

INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DE ABSORVEDORES DINÂMICOS DE VIBRAÇÕES EMPREGANDO LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Wellington Luziano Paulo Júnior, wellingtonlpaulo@gmail.com
Thiago de Paula Sales, tpsales@mestrado.ufu.br
Domingos Alves Rade, domingos@ufu.br

Resumo: No contexto dos chamados materiais inteligentes, as ligas com memória de forma (Shape Memory Alloys – SMA) vêm sendo intensivamente investigadas com vistas a aplicações em diversos tipos de sistemas de engenharia e em problemas interdisciplinares. Especificamente, as SMA têm sido utilizadas para a mitigação de vibrações mecânicas, graças ao chamado efeito pseudoelástico, responsável pela ocorrência de histerese. Outra característica relevante desses materiais é a coexistência de duas fases cristalográficas (martensita e austenita), com propriedades mecânicas distintas, cujas frações relativas dependem da temperatura. No presente trabalho, esta última característica é explorada em associação com uma estratégia alternativa de controle passivo de vibrações, baseada nos chamados absorvedores dinâmicos de vibrações sintonizáveis (ADV), que são dispositivos conectados à estrutura vibratória, cuja rigidez e/ou inércia e/ou amortecimento podem ser ajustados em conformidade com a frequência de excitação, de modo que a vibração da estrutura no ponto de conexão seja atenuada. Especificamente, explora-se a possibilidade de confecção de ADVs sintonizáveis cuja rigidez pode ser ajustada por meio de variações controladas da fração relativa martensita/austenita induzidas por alterações da temperatura. Por meio de simulações numéricas, que incluem a integração das equações do movimento, evidencia-se a possibilidade de sintonizar um ADV aplicado a um sistema vibratório de um grau de liberdade, dentro uma dada faixa de valores de frequência, e quantificam-se as reduções de amplitudes obtidas.

Palavras-chave: ligas com memória de forma, absorvedores dinâmicos de vibrações, materiais inteligentes, controle de vibrações

1. INTRODUÇÃO

Ligas com memória de forma (Shape Memory Alloys – SMA) são ligas metálicas que apresentam propriedades únicas de recuperação de grandes deformações (da ordem de 6 a 8%) sob efeito da temperatura. Assim como qualquer liga metálica, possuem diferentes fases cristalográficas que ocorrem a diferentes temperaturas. As duas fases presentes nas SMA são a martensita (estável a baixas temperaturas) e a austenita (estável a altas temperaturas). Transformações de fase também podem ser induzidas pela aplicação de cargas externas, por meio de um processo não difusivo (Lagoudas, 2008).

A martensita pode ser encontrada na forma maclada e não maclada, sendo a primeira decorrente do resfriamento do material sem a presença de carregamento, resultando uma estrutura cristalina autoacomodada. A martensita não maclada, por sua vez, ocorre somente na presença de carregamento, levando assim a uma direção preferencial da estrutura cristalina. As transformações entre as fases de martensita e de austenita produzem comportamento termomecânico que pode ser caracterizado por dois efeitos principais: o efeito memória de forma e a pseudoelasticidade. Tais efeitos são explorados em diversas aplicações de engenharia (Mabe, 2008; Kuang e Ou, 2008).

Uma das aplicações mais frequentemente observadas na literatura é o controle de vibrações mecânicas. Neste contexto, as SMA foram empregadas em diversos trabalhos, como no absorvedor dinâmico de vibrações adaptativo desenvolvido por Rustighi et al. (2003), no sistema de controle ativo realizado por Suzuki e Kagawa (2010) e nos trabalhos de De Paula e Savi (2008) e Savi et al. (2009).

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Os principais efeitos que os materiais com memória de forma podem sofrer são o efeito memória de forma e o efeito pseudoelástico. O primeiro é ilustrado na Fig. (1), onde é possível verificar que, aplicando carregamento em uma estrutura composta de martensita maclada (ponto B), o material ultrapassa as tensões de alinhamento das variantes martensíticas (σ_s e σ_f) e se transforma em martensita não maclada (ponto C). Verifica-se que no ponto E, quando a carga é retirada, existe uma deformação residual. A transformação da martensita não maclada em austenita é observada a partir do aquecimento do material, recuperando completamente a deformação sofrida pelo mesmo (ponto A) após

passar das temperaturas de início e fim de formação de austenita (A_s e A_f). Após o resfriamento do material, ele retorna a sua configuração inicial (ponto B) de martensita maclada depois de passar pelas temperaturas de início e fim de formação de martensita (M_s e M_f , não mostradas na figura).

