma - \varepsilon$.

5.2.6 ANÁLISE PARA OUTROS CASOS DE δ E γ_m

Como as duas variáveis consideradas para análise são a razão de massa γ_m e o forçamento δ , existem inúmeras combinações que resultariam em interessantes análises, no entanto, é impossível tratar de todas em apenas um trabalho. Todavia, vale ressaltar algumas tendências que ocorrem quando valores maiores de δ são utilizados para diferentes valores de γ_m .

Para essa análise são consideradas duas situações que demonstram bem a tendência da resposta do sistema primário quando valores maiores de forçamento são avaliados. O primeiro caso é quando $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.005$ e o segundo, $\gamma_m = 0.25$ e $\delta = 0.03$.

- **Aumentando-se a Frequência de Forçamento:**

O que se observa quando maiores valores de forçamento são utilizados é que a região relativa ao primeiro pico de ressonância do Sistema Não Linear sempre apresenta amplitudes máximas menores, Figura 5.36(a) e Figura 5.36(b). Quanto maior é a razão de massa γ_m , menores são essas amplitudes. Para razões de massa abaixo de $\gamma_m = 0.20$, o sistema sempre apresenta um comportamento bastante complexo, como apresenta a Figura 5.37(a) e Figura 5.37(b).

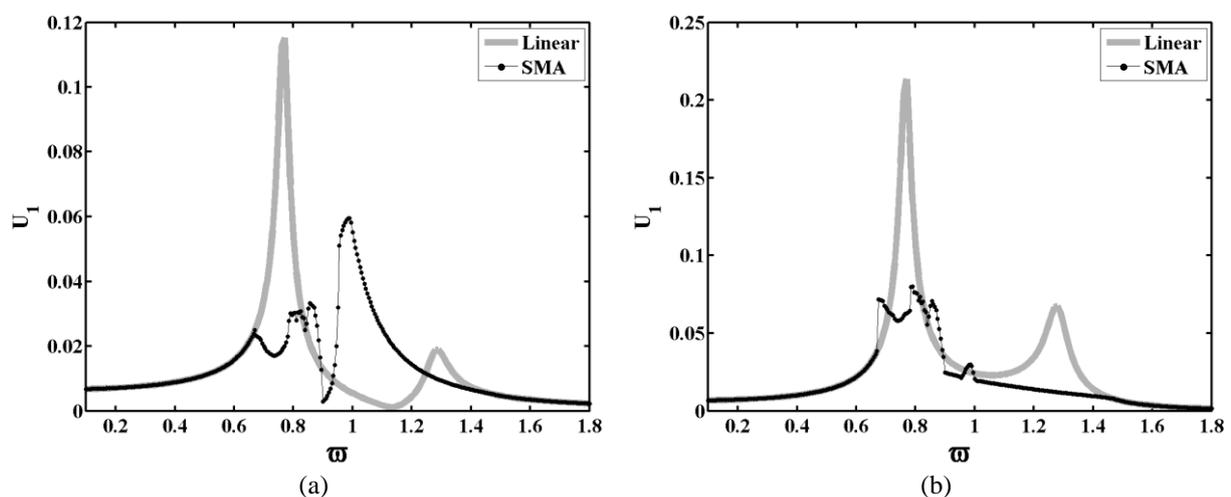


Figura 5.36– Amplitude máxima para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.005$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.

No entanto, para valores acima de $\gamma_m = 0.20$, normalmente o comportamento é periódico de periodicidade 1 ou maior que 1 e é acompanhado somente de saltos dinâmicos. Quando a forçamento é muito alto da ordem de $\delta = 0.03$ em diante, o primeiro pico pode se deslocar para valores de frequências mais baixos, como apresenta a Figura 5.38.

