

# MODELAGEM DE UM DISPOSITIVO DE PRÉ-CARGA COM MEMÓRIA DE FORMA PARA JUNTAS FLANGEADAS

**Carlos Américo Panisset Lanhas La Cava**

**Eduardo Prieto Silva**

**Luciano Guimarães Machado**

**Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco**

CEFET/RJ - Departamento de Engenharia Mecânica

20.271.110 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil

E-Mail: calas@cefet-rj.br

**Marcelo Amorim Savi**

Instituto Militar de Engenharia - Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais

22.290.270 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil

E-Mail: savi@epq.ime.eb.br

## Resumo

As características das ligas com memória de forma (SMAs) vêm motivando o desenvolvimento de aplicações em diversas áreas do conhecimento que vão desde a robótica até a indústria aeroespacial. No entanto, a sua modelagem ainda não é um ponto bem estabelecido. Durante o processo de recuperação da forma de um componente de SMA, que pode ser induzido aquecendo-se o componente através de uma corrente elétrica ou de um jato de ar quente, grandes forças podem ser geradas num período de tempo relativamente curto. Este trabalho apresenta a modelagem e a simulação numérica de um dispositivo de pré-carga com memória de forma para juntas flangeadas. Este dispositivo permite aplicar a pré-carga nos parafusos da junta de uma forma simples e precisa, além de evitar as tensões de cisalhamento introduzidas pelos processos tradicionais. As simulações numéricas permitem descrever algumas das principais características do dispositivo, fornecendo informações úteis para o seu projeto.

**Palavras-Chave:** Ligas com Memória de Forma, Modelagem, Simulação Numérica.

## 1. INTRODUÇÃO

As Ligas com Memória de Forma (SMA – *Shape Memory Alloys*) são ligas metálicas que possuem a capacidade de retornar à sua forma original quando submetidas a um processo termomecânico apropriado. Para temperaturas acima de uma temperatura crítica, as SMAs apresentam o fenômeno conhecido como pseudoelasticidade no qual chega-se a experimentar deformações reversíveis da ordem de 8%. Para temperaturas abaixo de uma outra temperatura crítica, as SMAs apresentam o efeito de memória de forma no qual, após um processo de carregamento e descarregamento, a liga apresenta uma deformação residual que pode ser eliminada através de um carregamento térmico adequado. Estas ligas podem apresentar ainda

um comportamento denominado efeito de memória de forma reversível (*two-way*) no qual associa-se uma determinada forma a faixas temperaturas, fazendo com que uma peça mude sua forma através de um processo cíclico de aquecimento e resfriamento (Hodgson *et al.*, 1999). Este efeito é conseguido através de um processo de treinamento da liga.

Os fenômenos associados às SMAs estão relacionados às transformações de fase que podem ser induzidas tanto pela variação da temperatura quanto pela variação no nível de tensão. Fundamentalmente, duas fases estão presentes nestas ligas: austenita e martensita. Zhang *et al.* (1991) indicam a formação de vinte e quatro variantes de martensita a partir do resfriamento da fase matriz. Estas vinte e quatro variantes estão dispostas em seis placas contendo quatro variantes cada. Com a aplicação de um carregamento, tem-se um processo de conversão (*detwinning*) de três das quatro variantes de martensita obtidas inicialmente em uma única que obedece à direção preferencial dada pelo alinhamento dos planos preferenciais com a direção principal do carregamento.

As ligas de Ni-Ti, Cu-Zn, Cu-Zn-Al, Mg-Cu, Fe-Mn-Si e Cr-Ni são alguns exemplos de ligas com memória de forma. Estas ligas são muito sensíveis a variações na composição, podendo apresentar grandes mudanças em suas propriedades com uma simples adição de um elemento de liga. A liga Ni-Ti é a mais popular por apresentar a maior deformação entre as ligas com memória de forma (próxima de 8%). Além desta característica, a liga Ni-Ti tende a ser muito mais estável termicamente e ainda apresenta uma excelente resistência à corrosão quando comparadas as ligas à base de cobre que apresentam média resistência a corrosão. As ligas de Ni-Ti são suscetíveis a corrosão sob tensão e apresentam uma elevada ductilidade. Por outro lado, possuem um custo maior do que as demais ligas citadas (Hodgson *et al.*, 1999).