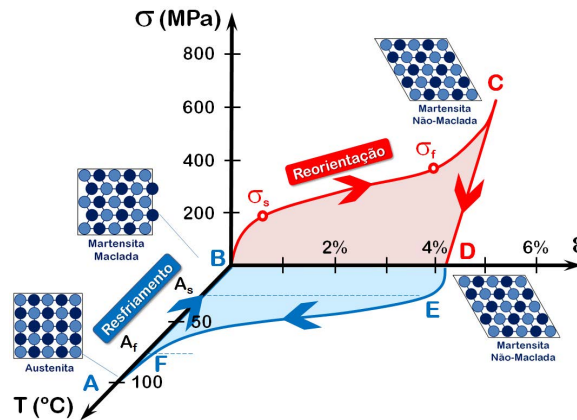


Figura 1. Gráfico representando o efeito memória de forma de uma liga de NiTi (adaptado de Lagoudas, 2008).

O efeito pseudoelástico, por sua vez, é uma transformação induzida pelo carregamento e posterior descarregamento do material, gerando grande deformação e recuperação quando este se encontra numa temperatura na qual a única fase presente é a austenita. Na Figura (2) verifica-se que o material ultrapassa as tensões de formação de martensita quando carregado (σ_{Ms} e σ_{Mf}). Quando ocorre o descarregamento, o material retorna passando pelas tensões de formação de austenita (σ_{As} e σ_{Af}) e recupera completamente a deformação inicialmente sofrida. Verifica-se que o material exibe um comportamento histerético, este associado à dissipação de energia vibratória; por este motivo, as SMA têm sido utilizadas com o propósito de controle passivo de vibrações.

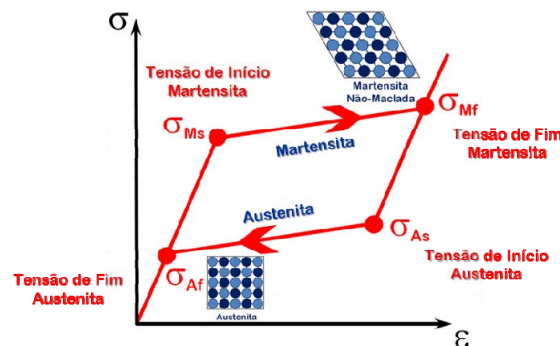


Figura 2. Curvas tensão-deformação representando o efeito pseudoelástico (adaptado de Lagoudas, 2008).

2.1. Modelagem Constitutiva de Materiais com Memória de Forma

Diversos são os modelos desenvolvidos para representar o comportamento dos materiais com memória de forma. Citam-se aqui os modelos de Brinson (1993), Liang e Rogers (1990), Tanaka (1986), Paiva et al. (2005) e o modelo polinomial de Lagoudas (2008), que utilizam potenciais termodinâmicos para obter suas equações constitutivas.

Modelos mais simples baseados no diagrama de fase como o de Aurichio e Sacco (1997) e o modelo simplificado de Lagoudas, Mayes e Khan (2001) fazem uso de poucos parâmetros no seu equacionamento e estão associados a um baixo custo computacional; contudo, não conseguem representar completamente uma SMA e todos seus efeitos.

O modelo unidimensional de Bekker e Brinson (1998), adotado no desenvolvimento do presente estudo, é baseado nos trabalhos de Tanaka (1986) e Liang e Rogers (1990), porém seu equacionamento é mais simples que seus antecessores e os parâmetros utilizados neste modelo são facilmente encontrados na literatura. A lei constitutiva deste modelo é baseada na energia livre de Helmholtz e dada por:

$$\sigma = E(\xi)(\varepsilon - \varepsilon_L \xi_o) + \Theta(T - T_0), \quad (1)$$

onde σ é a tensão, $E(\xi)$ é o módulo de elasticidade que é função da fração martensítica ξ , ε é a deformação, ε_L é a deformação residual máxima de uma dada SMA, Θ é o coeficiente de expansão térmica, T é a temperatura atual, e T_0 é a temperatura de referência, para a qual não existe deformação devida a gradiente térmico.

É importante notar que o modelo considerado apresenta uma distinção entre a fração de martensita maclada ξ_i , que é induzida pela temperatura, e não está associada à deformação macroscópica e fração de martensita não maclada ξ_o , que é induzida pelo carregamento, e possui estrutura cristalográfica orientada em uma direção preferencial. A fração martensítica total resulta como a soma dessas duas parcelas, isto é, $\xi = \xi_i + \xi_o$.

O módulo de elasticidade é função da fração de martensita, uma vez que pode haver uma mistura sólida de martensita e austenita em determinados momentos. Este módulo é dado por:

$$E(\xi) = \xi E_M + (1 - \xi) E_A, \quad (2)$$

onde E_A e E_M são os módulos de elasticidade da austenita e martensita pura, respectivamente. A componente da dilatação térmica é desconsiderada da Eq. (1), pois esta dilatação é desprezível quando comparada com a deformação decorrente de transformação de fase (Bekker e Brinson, 1997). Assim a lei constitutiva é reescrita para resultar em:

$$\sigma = [\xi E_M + (1 - \xi) E_A] (\varepsilon - \varepsilon_L \xi_o). \quad (3)$$

O diagrama de fase que descreve o comportamento da SMA e suas transformações de fase é mostrado na Fig. (3).

