

## **MINI MOLAS SUPERELÁSTICAS COMERCIAIS DE LIGAS NI-TI COM MEMÓRIA DE FORMA: COMPORTAMENTO DINÂMICO**

Kleberton R. A. Barboza<sup>1\*</sup>, Carlos José de Araújo<sup>2</sup>, Abdias Gomes dos Santos<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Mestrando em Ciências e Engenharia de Materiais, Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais, UFCG, Campina Grande, PB. \*Autor para correspondência.

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Professor. Doutor Carlos José de Araújo, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande, PB.

<sup>3</sup> Mestrando em Engenharia Mecânica, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFPE, Recife, PE.

Rua Manoel Leonardo Gomes, 351 – Jardim Paulistano. Campina Grande, PB. CEP: 38415-320. E-mail: k.rostand@gmail.com

### **RESUMO**

As Ligas com Memória de Forma (LMF) são classificadas como materiais ativos ou inteligentes por possuírem capacidade de interagir com o meio no qual estão inseridas por meio de variações de temperatura. Esse grupo de materiais ativos possuem capacidade de funcionar como sensores e/ou atuadores, que reagem com mudanças de temperatura ou estímulos elétricos (Efeito Joule). As LMF possuem a capacidade de recuperarem-se após carregamento mecânico seguido do alívio da deformação aplicada, quando em sua temperatura mais alta, correspondente a fase chamada de austenita (efeito é conhecido como superelasticidade). Buscou-se nesse trabalho um melhor conhecimento de micro molas ortodônticas comerciais de uma LMF composta por Ni-Ti, caracterizando-as estática e dinamicamente. Utilizaram-se duas técnicas de análise térmica: calorimetria exploratória diferencial (DSC) e análise dinâmico-mecânica (DMA). Verificou-se o aumento da rigidez das micro-molas com a variação da temperatura do meio e de sua frequência de excitação, além de prováveis frequências naturais.

**Palavras-chave:** Ligas com Memória de Forma, Micro-Molas, Análise Dinâmica.

## 1 INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas, grandes esforços têm sido feitos para o desenvolvimento da engenharia. Materiais ditos inteligentes têm ganhado cada vez mais espaço em pesquisas de desenvolvimento tecnológico e industrial. Esses materiais são conhecidos por apresentarem capacidade de trabalhar como sensores e atuadores (4). O fenômeno de memória de forma está intimamente associado a uma transformação de fase no estado sólido, do tipo martensítica, cristalograficamente reversível que ocorre internamente na LMF (5). Conforme mencionado anteriormente, as LMF possuem a habilidade de gerar forças e movimentos, abrindo margem para se construir atuadores leves e silenciosos. Entretanto, sabe-se que o tempo de resposta destes atuadores de LMF ainda é bastante lento, com frequência de resposta inferior a 10 Hz (4). Se as LMF forem desenvolvidas constantemente, novas e melhores funcionalidades desse material podem ser obtidas. Levando em consideração fatores como a composição química, o carregamento mecânico externo e o histórico termomecânico é possível produzir uma LMF com ativação em qualquer faixa de temperatura entre -100 a 200 °C, e ainda com uma vasta variedade de formas geométricas. (6).

A capacidade de adequação com acoplamento direto de um material ativo, como as LMF, para aplicação como atuador, depende de diversos fatores (4).

As propriedades de memória de forma são fortemente afetadas pela composição e pela homogeneidade da liga. No caso das LMF de Ni-Ti, diferenças de 0,1 % em peso de Ni resultam, por exemplo, em uma diferença de mais de 10 °C nas temperaturas de transição de fase (3).

A literatura apresenta as temperaturas de transição entre as fases indicando o início ( $M_s$ ) e o final ( $M_f$ ) da transformação martensítica a partir da austenita durante um resfriamento, também conhecida como transformação direta, e o início ( $A_s$ ) e final ( $A_f$ ) da transformação reversa partindo da martensita para a austenita durante um aquecimento (5).