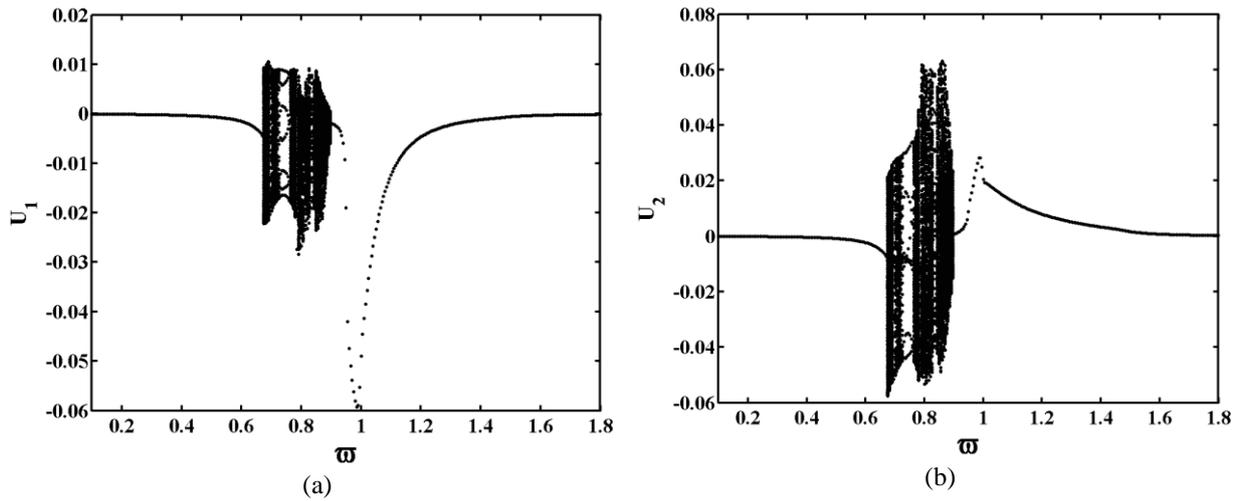


Figura 5.37– Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.005$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.

Além do deslocamento do primeiro pico, há uma pequena região de comportamento complexo, conforme apresenta a Figura 5.39(a) e a Figura 5.39(b). Para altos valores de forçamento, os picos estão sempre relacionados com saltos dinâmicos, que indicam uma abrupta mudança de comportamento do sistema.

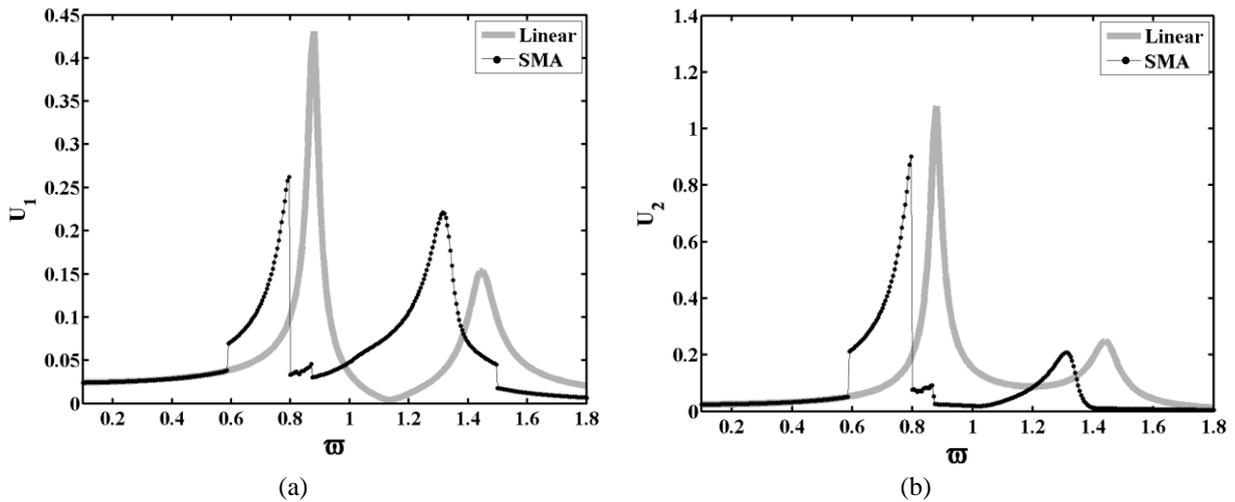


Figura 5.38 – Amplitude máxima para $\gamma_m = 0.25$ e $\delta = 0.03$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.