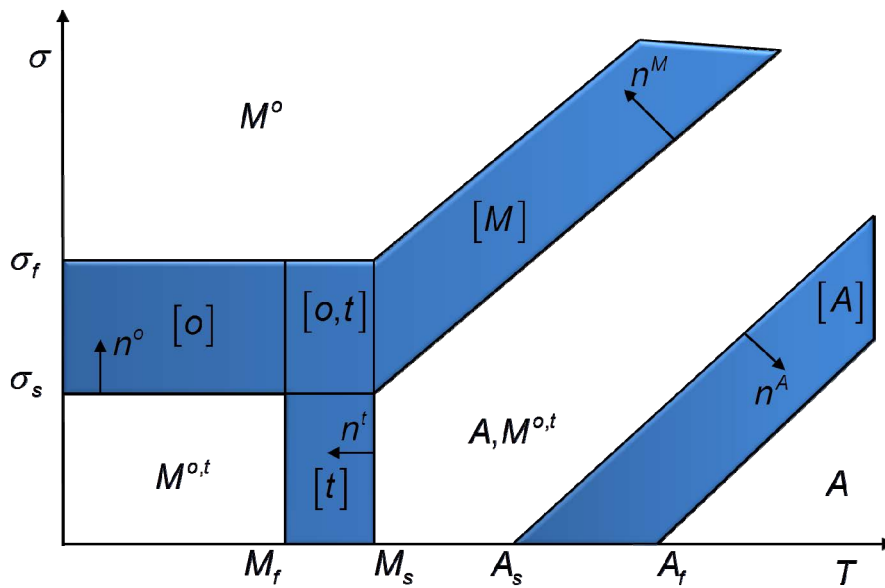


Figura 3. Diagrama de fase para SMA (adaptado de Gao et al., 2007).

No diagrama de fase ilustrado na Fig. (3), as regiões destacadas em azul são chamadas de zonas de transformação, pois são onde ocorrem as transformações de fase, enquanto que as regiões não destacadas (em branco) são chamadas de *dead zones*. As regiões de transformação são as seguintes: $[A]$ é a região onde ocorre a transformação de martensita para austenita; em $[t]$ ocorre a transformação de austenita para martensita maclada; $[M]$ é a região onde ocorre a transformação de martensita maclada e/ou austenita para martensita não maclada ou orientada; e $[o]$ é onde ocorre a transformação de martensita maclada em não maclada. Ainda existe a região de *overlapping* $[o,t]$, onde podem ocorrer as transformações que sucedem em $[o]$ e em $[t]$, até certo ponto, simultaneamente.

Nas regiões de transformação, a fração martensítica só é alterada se o caminho associado ao carregamento termomecânico possuir uma componente positiva na direção do vetor que caracteriza determinada transformação; este último é representado por $\mathbf{n}^i$, com $i = [M], [A], [o], [t]$. Outro aspecto importante do modelo considerado neste trabalho são os chamados pontos de transição, ou *switching points*, que são aqueles em que a transformação é interrompida e reiniciada dentro das regiões de transformação; destaca-se que os pontos nas fronteiras de uma região de transformação, sejam eles de entrada ou de saída, também são considerados como de transição. Na formulação matemática, somente o último ponto de transição necessita ser armazenado, e isso possibilita melhorar o desempenho do código computacional associado ao modelo.

A evolução da fração martensítica nas transformações direta e inversa pode ser escrita conforme as seguintes equações:

$$\xi = \xi_j f^{[A]}(Z^{[A]}); \quad (4)$$

$$\xi = \xi_j (1 - \xi_j) f^{[M]}(Z^{[M]}), \quad (5)$$

onde o subscrito j representa o último ponto de transição, e $f^{[A]}$ e $f^{[M]}$ são as funções de transformação que variam entre zero e um. Diversas funções são utilizadas pelos diversos modelos constitutivos existentes; o modelo considerado utiliza a função cosseno devido a sua simplicidade de integração e diferenciação. Z^i é a razão de distância na zona i com relação ao último ponto de transição j , sendo expressa por:

$$Z^i(T, \sigma) = (\rho^i - \rho_j^i) / (\rho_0^i - \rho_j^i), \quad i = [M], [A], [O], [t], \quad (6)$$

onde ρ^i é a distância do ponto atual ao ponto de entrada na fronteira da zona de transformação i , ρ_j^i é a distância entre o último *switching point* à fronteira da região de transformação, e ρ_0^i é o comprimento da zona de transformação. A Fig. (4) apresenta esses parâmetros, onde D é o ponto atual, C é o último ponto de transição (onde se inicia a transformação) e A e E são os pontos de entrada e saída da zona de transformação respectivamente.