De uma maneira geral, as ligas com memória de forma apresentam baixa resistência à fadiga quando comparadas aos aços carbono comum. Visando melhorar esta propriedade, atualmente pesquisas vem sendo desenvolvidas sobre o efeito da adição e combinação de certos elementos de ligas. Uma outra característica destas ligas é o tempo de resposta relativamente elevado. Em situações em que necessita-se de uma resposta rápida existem outros materiais inteligentes, como os piezoelétricos, que podem apresentar resultados mais satisfatórios. Vale ressaltar no entanto, que as SMAs são capazes de gerar grandes forças de restituição com um consumo de energia relativamente baixo, o que é uma característica que as diferenciam em diversas aplicações.

Estes materiais vêm sendo utilizados nas mais diversas aplicações, variando desde a indústria aeroespacial até a biomédica, passando pela robótica. Dentre estas, vale citar inúmeros dispositivos termo-ativados como válvulas pneumáticas para o controle de fluxo (Johnson & Martynov, 1999) e dispositivos que exploram a pseudoelasticidade como armações de óculos (SMA, 1999).

Na indústria aeroespacial, estes materiais são utilizados em dispositivos de separação não-pirotécnicos - *Frangibolt* (Pacheco & Savi, 1997). Outra aplicação é a construção de enrijecedores em asas de aviões, que tendem a aumentar a rigidez na medida em que a pressão aerodinâmica aumenta (SMA, 1999). Na área biomédica, estes materiais são aplicados na construção de pequenos tubos que são colocados dentro dos vasos sanguíneos com a função de reforçar as suas paredes internas. Existem também aplicações em próteses dentárias, na construção de catéter (sonda – instrumento cirúrgico) e ferramentas cirúrgicas (SMA, 1999). Na ortodontia, o emprego de aparelhos com memória de forma trouxe resultados muito satisfatórios, difundindo bastante o uso das SMAs (Airoldi *et al.*, 1997). Recentemente, a indústria robótica tem se dedicado a utilizar fibras de SMA para reproduzir o movimento contínuo dos músculos humanos (Rogers, 1995).

A indústria petroquímica utiliza as propriedades singulares destas ligas em juntas flangeadas (SINTEF, 1999). Tradicionalmente, a pré-carga dos parafusos do flange é obtida

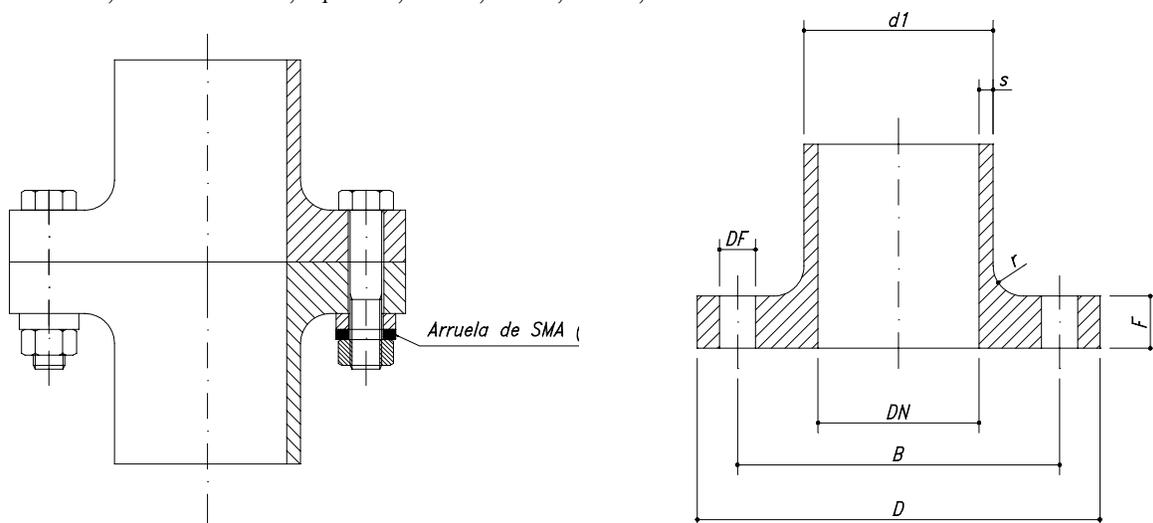
através de um torque de aperto que acaba introduzindo tensões de cisalhamento nos parafusos, reduzindo a resistência mecânica da junta. Existe ainda uma grande incerteza com relação ao valor da pré-carga que a junta efetivamente absorve, podendo variar em torno de  $\pm 30\%$  (Juvinal, 1983). As SMAs oferecem uma alternativa a este processo tradicional. A utilização de um dispositivo com memória de forma permite aplicar a pré-carga de uma forma simples e precisa, sem introduzir tensões de cisalhamento.