Com relação à região de frequências do segundo pico de ressonância, valores de forçamento da ordem de $\delta = 0.03$ em diante fazem que ele seja deslocado para a banda operacional do ADV Linear, isto é, na região em que se deseja baixas amplitudes de oscilação as amplitudes máximas são da ordem do segundo pico de ressonância do sistema linear.

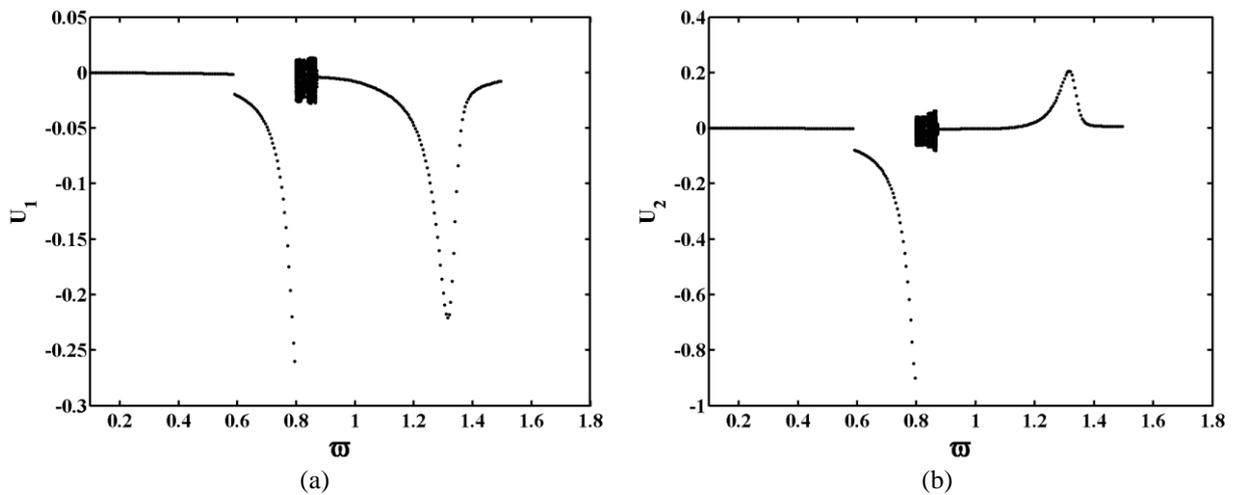


Figura 5.39 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m=0.25$ e $\delta=0.03$ aumentando-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.

• **Diminuindo-se a Frequência de Forçamento:**

Quando a frequência de forçamento é diminuída no caso $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.005$, vê-se que o comportamento do sistema é muito similar ao caso de aumento de frequência, como apresenta a Figura 5.40(a) e pela Figura 5.40(b). O segundo pico de ressonância é deslocado para a banda operacional do ADV Linear e no primeiro pico há um comportamento complexo acompanhado de saltos dinâmicos. Assim como no caso em que a frequência é aumentada, o comportamento complexo domina uma região maior de frequências relacionadas ao primeiro pico de ressonância, conforme ilustra a Figura 5.41(a) e a Figura 5.41(b).