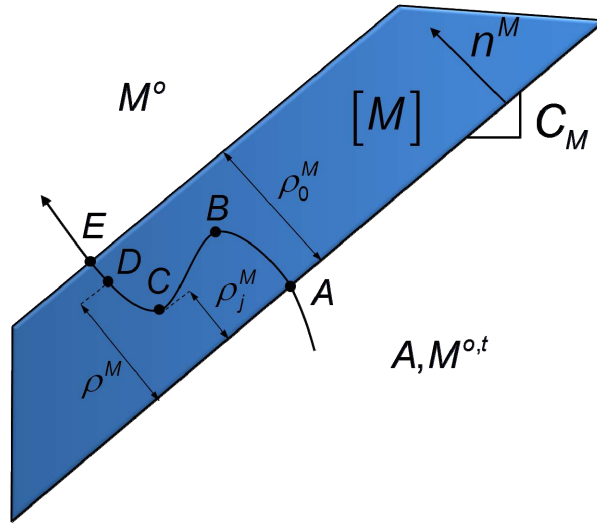


Figura 4. Zona de transformação $[M]$ (adaptado de Gao et al., 2007).

As distâncias ρ^i , ρ_j^i e ρ_0^i podem ser calculadas a partir de:

$$\rho^i = n_1^i (T - T_{in}^i) + n_2^i (\sigma - \sigma_{in}^i); \quad (7)$$

$$\rho_j^i = n_1^i (T_j - T_{in}^i) + n_2^i (\sigma_j - \sigma_{in}^i); \quad (8)$$

$$\rho_0^i = n_1^i (T_{out}^i - T_{in}^i) + n_2^i (\sigma_{out}^i - \sigma_{in}^i), \quad (9)$$

onde (n_1^i, n_2^i) são as componentes do vetor $\mathbf{n}^i$, $(T_{in}^i, \sigma_{in}^i)$ é o ponto de entrada na zona de transformação i , $(T_{out}^i, \sigma_{out}^i)$ é o ponto de saída desta mesma zona de transformação, e (T_j^i, σ_j^i) é o último *switching point* computado. Os valores adotados para cada uma dessas variáveis são fornecidos na Tab. (1).

Tabela 1. Pontos de entrada, saída e direções normais para cada região de transformação.

Região	$(T_{in}^i, \sigma_{in}^i)$	(n_1^i, n_2^i)	$(T_{out}^i, \sigma_{out}^i)$
[A]	$(A_s, 0)$	$(C_A, -1) \times 1/\sqrt{1+C_A^2}$	$(A_f, 0)$
[t]	$(M_s, 0)$	$(-1, 0)$	$(M_f, 0)$
[M]	(M_s, σ_s)	$(C_M, 1) \times 1/\sqrt{1+C_M^2}$	(M_s, σ_f)
[o]	(M_s, σ_s)	$(C_d, 1) \times 1/\sqrt{1+C_d^2}$	(M_s, σ_f)

onde C_M , C_A e C_d são coeficientes de influência tensão-temperatura para as regiões de transformação martensítica, austenítica e da região de transformação de martensita maclada para não maclada respectivamente. A partir das equações apresentadas é possível obter as seguintes expressões para as frações martensíticas acomodada e orientada para cada uma das regiões de transformação:

$$\xi_t^{[A]} = \xi_t^{swi} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(\pi Z^{[A]}) \right]; \quad (10)$$

$$\xi_o^{[A]} = \xi_o^{swi} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(\pi Z^{[A]}) \right]; \quad (11)$$

$$\xi_t^{[t]} = 1 - \xi_o^{swi} - (1 - \xi_o^{swi} - \xi_t^{swi}) \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(\pi Z^{[t]}) \right]; \quad (12)$$

$$\xi_o^{[t]} = \xi_o^{swi}; \quad (13)$$

$$\xi_t^{[M]} = \xi_t^{swi} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(\pi Z^{[M]}) \right]; \quad (14)$$

$$\xi_o^{[M]} = \xi_o^{swi} + (1 - \xi_o^{swi}) \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(\pi Z^{[M]}) \right]; \quad (15)$$

$$\xi_t^{[o]} = \xi_t^{swi} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(\pi Z^{[o]}) \right]; \quad (16)$$

$$\xi_o^{[o]} = \xi_o^{swi} + (1 - \xi_o^{swi}) \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(\pi Z^{[o]}) \right]. \quad (17)$$