O comportamento superelástico das LMF está associado à transformação de fase induzida por tensão mecânica, gerando uma deformação elevada quando uma carga é aplicada e uma subsequente recuperação desta deformação após alívio do carregamento, em temperaturas acima da austenítica final ( $A_f$ ) (4). Assim, é possível

afirmar que a transformação de fase pode também ser induzida através da aplicação de uma carga suficientemente alta no material quando este se encontra na fase austenítica de mais alta temperatura. O resultado desta carga é uma martensita não maclada criada a partir da austenita pela aplicação da tensão mecânica. Se a temperatura do material estiver completamente acima da  $A_f$ , será observada uma completa recuperação de forma após o alívio da carga aplicada, no retorno para a fase austenítica. Este comportamento é conhecido por pseudoelasticidade ou superelasticidade (4).

É possível afirmar a eficiência de mini molas de Ni-Ti pelas aplicações existentes na área ortodôntica, e que estas superam as mini molas comuns de aço, tanto pelo fato das mini molas de Ni-Ti possuírem uma alta capacidade de resistir às forças iniciais nelas aplicadas quanto pela sua capacidade de restituição de elevadas deformações, diferentemente daquelas comuns de aço que acumulam grandes deformações residuais no período de tratamento.

Uma mini mola superelástica tem como principais vantagens o fato de apresentar um patamar quase constante de descarregamento, etapa de maior interesse para o ortodontista, pois é quando se desenvolve o trabalho sobre a denteição (7) e da possibilidade de se aplicar grandes deformações sobre o elemento, bem maiores que em fios. Tornando os elementos de LMF bi e tri-dimensionais pode-se aumentar o desempenho do atuador. Esta última característica tem alargado o leque de aplicações da superelasticidade, pois enquanto atuadores em forma de fio deformam-se até cerca de 8%, molas superelásticas podem deformar-se de 100% a 600% sem guardar praticamente nenhuma deformação plástica (1).

Estudos apontam que enquanto uma mini mola de Ni-Ti sob tensão constante durante todo o tempo mantêm sua taxa de recuperação constante em 98% durante um período de 30 dias, uma mola comum de aço sob as mesmas condições tem sua taxa de recuperação decrescida de 57% no terceiro dia para 0% no trigésimo dia, mostrando assim a superioridade desta mola de Ni-Ti na não perda de eficiência durante um tratamento ortodôntico comum. (8).

Nesse contexto, pode-se visualizar a importância do estudo e caracterização do comportamento dinâmico de mini molas superelásticas de ligas de Ni-Ti com memória de forma. Neste estudo investigou-se o comportamento dinâmico destes elementos de LMF Ni-Ti, disponíveis no mercado nacional, através de um analisador

dinâmico-mecânico (DMA). O comportamento destas mini molas foi avaliado variando sua frequência de excitação em várias temperaturas e quando feita uma varredura com frequência constante em função da temperatura. Assim, o estudo atual pode ser considerado um trabalho preliminar de caracterização dinâmica destas mini molas de LMF Ni-Ti visando futuras aplicações em controle de vibrações em microssistemas mecânicos.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Toda estrutura utilizada na preparação e caracterização das mini molas Ni-Ti deste projeto foi disponibilizada e faz parte do Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM) do CCT/UFCG.

### 2.1 Preparação das amostras

#### 2.1.1 Materiais

Foram estudadas mini molas ortodônticas Ni-Ti de tração da marca nacional Dental Morelli apresentando 15 mm de comprimento e denominadas de M15. Na realidade, os 15 mm indicados pelo fabricante correspondem à distância entre os centros de cada olhal instalado nas molas. As mini molas estudadas possuem 1,27 mm de diâmetro externo e são fabricadas a partir de fios com 0,22 mm de diâmetro. Na Figura 1 é possível observar a configuração da mola e seu comprimento deformável aproximado. Verifica-se também que o comprimento útil da mola M15 é da ordem de 10 mm.

#### 2.1.2 Métodos

As temperaturas de transformação das mini molas foram medidas por análise térmica em calorimetria exploratória diferencial (DSC). O cronograma de preparação das molas estudadas foi o seguinte: treinamento dinâmico em DMA; corte das molas e pesagem das amostras obtidas.