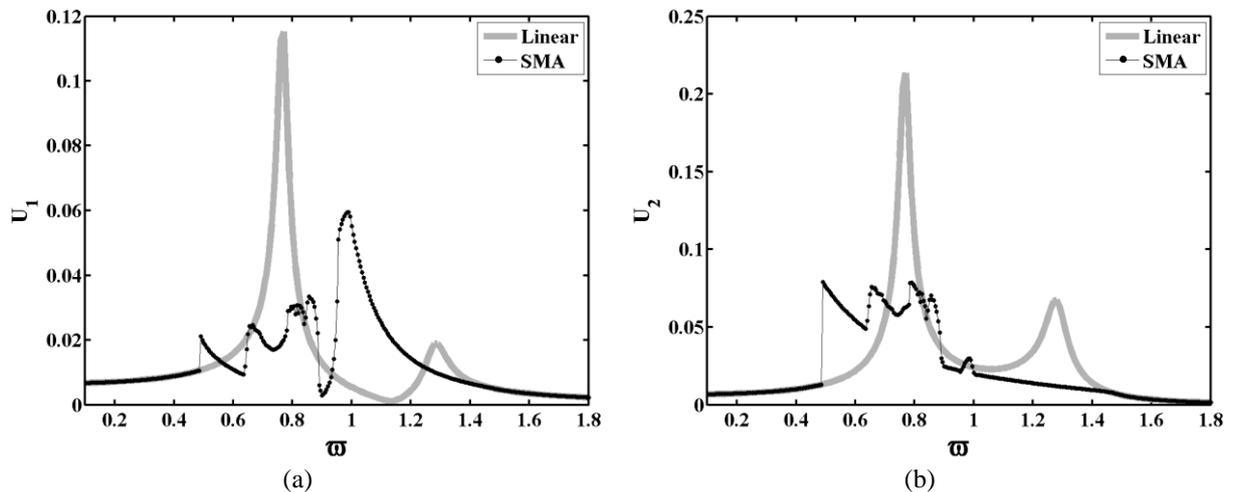


Figura 5.40 – Amplitude máxima para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.005$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.

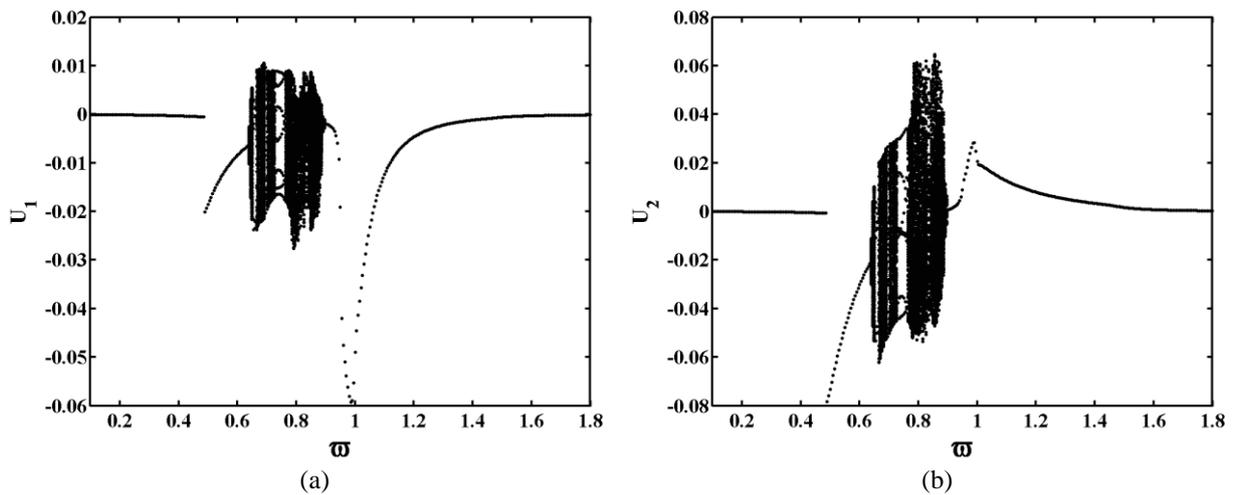


Figura 5.41 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.005$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.

De acordo com a Figura 5.42(a) e Figura 5.42(b), o caso $\gamma_m = 0.25$ e $\delta = 0.03$ possui um comportamento é muito similar ao caso anterior $\gamma_m = 0.15$ e $\delta = 0.005$. O segundo pico de ressonância é deslocado para a banda operacional do ADV Linear e o primeiro pico tem sua amplitude máxima extremamente reduzida. Embora seja um caso com alta razão de massa $\gamma_m = 0.25$, há uma pequena região com comportamento complexo e outra com periodicidade 3, Figura 5.43(a) e a Figura 5.43(b).