O dispositivo de pré-carga com memória de forma para juntas flangeadas consiste de uma arruela feita com uma SMA, pré-comprimida. A pré-carga é obtida aquecendo-se o dispositivo através de um jato de ar quente após a sua instalação nas juntas. Com isso, a arruela se expande, recuperando sua forma original, tracionando o parafuso de fixação. Isso promove a pré-carga do parafuso de fixação sem submetê-lo a tensões cisalhantes. O objetivo deste trabalho é apresentar uma discussão sobre a concepção desse dispositivo, propondo um modelo para descrever o seu comportamento termomecânico. Os resultados das simulações numéricas permitem descrever algumas das principais características do dispositivo, fornecendo informações úteis para o seu projeto.

## 2. DESCRIÇÃO DO DISPOSITIVO DE PRÉ-CARGA COM MEMÓRIA DE FORMA

O dispositivo de pré-carga com memória de forma para juntas flangeadas funciona como um atuador que, além de não introduzir tensões de cisalhamento nos parafusos de fixação do flange, propicia um controle mais preciso da pré-carga. Além disso, a montagem do flange torna-se mais simples uma vez que não requer a aplicação de um torque de aperto em cada parafuso. A Figura 1 mostra a montagem do dispositivo no flange. O dispositivo consiste de uma arruela, inicialmente pré-comprimida que, quando é aquecida, recupera sua forma original gerando uma força axial de restauração, o que provoca uma carga nos parafusos da junta. Desse modo, o aperto do flange é feito sem a introdução de tensões de cisalhamento resultantes do torque de aperto em juntas tradicionais.

Neste trabalho, considera-se um flange padrão DIN 2544 de aço carbono fundido St 37-2 (Acepam, 1997), que é bastante utilizado na indústria petroquímica. Os 8 parafusos utilizados na fixação do flange são de cabeça sextavada, de tolerância grossa (M16 x 2), de acordo com a norma DIN 7990 [DIN 7990, 1983]. A arruela e a porca sextavada estão de acordo com a norma citada. Além disso, admite-se que a tubulação está submetida a uma pressão nominal de 25 atm. A Figura 1 apresenta as características geométricas do flange em questão. Os parâmetros indicados na figura são os seguintes:  $DN = 80$  mm,  $D = 200$  mm,  $B = 160$  mm,  $F = 26$  mm,  $DF = 18$  mm,  $d_1 = 86,4$  mm,  $s = 3,2$  mm,  $r = 6$  mm.



**Figura 1** - Flange com o dispositivo com memória de forma.

O dispositivo em questão é modelado em um contexto unidimensional considerando a teoria constitutiva proposta por Tanaka & Nagaki (1982). O modelo proposto permite prever o comportamento termomecânico do dispositivo, obtendo informações úteis para o seu projeto.

### 3. MODELO CONSTITUTIVO PARA SMAs

A modelagem das ligas com memória de forma possui duas abordagens distintas. A primeira, microscópica, leva em consideração aspectos metalúrgicos. A segunda abordagem, macroscópica, descreve os aspectos fenomenológicos. Os modelos com cinética de transformação de fase assumida consideram que a transformação de fase é regida por uma função conhecida. O primeiro modelo a apresentar esta formulação foi proposto por Tanaka & Nagaki (1982), tendo dado origem a outros modelos que apresentam alterações na cinética de transformação de fase. Pelo fato de seu uso ter se popularizado, esses modelos apresentam maiores comprovações experimentais, ocupando um importante espaço na modelagem das SMAs. Neste trabalho, considera-se o modelo de Tanaka para descrever o comportamento termomecânico das SMAs. Algumas pequenas modificações são introduzidas com o objetivo de obter resultados mais condizentes.