Para que ocorra transformação na região de *overlapping*, é necessário que o vetor tangente ao caminho descrito pelo carregamento termomecânico apresente componentes positivas em ambas as direções de transformação [o] e [t]. Neste caso as evoluções das frações martensíticas maclada e não maclada são dadas por:

$$\xi_t^{[o,t]} = \left\{ 1 - \xi_o^{swi} - (1 - \xi_o^{swi} - \xi_t^{swi}) \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(\pi Z^{[t]}) \right] \right\} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(\pi Z^{[o]}) \right]; \quad (18)$$

$$\xi_o^{[o,t]} = \xi_o^{swi} + (1 - \xi_o^{swi}) \left\{ 1 - \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(\pi Z^{[o]}) \right] \right\}. \quad (19)$$

3. MODELAGEM DE SISTEMAS DE UM GRAU DE LIBERDADE COM ADV ACOPLADO POR MEIO DE UM ELEMENTO COM MEMÓRIA DE FORMA

O sistema vibratório estudado no presente trabalho está representado na Fig. (5) e pode ser tratado como um sistema de um grau de liberdade (sistema primário) e um absorvedor dinâmico de vibrações (ADV) a ele acoplado. O sistema primário é composto pela massa M_1 e a rigidez k_1 , enquanto que o ADV possui massa M_2 , coeficiente de amortecimento c_2 e rigidez de uma barra de SMA k_{sma} .

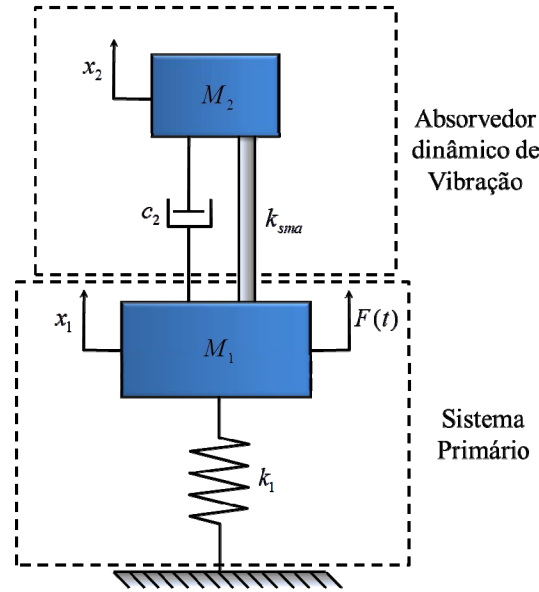


Figura 5. Sistema de um grau de liberdade com ADV acoplado.

Considerando a aplicação da excitação externa $F(t)$ no sistema primário, é possível encontrar as seguintes equações do movimento do sistema:

$$\begin{cases} M_1 \ddot{x}_1 + K_1 x_1 - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - F_{sma} - F(t) = 0 \\ M_2 \ddot{x}_2 + F_{sma} + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = 0, \end{cases} \quad (20)$$

onde $F_{sma} = \sigma A_{sma}$ é a força oriunda dos carregamentos internos que se mostram presentes na barra de SMA. Ainda, tem-se a equação que define o equilíbrio térmico do sistema, assumida como:

$$T/f_T(t) - 1 = 0. \quad (21)$$

Para integração numérica das equações não lineares do movimento, a linearização local das mesmas deve ser conduzida. Resulta deste modo, a necessidade do cálculo de coeficientes tangentes (matriz Jacobiana) associados ao resíduo vinculado ao sistema de equações do movimento. Como mostrado por Gao et. al (2007), tem-se que:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = HE(\xi) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}, \quad (22)$$

onde, para as regiões $[A]$, $[t]$, $[M]$ e $[o]$:

$$H^i = (1 - H_1^i H_2^i)^{-1}, \quad i = [A], [t], [M], [o]; \quad (23)$$

$$H_1^i = -\frac{1}{2} \pi n_2^i \sin(\pi Z^i) \left[n_1^i (T_{out}^i - T_j) + n_2^i (\sigma_{out}^i - \sigma_j) \right]^{-1}, \quad i = [A], [t], [M], [o]; \quad (24)$$

$$H_2^i = (\varepsilon - \varepsilon_L \xi_o)(E_M - E_A) C_1^i - \varepsilon_L E(\xi) C_{1s}^i, \quad i = [A], [t], [M], [o]. \quad (25)$$