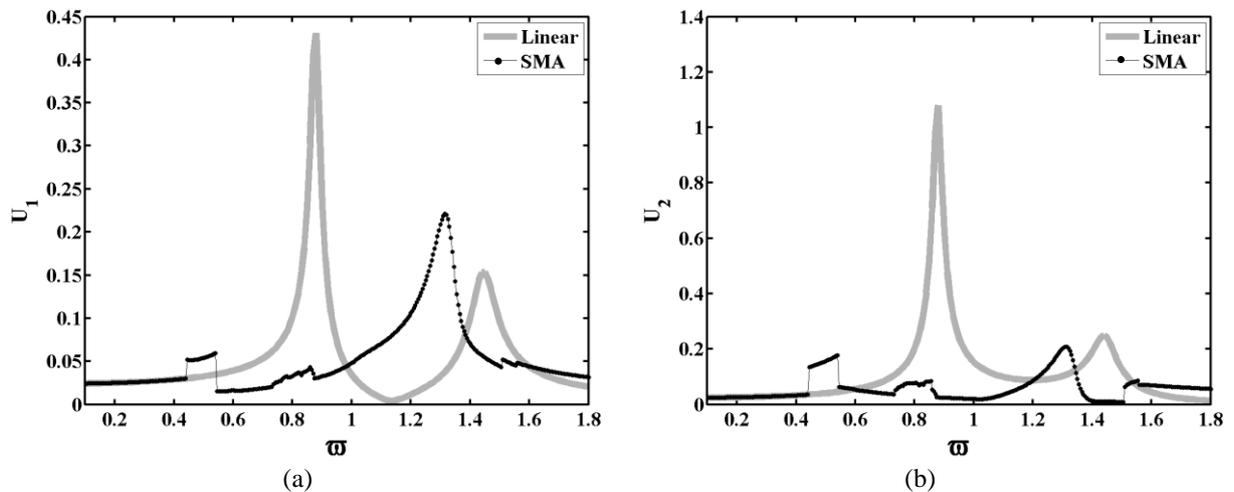


Figura 5.42 – Amplitude máxima para $\gamma_m = 0.25$ e $\delta = 0.03$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.

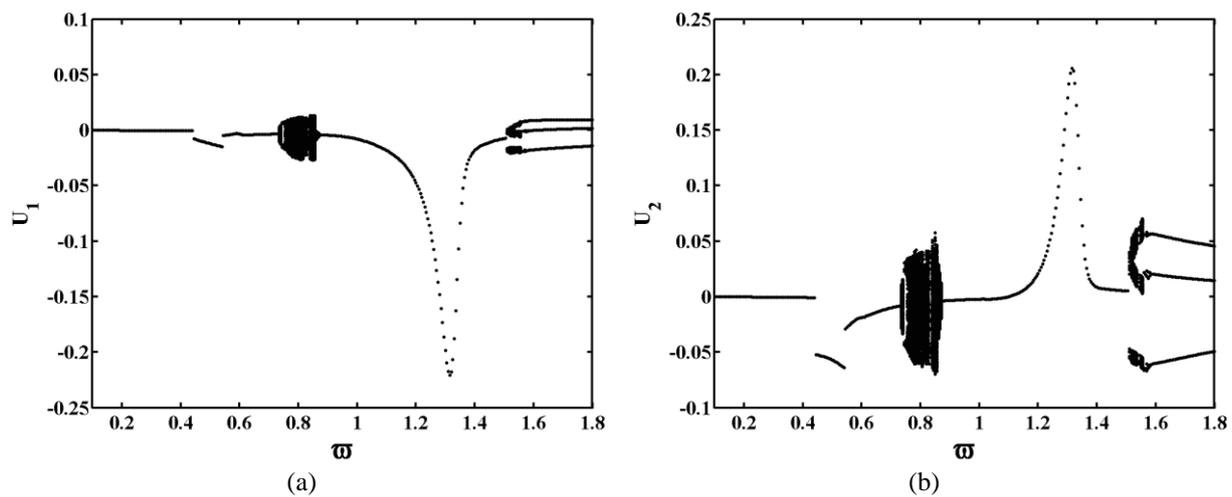


Figura 5.43 – Diagrama de bifurcação para $\gamma_m = 0.25$ e $\delta = 0.03$ diminuindo-se a frequência de forçamento. (a) Sistema Primário. (b) Sistema Secundário.