O modelo de Tanaka considera, além da deformação,  $\varepsilon$ , e da temperatura,  $T$ , uma variável interna escalar,  $\beta$ , que representa a fração volumétrica da fase martensítica. A relação constitutiva entre a tensão,  $\sigma$ , e as variáveis de estado pode ser expressa da seguinte maneira, na forma de taxas

$$\dot{\sigma} = E\dot{\varepsilon} - \alpha\dot{\beta} - \Omega\dot{T} \quad ; \quad E = E_M|\beta| + E_A(1-|\beta|) \quad ; \quad \Omega = \Omega_M|\beta| + \Omega_A(1-|\beta|) \quad (1)$$

onde  $\alpha$  é o parâmetro de transformação,  $E$  o módulo de elasticidade e  $\Omega$  o coeficiente de expansão térmica. A variável  $\beta$  é função dos valores de tensão e temperatura,  $\beta = \beta(\sigma, T)$ , estando contida no intervalo de  $-1 \leq \beta \leq +1$ . Quando  $\beta = +1$ , significa que a composição do material é 100% martensita positiva ( $M^+$ ), induzida por tensão trativa. Quando  $\beta = -1$ , a composição do material é 100% martensita negativa ( $M^-$ ), induzida por tensão compressiva. Quando  $\beta = 0$ , o material está 100% na fase austenítica ( $A$ ). Para valores de  $\beta$  entre  $-1$  e  $+1$  e diferentes de 0, tem-se frações de martensita somadas com austenita. A equação que descreve a transformação da austenita em martensita é a seguinte,

$$\beta = \{1 - \exp[-a_M(M_S - T) - b_M|\sigma|]\} \text{sign}(\sigma) + \beta^M \quad (2)$$

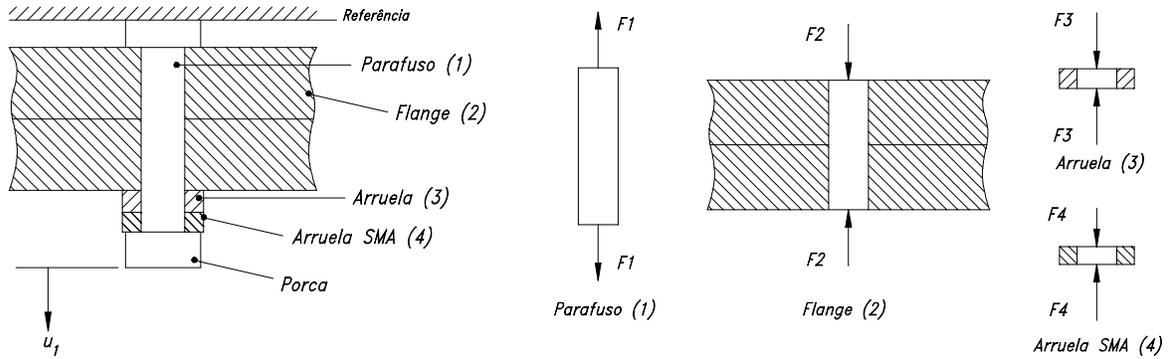
onde  $\text{sign}(\sigma) = \sigma/|\sigma|$ ;  $a_M$  e  $b_M$  são constantes positivas da martensita,  $M_S$  é a temperatura de início da transformação martensítica e  $\beta^M$  representa a fração volumétrica da martensita quando a transformação reversa se inicia. Esta equação se aplica para  $\sigma \geq \sigma_M = (a_M/b_M)(T - M_S)$ . A transformação reversa, martensita para austenita, é descrita pela seguinte equação

$$\beta = \{\beta^M \exp[-a_A(T - A_S) + b_A|\sigma|]\} \text{sign}(\sigma) \quad (3)$$

onde  $a_A$  e  $b_A$  são constantes positivas da austenita;  $A_S$  é a temperatura de início da transformação austenítica. Esta equação se aplica para  $\sigma \leq \sigma_A = (a_A/b_A)(T - A_S)$ .

#### 4. MODELO DO DISPOSITIVO DE PRÉ-CARGA COM MEMÓRIA DE FORMA

O modelo proposto para descrever o comportamento termomecânico do dispositivo de pré-carga considera que a cabeça do parafuso e a porca são rígidos. A Figura 2 mostra o modelo considerado e as forças em cada elemento.