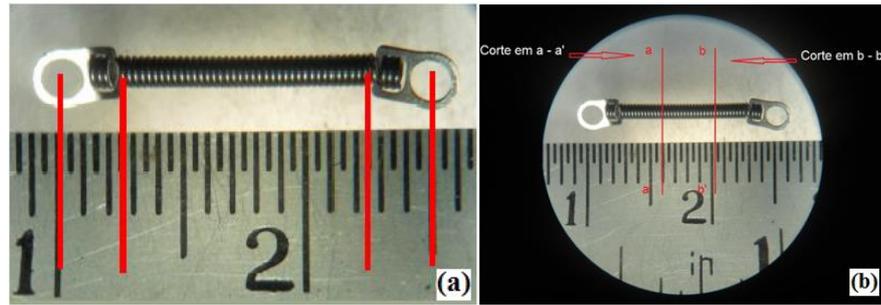


Figura 1. Mini molas de Ni-Ti M15. (a) Fotografia ao microscópio com destaque para o comprimento deformável e comprimento total da mesma. (b) Fotografia da mini mola de Ni-Ti e definição dos cortes para análise térmica, realizados nas seções a - a' e b - b'.

#### 2.1.2.1 Caracterização das Mini Molas Superelásticas

O comportamento térmico das mini molas ortodônticas Ni-Ti de tração da marca nacional Dental Morelli, apresentando 15 mm de comprimento total, foi avaliado utilizando duas técnicas de análise térmica distintas: calorimetria exploratória diferencial (DSC) e análise dinâmico-mecânica (DMA).

#### 2.1.2.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

O calorímetro DSC utilizado neste trabalho é da marca TA Instruments, modelo Q20. As amostras retiradas das mini molas de Ni-Ti para os ensaios em DSC, conforme definido pela Figura 1, tiveram massa média da ordem de 16 mg e foram primeiramente aquecidas a partir da temperatura ambiente até 120° C e logo em seguida resfriadas e aquecidas em uma faixa de temperatura situada entre - 60° C e 40° C por dois ciclos, a uma taxa constante de 5 °C/min.

#### 2.1.2.3 Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)

Foram realizados apenas ensaios de natureza dinâmica nas mini molas, submetidas a análise de sensibilidade da rigidez, varredura a frequência constante e varredura a frequência variável.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As temperaturas de transformação obtidas a partir das curvas de DSC pela aplicação do método das tangentes estão disponíveis na Tabela 1. Pode-se concluir, com base na temperatura  $A_f$ , que a mini mola é superelástica quando na região bucal, onde a temperatura é da ordem de 37 °C.

O termograma DSC de uma amostra cortada na cortadeira de precisão e aquele obtido com uma amostra de mini mola cortada com um alicate de corte comum foram dispostos um acima do outro na mesma Figura 2 para efeito comparativo.

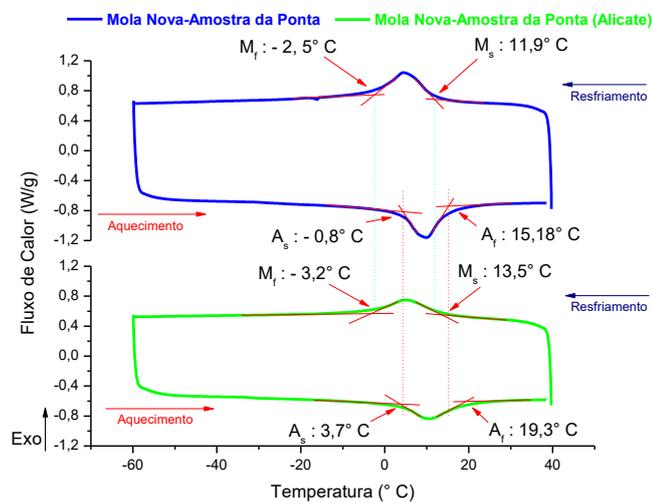


Figura 2 - Comparativo dos termogramas DSC de uma amostra de mini mola cortada com uma cortadeira de precisão (“Mola Nova-Amostra da Ponta”) e outra amostra cortada com um alicate de corte comum (“Mola Nova-Amostra da Ponta (alicate)”).