As constantes C_1^i e C_{1s}^i podem ser encontradas em Gao et. al (2007) e por isso são omitidas neste trabalho. Na região de *overlapping*, as equações são definidas como:

$$H = (1 - H_1^{[t]} H_2 - H_1^{[o]} H_3)^{-1}; \quad (26)$$

$$H_2 = (\varepsilon - \varepsilon_L \xi_o)(E_M - E_A) C_{1mix}^{[t]} - \varepsilon_L E(\xi) C_{1smix}^{[t]}; \quad (27)$$

$$H_3 = (\varepsilon - \varepsilon_L \xi_o)(E_M - E_A)C_{1mix}^{[o]} - \varepsilon_L E(\xi)C_{1smix}^{[o]}, \quad (28)$$

onde $H_1^{[t]}$ e $H_1^{[o]}$ podem ser obtidos das Eqs. (24) e (25); expressões para as constantes $C_{1mix}^{[o]}$, $C_{1mix}^{[t]}$, $C_{1smix}^{[o]}$ e $C_{1smix}^{[t]}$ também são omitidas neste trabalho. Outra derivada necessária à integração numérica das equações do movimento é a da tensão com relação à temperatura; nas regiões $[A]$, $[t]$, $[M]$ e $[o]$, esta é dada por:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial T} = H^i H_2^i (H_1^i)^*, \quad (29)$$

onde os valores de H^i e H_2^i já foram definidos nas Eqs. (23) e (25). O termo $(H_1^i)^*$ é dado por:

$$(H_1^i)^* = -\frac{1}{2} \pi n_1^i \text{sen}(\pi Z^i) \left[n_1^i (T_{out}^i - T_j) + n_2^i (\sigma_{out}^i - \sigma_j) \right]^{-1}, \quad i = [A], [t], [M], [o]. \quad (30)$$

Para a região de *overlapping*, a derivada da tensão com relação à temperatura é definida como:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial T} = H^i \left[H_2^i (H_1^{[t]})^* + H_3^i (H_1^{[o]})^* \right], \quad (31)$$

onde os valores de H^i , H_2^i e H_3^i já foram definidos nas Eqs. (26), (27) e (28) respectivamente. As expressões para $(H_1^{[t]})^*$ e $(H_1^{[o]})^*$ são dadas por:

$$(H_1^{[t]})^* = -\frac{1}{2} \pi n_1^{[t]} \text{sen}(\pi Z^{[t]}) \left[n_1^{[t]} (T_{out}^{[t]} - T_j) + n_2^{[t]} (\sigma_{out}^{[t]} - \sigma_j) \right]^{-1}; \quad (32)$$

$$(H_1^{[o]})^* = -\frac{1}{2} \pi n_1^{[o]} \text{sen}(\pi Z^{[o]}) \left[n_1^{[o]} (T_{out}^{[o]} - T_j) + n_2^{[o]} (\sigma_{out}^{[o]} - \sigma_j) \right]^{-1}. \quad (33)$$

4. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Foi implementado um algoritmo em ambiente MATLAB[®] utilizando as equações definidas neste trabalho utilizando o método de Newmark para integração temporal. Os parâmetros escolhidos para o sistema foram tais que a frequência natural do sistema primário pode ser ajustada para ser igual àquela do ADV quando o estado termomecânico da SMA encontra-se na região de transformação austenítica. Em outras palavras, para que o ADV seja sintonizado, a rigidez do elemento de SMA deve ter um valor intermediário entre a rigidez da martensita e da austenita puras. Os parâmetros utilizados nesta simulação são fornecidos na Tab. (2).

Tabela 1. Parâmetros do sistema vibratório e da SMA.

Parâmetro	Valor	Parâmetro do material	Valor
M_1	10 kg	C_M	7 MPa/K
M_2	0,2 kg	C_A	7 MPa/K
k_1	1×10^7 N/m	C_d	0 MPa/K
A_{sma}	0,8 mm ²	(A_s, A_f)	(296,315) K
c_2	20 N.s/m	(M_s, M_f)	(292,274) K
$F(t)$	$10 \text{sen}(\omega t)$ N	ε_L	0,05
ω	1000 rad/s	E_A	70 GPa
L	0,2 m	E_M	30 GPa

A força de excitação é uma força harmônica de frequência igual à frequência natural do sistema primário, ou seja, o sistema primário está em ressonância; para que o ADV funcione eficientemente seus parâmetros de massa e rigidez devem ser tais que sua frequência natural seja a mesma do sistema primário.

Para alterar a frequência natural do ADV e, conseqüentemente, sintonizá-lo à frequência de excitação, busca-se o ajuste de sua rigidez mantendo-se a sua massa constante. A rigidez de uma barra de SMA pode ser calculada da seguinte forma:

$$k_{sma} = E(\xi) A_{sma} / L \quad (34)$$

onde L é o comprimento da barra, $E(\xi)$ é o módulo de elasticidade e A_{sma} é a área da sua seção transversal. Neste caso, com o aquecimento da barra, uma transformação de fase será induzida alterando assim a fração martensítica ξ para um valor entre zero e um; neste caso, o valor da fração martensítica que sintoniza o ADV é 0,5. Para martensita pura e austenita pura as frequências naturais do ADV são iguais a 774,59 e 1183,21 rad/s respectivamente.