**Figura 2** - Modelo do dispositivo com a arruela de SMA.

A partir da análise de compatibilidade geométrica e de equilíbrio de forças nos componentes tem-se a seguinte expressão, onde adota-se a hipótese de pequenos deslocamentos:

$$u_1 = u_4 - u_2 - u_3 \quad ; \quad F_1 = F_2 = F_3 = F_4 \quad (4)$$

onde  $u_i$  e  $F_i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) representam os deslocamentos e as forças no elemento  $i$ , conforme especificado na Figura 2.

A partir da equação constitutiva (1), obtém-se a taxa de deformação para a arruela de SMA:

$$\dot{\epsilon}_4 = \frac{1}{E_4} (\dot{\sigma}_4 + \alpha \dot{\beta} + \Omega \dot{T}) \quad (5)$$

Utilizando a definição de tensão uniaxial para a arruela do dispositivo de SMA e relações lineares entre força e deslocamento para os demais componentes, tem-se

$$\sigma_4 = F_4 / A_4 \quad ; \quad F_i = K_i u_i \quad \text{para } (i = 1, \dots, 3) \quad (6)$$

onde  $K_i = E_i A_i / L_i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) é a rigidez dos componentes do dispositivo.  $E_i$ ,  $A_i$  e  $L_i$  representam, respectivamente, o módulo de elasticidade, a área transversal e o comprimento dos elementos. Dessa forma, é possível escrever:

$$\dot{\sigma}_4 = - \frac{(\alpha \dot{\beta} + \Omega \dot{T})}{\left( \frac{K_4}{K_1} + \frac{K_4}{K_2} + \frac{K_4}{K_3} + 1 \right)} \quad (7)$$

Um procedimento numérico iterativo, do tipo preditor-corretor, é utilizado para resolver o sistema de equações que descrevem o comportamento do dispositivo. O

procedimento é composto de um preditor termoelástico, durante o qual não ocorre transformação de fase ( $\dot{\beta} = 0$ ). Em seguida, emprega-se um procedimento de integração para obter os valores  $\sigma_4$  e  $\beta$ . O procedimento é repetido até que algum critério de convergência seja satisfeito.

## 5. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Considerando o flange apresentado na Figura 1, algumas simulações numéricas são desenvolvidas. Os parafusos são da classe 5.8. Shigley & Mischke (1989) mostram que a carga de aperto necessária para estes parafusos deve ser maior ou igual a 54 kN. A rigidez do parafuso e da junta podem ser calculadas através das seguintes equações (Shigley & Mischke, 1989):

$$K_1 = \frac{K_t K_d}{K_t + K_d} \quad ; \quad K_2 = \frac{0,577\pi E_2 d_p}{2 \ln \left[ 5 \left( \frac{0,577(2F) + 0,5d_p}{0,577(2F) + 2,5d_p} \right) \right]} \quad (8)$$

onde  $K_t = 6,500 \times 10^9$  N/m e  $K_d = 0,886 \times 10^9$  N/m representam, respectivamente, a rigidez da parte roscada e da parte lisa do parafuso (Shigley & Mischke, 1989). Admite-se uma arruela com um comprimento de 8 mm, um diâmetro externo de 30 mm e um diâmetro interno de 17,5 mm. O parafuso, o flange e a arruela possuem módulos de elasticidade de 207 GPa. Com isso, têm-se os seguintes valores para a rigidez de cada elemento:  $K_1 = 0,780 \times 10^9$  N/m,  $K_2 = 3,01 \times 10^9$  N/m e  $K_3 = 12,06 \times 10^9$  N/m.