6 CONCLUSÃO

Esse trabalho apresenta uma investigação do desempenho de um ADV pseudoelástico composto por elementos de SMA. Todas as análises são realizadas a partir de simulações numéricas, sendo utilizado o modelo constitutivo proposto por Paiva *et al.*(2005) para descrever o comportamento das SMAs. A ideia central do trabalho é explorar a capacidade dissipativa do material, devido a presença do laço de histerese, para melhorar o desempenho do ADV pseudoelástico quando comparado ao ADV linear.

Inicialmente, realiza-se uma análise numérica da dinâmica do ADV sozinho, modelado como um oscilador de IGL, para diferentes amplitudes e frequências de forçamento. A partir dessa análise, os principais aspectos observados, importantes para o desenvolvimento de um absorvedor dinâmico 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, o sistema poderá apresentar comportamentos distintos para um mesmo conjunto de parâmetros devido à presença de órbitas coexistentes. Essa mudança pode representar uma perda significativa de eficiência para o absorvedor. Considerando o segundo aspecto, a presença dos saltos dinâmicos introduz mudanças bruscas ao sistema podendo ocasionar reações no sistema primário. Essas características podem ser prejudiciais ao sistema, por isso é importante realizar uma análise adequada do sistema, para que seja possível avaliar e evitar situações críticas.

Além disso, tentou-se estabelecer uma relação entre os saltos dinâmicos e o comportamento do material. A partir de análises do diagrama $\sigma - \epsilon$, 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:

linear para não-linear com laço incompleto;

linear para não linear com laço completo;

não linear com laço completo para não linear com laço incompleto;

não linear com laço incompleto para não linear com laço completo;

não linear com laço completo para linear;

não linear com laço incompleto para linear;

não linear com laço incompleto e subloop para não linear com laço incompleto;

Em seguida, compara-se o desempenho de um ADV linear e um ADV pseudoelástico a partir da análise da amplitude máxima de resposta do sistema primário quando o absorvedor está acoplado. O

estudo realizado consiste em uma fase preliminar para o desenvolvimento de um ADV com SMA. Esse estudo é bastante importante tendo em vista a complexidade do comportamento dinâmico apresentado pelas SMAs, ainda não muito explorado na literatura.

A partir das simulações realizadas, de forma similar à análise do oscilador 1GL, percebeu-se que o oscilador 2GL pseudoelástico apresenta respostas diferentes aumentando-se e diminuindo-se a frequência de excitação. Essa diferença de comportamento para um mesmo conjunto de parâmetros indica a presença de órbitas coexistentes e, dependendo das condições iniciais ou de pequenas perturbações externas, o sistema pode apresentar comportamentos distintos, assim como mudanças bruscas de resposta.

Diversas simulações foram realizadas e algumas tendências de comportamento, considerando-se diferentes valores de γ_m e δ , foram identificadas. Para razões de massa menores que 0.20 e $\delta \leq 0.0025$, verificou-se que o sistema primário apresenta uma redução na sua amplitude máxima quando comparada ao oscilador com ADV linear. Juntamente com essa redução, surge um comportamento não periódico na região do primeiro pico de ressonância. Na região da segunda frequência de ressonância, o sistema apresenta um comportamento periódico de periodicidade 1 com a presença de um salto dinâmico. Em relação à amplitude máxima de resposta do sistema primário, não é verificada diferença significativa considerando-se o ADV linear e o ADV pseudoelástico na região da segunda frequência de ressonância.

Para razões de massa maiores ou iguais a 0.20 e $\delta \leq 0.0025$, verificou-se um comportamento periódico de periodicidade 1 do sistema em toda a faixa de frequência de forçamento analisada. Além disso, o sistema primário apresenta redução da amplitude máxima de resposta na região da primeira frequência de ressonância considerando o ADV pseudoelástico quando comparado ao ADV linear. Na região do segundo pico de ressonância, o salto dinâmico continua presente, como no caso com razões de massa menores.