O processo de aquecimento do fio é descrito na Fig. (6), onde se verifica que o ponto A está em uma temperatura entre M_s e A_s , para que a fração martensítica alcançada no ponto B se mantenha. O aquecimento é realizado antes do processo de carregamento do material, para que o ADV esteja sintonizado desde o começo da simulação.

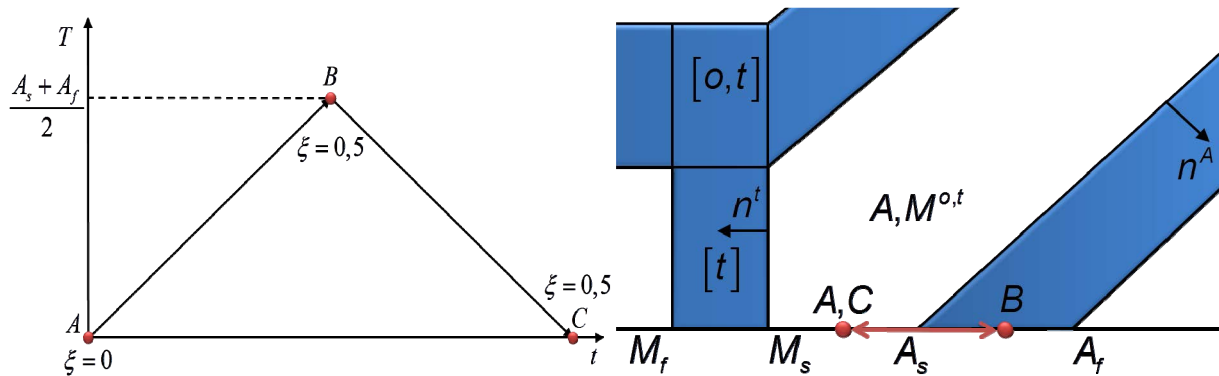


Figura 6. Transformação de fase induzida pela temperatura.

Os resultados obtidos para essa simulação são mostrados na Fig. (7), onde são comparados os deslocamentos do sistema primário sem a presença do ADV, os deslocamentos do sistema primário com a presença do ADV sintonizado e os deslocamentos do ADV.

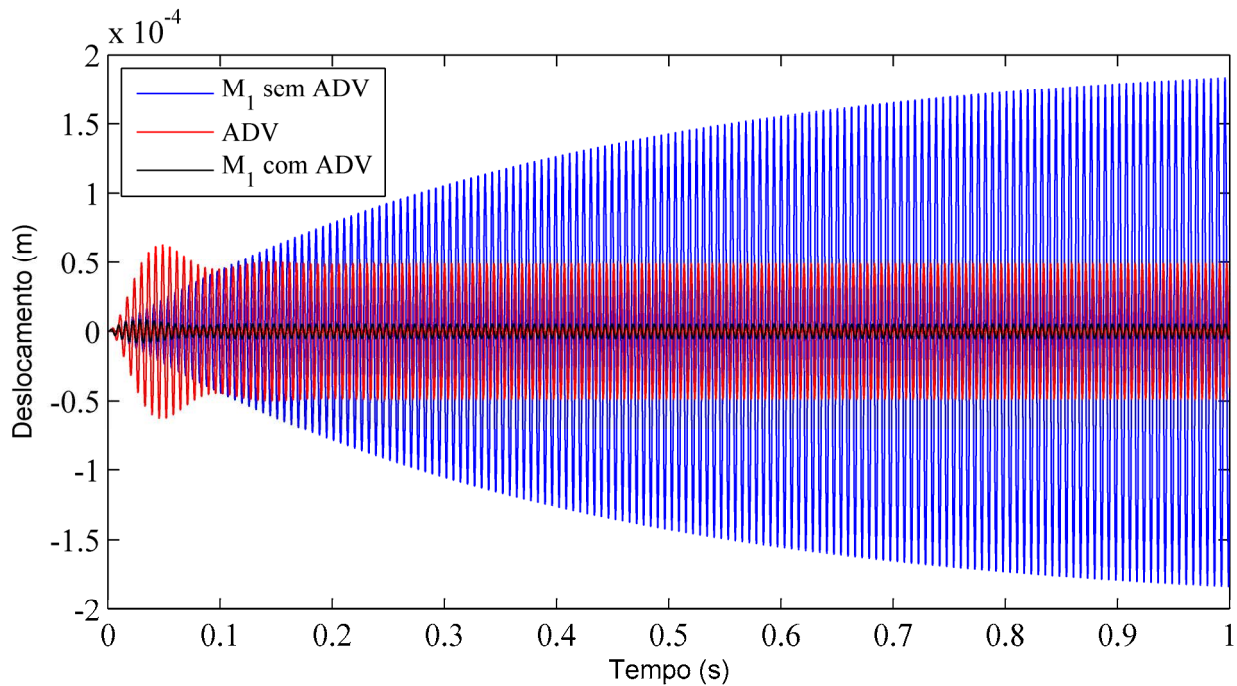


Figura 7. Comparação entre os deslocamentos obtidos sem e com a presença do ADV sintonizado.