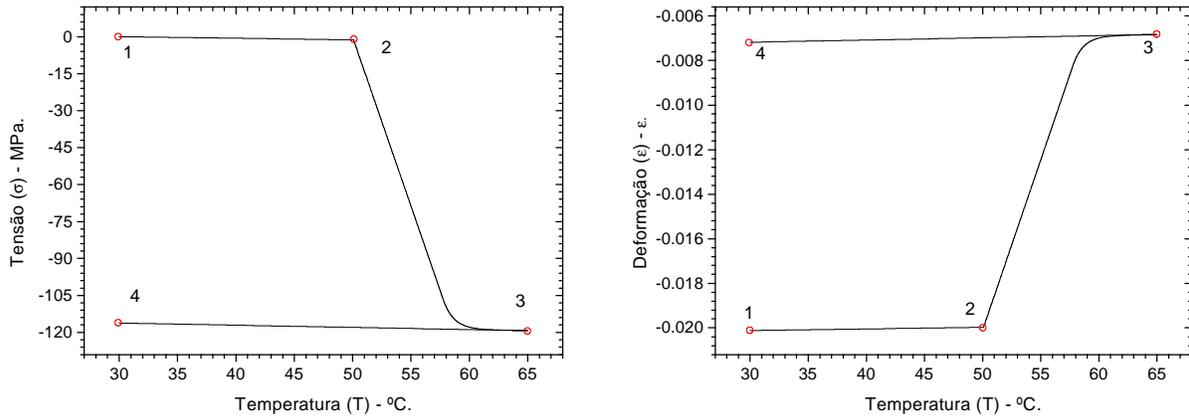
Considera-se que a arruela de SMA possui os mesmos diâmetros, externo e interno, da outra arruela. Dessa forma, para que a arruela de SMA introduza a força de aperto necessária, deve ser capaz de desenvolver uma tensão de restituição de  $-116$  MPa.

Várias simulações foram desenvolvidas para determinar a espessura e a deformação residual inicial da arruela de SMA, chegando-se aos seguintes valores: espessura de 7,1 mm e deformação residual inicial é  $\epsilon_0 = -2\%$ , o que está associado a uma fração volumétrica inicial de martensita  $\beta_0 = -0,754$ , a temperatura ambiente de  $30^\circ\text{C}$ . As propriedades mecânicas do material da arruela de SMA estão listadas na Tabela 1.

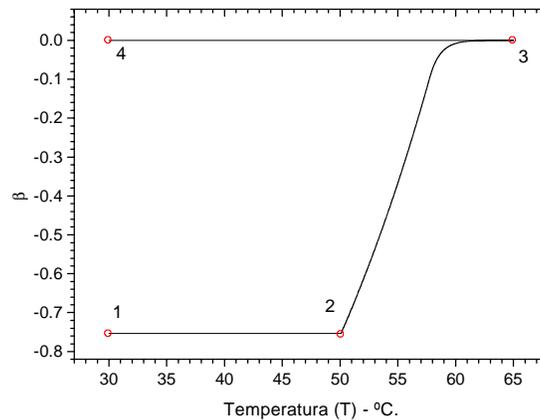
**Tabela 1 .** Propriedades da liga Ni-Ti (Leuven, 1998).

$E_M$	35 GPa
$E_A$	83 GPa
$M_S$	20 °C
$A_S$	50 °C
$\alpha$	1,25 GPa
$\Omega_M$	231 kPa °C <sup>-1</sup>
$\Omega_A$	913 kPa °C <sup>-1</sup>
$a_M$	1,10 °C <sup>-1</sup>
$b_M$	0,08 MPa <sup>-1</sup>
$a_A$	1,10 °C <sup>-1</sup>
$b_A$	0,08 MPa <sup>-1</sup>

A partir das condições iniciais estabelecidas, simula-se o processo de pré-carga do parafuso. A arruela de SMA é aquecida até uma temperatura de 65°C, necessária para que a transformação de fase se complete ( $\beta = 0$ ). Em seguida, a arruela é resfriada até a temperatura ambiente. As Figuras 3 e 4 mostram a evolução da tensão, deformação e fração volumétrica da fase martensítica em função da temperatura. A transformação de fase induz a recuperação da deformação residual inicial ( $\epsilon_0$ ), promovendo a pré-carga no parafuso de fixação.