Com os dados apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3 se faz possível comparar as temperaturas de transformação de fase das amostras de mini molas estudadas. Verifica-se que ambas as amostras cortadas em uma cortadeira de precisão se mostram mais homogêneas do que a amostra cortada com alicate, principalmente quanto à temperatura de ativação  $A_f$ . Pode-se citar também que a homogeneidade ao longo do comprimento da mola é prejudicada pelo corte, principalmente a temperatura  $A_f$  que chega a uma diferença de mais de 4 °C, enquanto as outras temperaturas apresentaram uma diferença máxima de aproximadamente 1,5 °C, que está dentro dos padrões esperados. Ainda é possível constatar um aumento da

maioria das temperaturas de transformação após o treinamento dinâmico das mini molas de Ni-Ti, indicando que tendem a modificar sua resposta térmica com a ciclagem. Esse fenômeno ocorre devido a introdução de tensões internas no material.

Tabela 1. Temperaturas de transformação de fase para mola nova cortada com Alicate.

| Temperaturas (°C) | Ms   | Mf    | As  | Af   |
|-------------------|------|-------|-----|------|
| Centro            | 11,5 | - 1,8 | 2,8 | 16,2 |
| Extremidade       | 13,5 | - 3,2 | 3,7 | 19,3 |

Tabela 2. Temperaturas de transformação de fase para mola nova cortada com Precisão.

| Temperaturas (°C) | Ms   | Mf    | As    | Af   |
|-------------------|------|-------|-------|------|
| Centro            | 12,2 | - 3,0 | 4,0   | 15,7 |
| Extremidade       | 11,9 | - 2,5 | - 0,8 | 15,2 |

Tabela 3. Temperaturas de transformação de fase para mola treinada cortada com Precisão.

| Temperaturas (°C) | Ms   | Mf    | As  | Af   |
|-------------------|------|-------|-----|------|
| Centro            | 14,7 | - 2,0 | 4,5 | 17,7 |
| Extremidade       | 13,8 | - 3,0 | 4,0 | 19,2 |

Visando melhor elucidar o comportamento dinâmico das mini molas estudadas, foram realizados ensaios dinâmicos no DMA para determinar a variação da rigidez das mini molas com o aumento da temperatura entre 30 °C e 90 °C. A Figura 3 mostra o comportamento da constante de mola (k), aqui denominada simplesmente por “rigidez”, em função da temperatura para uma mini mola M15. Verifica-se claramente o aumento da rigidez da mola durante o ensaio com o aumento da temperatura dentro da câmara de DMA. Isso significa que a medida que a temperatura vai aumentando ainda existe espaço para a fase austenita ganhar rigidez mesmo que a mini mola já esteja a uma temperatura muito superior a Af. Em temperaturas da ordem de 37 °C, correspondente a temperatura bucal típica, constata-se uma rigidez de aproximadamente 0,223 N/mm. Esse valor se eleva com o aumento da temperatura chegando a 0,246 N/mm na temperatura máxima de 90 °C. O aumento da rigidez ( $\Delta K$ ) entre as temperaturas de 30 e 90 °C é de cerca de  $\Delta K = 0,023$  N/mm, correspondendo a um ganho de 14,35 % de rigidez.

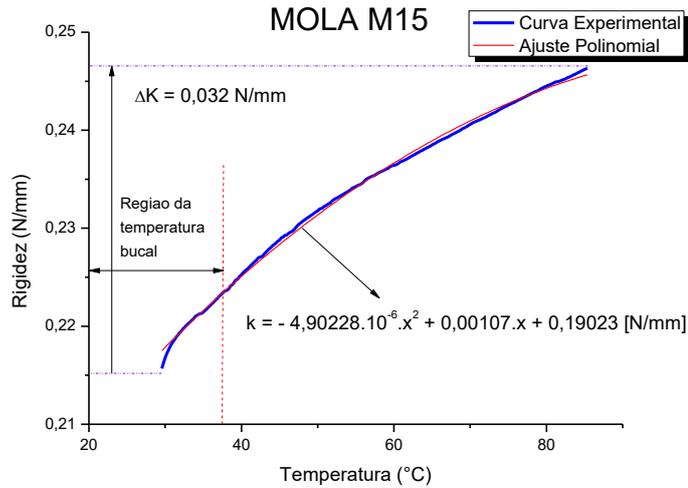


Figura 3 – Comportamento da constante de mola (rigidez) em função da temperatura para mini mola M15.