Verifica-se na Fig. (7), que a amplitude de vibração do sistema primário quando na presença do ADV diminui em mais de uma ordem de grandeza quando comparado com a amplitude de vibração do sistema sem o ADV.

5. CONCLUSÕES

Foi sugerida, e verificada por meio de simulações numéricas, a possibilidade de se sintonizar um absorvedor dinâmico de vibrações cujo elemento resiliente é constituído de material com memória de forma. No presente trabalho, busca-se a sintonização do ADV por meio da obtenção de uma fração de martensita que conduz a um determinado valor do módulo de elasticidade do material com memória de forma que, por sua vez, determina o valor da rigidez do elemento resiliente. Tal processo é conduzido por meio de um carregamento térmico previamente determinado. As simulações numéricas no domínio do tempo permitiram avaliar os graus de redução de amplitudes de vibração obtidos para um sistema específico.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelo suporte financeiro concedido na forma de bolsas de mestrado e ao INCT de Estruturas Inteligentes em Engenharia, no âmbito do qual o trabalho de pesquisa foi realizado.

7. REFERÊNCIAS

- AURICCHIO, F.; SACCO, E., “A One-Dimensional Model for Superelastic Shape Memory Alloys with Different Elastic Properties Between Austenite and Martensite”, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 1997, Vol. 32, No. 6, pp. 1101-1114.
- BEKKER, A.; BRINSON, L. C., “Phase Diagram Based Description of the Hysteresis Behavior of Shape Memory Alloys”, *Acta mater*, 1998, Vol. 46, No. 10, pp. 3649-3665.
- BRINSON, L. C., “One-Dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys: Thermomechanical Derivation with Non-Constant Material Functions and Redefined Martensite Internal Variable”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1993, 4, pp. 229-242.
- DE PAULA, A. S.; SAVI, M. A., “Análise de um Absorvedor de Vibrações Não-Lineares Utilizando Elementos com Memória de Forma”, *V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2008)*, 2008.
- GAO, X.; QIAO, R.; BRINSON, L. C., “Phase Diagram Kinetics for Shape Memory Alloys: A Robust Finite Element Implementation”, *Smart Mater. Struct.*, 2007, 16, pp. 2102-2115.
- KUANG, Y.; OU, J., “Self-Repairing Performance of Concrete Beams Strengthened Using Superelastic SMA Wires in Combination with Adhesives Released from Hollow Fibers”, *Smart Mater. Struct.*, 2008, 17.
- LAGOUDAS, D. C. (ed), “Shape Memory Alloys. Modelling and Engineering Applications”, Springer, 2008.
- LAGOUDAS, D. C.; MAYES, J. J.; KHAN, M. M., “Simplified Shape Memory Alloy (SMA) Material Model for Vibration Isolation, SPIE Conference of Modelling, Signal and Control in Smart Structures, 2001.
- LEO, D. J., “Engineering Analysis of Smart Material Systems”, John Wiley & Sons, 2007.
- LIANG, C.; ROGERS, C. A., “One-Dimensional Thermomechanical Constitutive Relations for Shape Memory Materials”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1990, 1, pp. 207-234.
- MABE, J., “Variable Area Jet Nozzle for Noise Reduction Using Shape Memory Alloy Actuators”, *The Journal of The Acoustical Society of America*, 2008, Vol. 123, No. 5, pp. 3871.
- PAIVA, A.; SAVI, M. A.; BRAGA, A. M. B.; PACHECO, P. M. C. L., “A Constitutive Model for Shape Memory Alloys Considering Tensile-Compressive Asymmetry and Plasticity”, *International Journal of Solids and Structures*, 2005, 42, Vol. (11-12), pp. 3439-3457.
- RUSTIGHI, E.; BRENNAN, M. J.; MACE, B. R., “Design of an Adaptive Vibration Absorber Using Shape Memory Alloy”, *ISVR Technical Memorandum*, No. 920, 2003.
- SAVI, M. A.; DE PAULA, A. S.; LAGOUDAS, D., “Vibration Reduction Using an Adaptive-Passive Shape Memory Alloy Absorber”, *20th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2009)*, 2009.
- SUZUKI, Y.; KAGAWA, Y., “Active Vibration Control of a Flexible Cantilever Beam Using Shape Memory Alloy Actuators”, *Smart Mater. Struct.* 19, 2010.
- TANAKA, K., “A Thermomechanical Sketch of Shape Memory Effect: One-Dimensional Tensile Behavior”, *Res. Mechanica*, 18, pp. 251-263, 1986.