Outro ponto a destacar são os deslocamentos das regiões de ressonância quando a amplitude de forçamento é aumentada, principalmente um deslocamento do segundo pico de ressonância para frequências mais baixas, resultando em uma diminuição da banda operacional do absorvedor. Apesar dessa diminuição, verifica-se uma redução significativa das amplitudes máximas do sistema primário com ADV pseudoelástico no primeiro pico de ressonância para $\delta \leq 0.0025$, justificando o uso de elementos de SMA no absorvedor ao invés de elementos de rigidez linear.

Para amplitudes de forçamento $\delta > 0.0025$, o absorvedor pseudoelástico não apresentou um desempenho satisfatório quando comparado ao ADV linear. Nesse caso, não é verificada uma redução significativa das amplitudes máximas de resposta do sistema primário com ADV pseudoelástico. Além disso, o comportamento do sistema pode se tornar bastante complexo e com presença de saltos dinâmicos.

Os principais aspectos observados a partir das simulações numéricas, importantes para o desenvolvimento de um ADV pseudoelástico, foram a diferença de respostas apresentadas aumentando-se e diminuindo-se a frequência de forçamento, um comportamento complexo e a presença de saltos dinâmicos. No primeiro caso, diferentes respostas obtidas para uma mesma frequência significa uma instabilidade da solução. Nessas situações, perturbações externas podem levar o sistema de uma resposta para outra. Essa mudança pode representar uma perda significativa de desempenho para o absorvedor, por exemplo. No que se refere ao segundo aspecto, para diferentes combinações de razões de massa e amplitude de forçamento, o sistema pode apresentar comportamentos complexos ou periódicos, relacionado ou não com uma diminuição das amplitudes máximas de resposta do sistema primário. Nesse contexto, torna-se importante a determinação de valores adequados de γ_m e δ . Considerando o terceiro aspecto, a presença dos saltos dinâmicos introduz mudanças bruscas ao sistema podendo ocasionar reações indesejáveis no sistema primário.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achenbach, M. (1989). *A model for an alloy with shape memory*. Int. Journal of Plasticity, v.5, n.4, pp. 371-395.
- Baêta Neves, A. P., Savi, M. A., & Pacheco, P. (2004). *On the Fremonds constitutive model for shape memory alloy*. Mechanics Research Communications, v.31, n.6, pp. 677-688.
- Bernadini, D., Rega, G. (2005). *Thermomechanical modelling, nonlinear dynamics and chaos in shape memory oscillators*. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, v.11, n.3, pp. 291-314.
- Da Silva, E. P. (2003). *Aplicação de Ligas com Memória de Forma em Estruturas adaptativas*. Anais do DINCON 2003 Série Arquimedes, v. 2, pp. 2358-2387.
- De Paula, A. S. (2005). *Projeto de Fim de Curso: Caos em sistemas mecânicos*. Escola Politécnica, UFRJ.
- Falk, F. (1980). *Model Free-Energy, Mechanics and Thermodynamics of Shape Memory Alloys*. ACTA Metallurgica, v. 28, n. 12, pp.1773-1780.
- Fremond, M. (1987). *Matériaux à Mémoire de Forme*. C.R. Acad. Sc. Paris, Tome 304, pp. 239-244.
- Inman, D. J. (1994). *Engineering Vibration*. New Jersey: Prentice Hall.
- Lagoudas, D. (2008). *Shape Memory Alloy*. Texas: Springer.
- Li, H., & Qian, H. (2010). *Seismic vibration control of structures using superelastic shape memory alloy*. Sciyo.
- Machado, L. G., & Savi, M. A. (2002). *Aplicações Odontológicas das Ligas com Memória de Forma*. Revista Brasileira de Odontologia, v. 59, n.5, pp. 302-306.
- Machado, L. G., & Savi, M. A. (2003). *Medical Applications of Shape Memory Alloy*. Brazilian Journal of Medical and Biological Research, v.36, n.6, pp. 683-691.
- Meirovitch, L. (2001). *Fundamentals of Vibrations*. USA: Mc Graw Hill.
- Miyazaki, S., Fu, Y. Q., & Wei, M. H. (2009). *Thin film shape memory alloys*. Cambridge University Press.
- Moon, F. C. (1992). *Chaotic and Fractals Dynamics*. New York: John Wiley and Sons.
- Müller, I., & Wilmanski, K. (1980). *A model for phase transition in pseudoelastic bodies. II*. Nuevo Cimento, v. 57B, n. 2, pp. 283-318.
- Oberaigner, E. R., Fischer, F. D., & Tanaka, K. (2002). *On the optimal damping of a vibration shape memory alloy rod*. Journal of Engineering Materials Technology. v.124, n. 2, pp. 97-102.