De um ponto de vista qualitativo, os resultados mostrados na Figura 4 permitiram constatar comportamentos semelhantes, com variações praticamente imperceptíveis no comportamento dinâmico da mini mola estudada quanto sua rigidez em função da variação de frequência de 1 a 200 Hz. Pode-se evidenciar um comportamento distinto basicamente na faixa de frequência quando esta aproxima-se de 200 Hz.

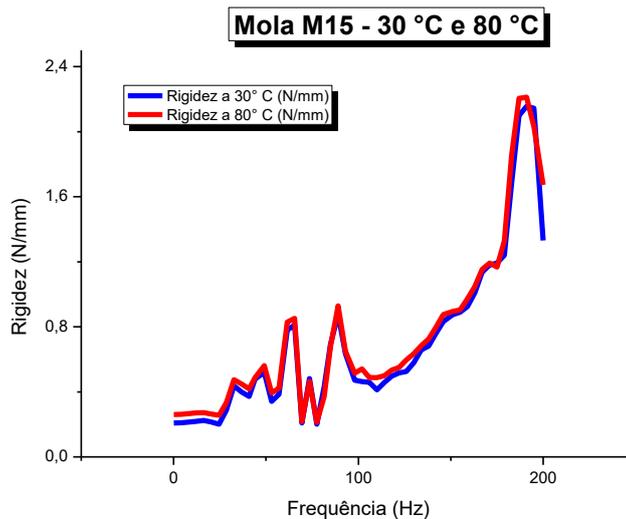


Figura 4 – Constante de mola (rigidez) em função da Frequência de uma mini mola M15 para temperaturas diferentes (30 °C e 80 °C), em que as temperaturas intermediárias a estas apresentaram comportamento semelhante.

A partir dos resultados da Figura 4 é possível verificar um aumento significativo da rigidez da mola quando se aumenta a sua frequência de excitação. Na temperatura de 40 °C, por exemplo, a rigidez é de 0,2212 N/mm para 0,1 Hz, chegando a 2,188 N/mm quando em 191,0 Hz, ou seja, um aumento bem significativo, de aproximadamente 10 vezes. Através de observação idealizou-se um sistema massa-mola, onde a garra móvel do DMA que traciona a mola faz o papel da massa, obtendo-se um valor para a mesma através da diferença entre os valores da força que a garra aplica na mola pela aceleração da gravidade 9,81. Obtendo os valores da rigidez (K) para as três primeiras temperaturas (30 °C, 40 °C e 50 °C) de (2), pode-se assim calcular através destas suposições a frequência natural de primeiro modo para o conjunto massa-mola. O valor obtido para as temperaturas de 30 °C, 40 °C e 50 °C foi de aproximadamente 52,5 Hz. Nos gráficos o primeiro pico se encontra a aproximadamente 60 Hz para todas as temperaturas estudadas. Assim, como a suposição é pouco precisa, pois a massa está dependendo de valores fornecidos pela máquina e não são valores medidos diretamente, é possível então desprezar essa diferença de aproximadamente 7,5 Hz e supor que os três picos em cada gráfico são as frequências naturais de primeiro, segundo e terceiro modo, respectivamente.

#### 4 CONCLUSÃO

Através de medidas de temperaturas de transformação de fase por calorimetria DSC realizadas em diferentes pontos das mini molas ortodônticas foi possível constatar homogeneidade ao longo de suas espiras. As variações significativas das temperaturas de transformação de fase ao longo das espiras só puderam ser observadas na mola cortada com alicate manual, elucidando o fato desse tipo de corte afetar o material através de tensões residuais após o procedimento, prejudicando uma medição correta das temperaturas de transformação de fase. A análise térmica por calorimetria DSC, permitiu também verificar que as mini molas de Ni-Ti possuem transformação de fase situadas na faixa de temperatura situada – 5 °C e 20 °C. Assim sendo, acima de 20 °C estas mini molas devem apresentar o fenômeno de superelasticidade.