**Figura 3** - Evolução da tensão e da deformação com a temperatura.



**Figura 4** - Evolução da fração volumétrica da fase  $\beta$  com a temperatura.

O processo de pré-carga pode ser acompanhado através de 4 pontos destacados nas figuras. O ponto 1 representa a condição inicial do processo, com uma temperatura inicial de 30°C, uma deformação -2% e uma fração volumétrica  $\beta_0 = -0,754$ . O ponto 2 indica o início do processo de transformação de fase ( $T = 50^\circ\text{C}$ ), observando-se uma tensão compressiva associada à dilatação térmica. O ponto 3 está associado à temperatura máxima e à tensão mínima ( $T = 65^\circ\text{C}$  e  $\sigma = -119$  MPa), quando toda a transformação de fase já se processou. Finalmente, o ponto 4 representa a condição final onde se observa, a uma temperatura de 30°C, a recuperação da dilatação térmica e uma tensão final de -116 MPa que é suficiente para aplicar a força de aperto necessária.

Visando avaliar a vantagem deste dispositivo em relação ao processo tradicional de pré-carga, que utiliza um torque de aperto, estabelece-se uma comparação entre as tensões equivalentes de *von Mises* no parafuso de fixação para as duas situações. Segundo Shigley & Mischke (1989), um torque de aperto de 173 N.m é necessário para promover uma pré-carga adequada na junta em questão. Considerando que o parafuso de fixação absorve metade do

torque de aperto aplicado, este elemento apresenta uma tensão equivalente de *von Mises* de 327 MPa. Por outro lado, o uso do dispositivo com memória de forma acarreta uma tensão equivalente de *von Mises* de 269 MPa, o que representa uma redução da ordem de 20% em termos de sollicitação mecânica.

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresenta-se um modelo para descrever o comportamento termomecânico de um dispositivo de pré-carga com memória de forma para juntas flangeadas. Um procedimento numérico é proposto e as simulações numéricas apresentadas permitem prever o comportamento termomecânico do dispositivo, fornecendo dados importantes para o seu projeto. Os resultados mostram que, para a junta analisada, a utilização do dispositivo promove uma redução da sollicitação mecânica da ordem de 20% quando comparada com a observada no processo tradicional que aplica um torque de aperto.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte da FAPERJ (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro) e do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

## 8. REFERÊNCIAS

- Acepam, 1997, “Catálogo de Flanges – Válvulas Industriais”.
- Airolidi, G., Riva, G., Vanelli, M., Filippi, V. & Garattini, G., 1997, “Oral Environment Temperature-Changes Induced by Cold/Hot Liquid Intake”, *American J. of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, v.112, n.1, pp.58-63.
- DIN 7990, 1983. “Elementos de Fixação Mecânica I – Parafusos e Porcas – Normas de Dimensionamento” - 1ª Edição Brasileira – Editora Is.
- Hodgson, D.E., Wu, M. H., Biermann, R.J., 1999, “Shape Memory Alloys”, [www.sma-inc.com/SMAPaper.html](http://www.sma-inc.com/SMAPaper.html), maio.
- Johnson, A.D. & Martynov, V.V., 1999, “Applications Of Shape-Memory Alloy Thin Film”, “<http://www.sma-mems.com/smst.htm>”, maio.
- Juvinall, R.C., 1983, “Fundamentals of Machine Component Design”, John Wiley & Sons.
- Leuven, K.U., 1998, <http://www.mtm.kuleuven.ac.be>.
- Pacheco, P.M.C.L. & Savi, M.A., 1997, “A Non-explosive Release Device For Aerospace Applications Using Shape Memory Alloys”, COBEM 97 – XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica.
- Rogers, C.A., 1995, “Intelligent Materials”, *Scientific American*, September, pp.122-127.
- Schetky, L.M., 1979, “Shape Memory Alloys”, *Scientific American*, v.241(5), pp.68-76.
- Shigley, J.E. & Mischke, C.R., 1989, “Mechanical Engineering Design”, McGraw-Hill.
- SINTEF, 1999, “Shape Memory Alloys in Oil Well Applications”, <http://iku.sintef.no/Borebronn/Brosjyrer/SMA/SMA.htm>.
- SMA, 1999, “Applications of Shape Memory and Superelastic Alloys”, <http://www.sma-inc.com/Applications.html>.
- Tanaka, K. & Nagaki, S.A., 1982, "Thermomechanical Description of Materials with Internal Variables in the Process of Phase Transitions", *Ing. Arch.*, vol.51, pp.287-299.
- Zhang, X.D., Rogers, C.A. & Liang, C., 1991, “Modeling of Two-Way Shape Memory Effect”, *ASME - Smart Structures and Materials*, v.24, pp.79-90.