- Ölander, J. (1932). *J. Amer. Chem. Soc.*, pp. 54:3819.
- Oliveira, H. S., De Paula, A. S., & Savi, M. S. (2012). *Dynamical Jumps in a Shape Memory Alloy Oscillator*. CONEM 2012 - VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.
- Oliveira, H. S., De Paula, A. S., & Savi, M. S. (2013). *Investigation of the Dynamical Response of a Shape Memory Alloy Oscillator*. ICEDyn 2013 International Conference on Structural Engineering Dynamics, Sesimbra.
- Otani, M., & Jones, A. J. (1997). *Guiding chaotic orbits*.
- Otsuka, K., & Wayman, C. M. (1998). *Shape Memory Alloy*. Cambridge University Press.
- Paiva, A., Savi, M. A., Braga, A. M., & Pacheco, P. M. (2005). *A constitutive model for shape memory alloys considering tensile-compressive asymmetry and plasticity*. *International Journal of Solids and Structures*, v. 42, n.11-12, pp. 3439-3457.
- Savi, M. A. (2003). *Apostila: Dinâmica Não Linear e Caos*. UFRJ. Rio de Janeiro.
- Savi, M. A. (2006). *Dinâmica não linear e caos*. Rio de Janeiro: e-papers.
- 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, p. 637-647.
- Savi, M. A., & Paiva, A. (2006). *An overview on constitutive models for shape memory alloys*. *Mathematical Problems in Engineering*, ID 56876, pp.1-30.
- 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*, v. 42, I. 11-12, pp. 3439-3457.
- Savi, M. A., De Paula, A. S., & Lagoudas, D. (2011). *Numerical Investigation of an Adaptive Vibration Absorber Using Shape memory Alloys*. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. V.22, pp. 67-80.
- Savi, M. A., Paiva, A., Pacheco, P. M., & Baeta Neves, A. P. (2002). *Phenomenological modeling and numerical simulation of shape memory alloys: A thermo-plastic-phase transformation coupled model*. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 13, pp. 261-273.
- Savi, M. A., Sá, M. A., Paiva, A., & Pacheco, P. (2006). *Tensile-compressive asymmetry influence on shape memory alloy system dynamics*. *Chaos Solutions and Fractals*, v. 36, n.4, pp. 828-842.
- Silva, C. A. (2000). (2000). *Vibration: Fundamentals and Practice*. Vancouver, Canada: CRC Press. Vancouver, Canada: CRC Press.

- Sitnikova, E., Pavlovskaia, E., Wiercigroch, M., & Savi, M. A. (2009). *Vibration reduction of the impact system by an SMA restrain: Numerical Studies*. International Journal of Nonlinear Mechanics, v.45, n. 9, pp. 837-849.
- Tiseo, B., Concilio, A., Ameduri, S., & Gianvito, A. (2010). *A shape memory alloys based tunable dynamic vibration absorber for vibration tonal control*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, v. 48, n.1, pp.135-153.
- Uehara, T. (2010). *Molecular Dynamics of Shape Memory Behavior*. Sciyo.
- van Humbeeck, J. (2003). *Damping capacity of thermoelastic martensite in shape memory alloys*. Journal of Alloys and Compounds, v.355, n. 1-2 pp. 58-64.
- Xu, P., & Morris, J. W. (1993). *Computer simulation of martensitic transformations in constrained, two-dimensional crystals under external stress*. Metallurgical Transactions, v. 24, pp. 1281-1294.