Os ensaios de natureza dinâmica realizados usando DMA permitiram esclarecer o comportamento dinâmico apresentado pelas mini molas Ni-Ti durante a variação de temperatura do meio e durante a variação de sua frequência de excitação. Foi verificado que as mini molas estudadas apresentam na região da temperatura bucal uma rigidez da ordem de 0,223 N/mm, apresentando um aumento de rigidez de 0,032 N/mm entre as temperaturas de 30 °C e 90 °C.

Também foi possível, com a análise das molas em temperaturas constantes de 30 a 90 °C e frequência variando de 0,1 a 200 Hz, a obtenção da rigidez das mini molas estudadas. Constatou-se assim que a rigidez das molas aumenta com o aumento de sua frequência de excitação, atingindo um aumento bastante significativo de dez vezes do seu menor valor, chegando, em média, a um máximo na ordem de 0,2212 N/mm.

## 5 REFERÊNCIAS

- (1) AN, S., RYU, J., CHO, M., CHO, K., 2012. **"Engineering Design Framework for a Shape Memory Alloy Coil Spring Actuator using a Static Two-State Model"**, Published in IOP, Smart Materials and Structures. Vol. 21, pp.16.
- (2) GRASSI, E. N. D.; RAMOS, A. D. O.; BARBOZA, K. R. A.; DE ARAÚJO, C. J., **CARACTERIZAÇÃO TERMOMECÂNICA DE MICRO-MOLAS SUPERELÁSTICAS DE SMA**. In: Anais do VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2012. São Luis.
- (3) J. FRENZEL, Z. ZHANG, K. NEUKING, G. EGGELER. **High quality vacuum induction melting of small quantities of NiTi shape memory alloys in graphite crucibles**. Journal of Alloys and Compounds. Vol. 385, pp. 214–223, 2004.
- (4) LAGOUDAS, D. C. **Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications**. Springer Science Business Media, LLC, 2008. 446 p. ISBN 978-0-387-47684-1.
- (5) OTSUKA, K., WAYMAN, C. M. **Shape Memory Materials**. New York: Cambridge University Press, 1998. ISBN 0-521-44487-x.
- (6) REIS, R. P. B., DE ARAÚJO, C. J., GOMES, A.A.C., NETO, J. F. C., RODRIGUES, L.F.A., **Desenvolvimento de um Sistema de Medição de Temperaturas de Transformação em Ligas Com Memória de Forma Utilizando**

**Pastilha Termoelétrica.** In: 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos materiais (CBECiMat - 2008), Porto de Galinhas – P E, Brasil, p. 1-8, 2008.

(7) REIS, W. P., “**Caracterização de Ligas de Níquel-Titânio para Ortodontia**”, Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro-RJ, Brasil. 2001

(8) YOUYI, C., MING, Z., FENGZHI, Y., **Orthodontic Application of NiTi Shape-Memory Alloy in China.** In: Shape Memory Implants, L’Hocine Yahia, Springer. Montreal, Canadá, p. 233-235, 1999.

## **Ni-Ti SHAPE MEMORY ALLOY SUPERELASTIC COMERTIAL CLOSED COIL SPRINGS: DYNAMICAL BEHAVIOR**

### **ABSTRACT**

Shape Memory Alloys (SMA) are known as active or smart materials by the fact its capability of react to interactions with the ambient that it’s inserted by temperature variations. These kind of active materials has the capability of act as sensors or actuators, reacting from temperature changes or electrical stimulus (Joule Effect). SMA still has the ability of recover after a mechanical loading followed by the relief of a before applied deformation, when in its higher temperature, corresponding to austenite phase (superelasticity phenomenon). This research pursued better knowledge about actuators manufactured using Ni-Ti SMA like commercial closed coil orthodontic springs, statically and dynamically studied to characterize its behavior and responses to a dynamical applied load. Thermal-analysis techniques used: Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Dynamic Mechanical Analysis (DMA). It verified the closed coil springs stiffness growing with the ambient temperature and exciting frequency variation, and probable natural’s frequency.

**Keywords:** Shape Memory Alloys, Closed Coil Springs, Dynamical Analysis