

COMPARAÇÃO DA SOLUÇÃO NUMÉRICA DE EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS PARA LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

COMPARISON OF THE NUMERICAL SOLUTION OBTAINED BY DIFFERENT CONSTITUTIVE EQUATIONS FOR SHAPE MEMORY ALLOYS

J. C. Hilário¹, C. A. R. Andrade², M. T. Braz-César³, A. S. Borges⁴

¹Aluno de Mestrado em Engenharia Industrial, ESTiG - Instituto Politécnico de Bragança

²Professor Adjunto, ESTiG - Instituto Politécnico de Bragança

³Professor Adjunto, ESTiG - Instituto Politécnico de Bragança

⁴Professor Associado, UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Cornélio Procópio



RESUMO

A utilização de materiais inteligentes vêm se tornando essencial para o aperfeiçoamento de aplicações existentes e o desenvolvimento de novas tecnologias. As ligas com memória de forma fazem parte desta classe de materiais, onde as suas características ímpares possibilitam a aplicação como por exemplo: amortecedores, sensores e atuadores. Tendo como objetivo a aplicação destas ligas, será necessário a possibilidade de simular fielmente o comportamento destas, de forma a diminuir custos relacionados com produção de protótipos e o respectivo tempo necessário para produzi-los. O presente trabalho vem comparar as soluções apresentada por dois modelos constitutivos para a mesma liga de Níquel-Titânio, utilizando um algoritmo implementado em Matlab® e o software comercial Ansys® Workbench™. Os resultados apresentam as diferenças quantitativas nos modelos e a respectiva análise mostra os fenômenos que foram levados em conta durante a simulação. Pelo que são necessários ensaios experimentais para a validação dos fenômenos mencionados, calibração dos modelos e comparação para assim identificar o modelo mais representativo na representação do comportamento real da liga.

ABSTRACT

The use of smart materials has become essential for the improvement of existing applications and the development of new technologies. Shape Memory Alloys (SMA) are part of this class of materials, where their unique characteristics allow their application as shock absorbers, sensors and actuators, for example. To apply these alloys, it is necessary simulate reliably their behavior, in order to reduce costs related to the prototype production and time to build them. The present research seeks the comparison between two solutions by different constitutive models for the same Nickel-Titanium alloy. One is using an algorithm implemented in Matlab® and the other with the result available in the literature obtained by commercial software Ansys® Workbench™. The results show the quantitative differences in the models and the phenomena that were taken into account during the simulation. Therefore, experimental tests are required for the validation of the mentioned phenomena, calibration and comparison of the models to identify the most representative model in the representation of the actual behavior of the alloy.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas é notório o desenvolvimento de novos materiais para as mais diversificadas aplicações. Destaca-se um particular interesse da comunidade científica na análise de materiais inteligentes (*smart materials*). Tais pesquisas permitiram o desenvolvimento de amortecedores (Paulo Jr, 2012; Lobo, Almeida e Guerreiro, 2015; Qian, 2016), sensores (Simões, 2015) e atuadores (Costa e Nunes, 2016), entre outros.

Dentre os materiais que podem ser classificados como inteligentes temos as ligas com memória de forma (LMF).

As LMF tem como principais características a capacidade de retornar a sua forma original após deformações de “grande escala” quando comparada aos metais estruturais comumente utilizados e a superelasticidade (SE) que define a presença de um laço de histerese no diagrama tensão-deformação do material.

O laço de histerese ocorre quando o material está a uma temperatura superior a temperatura final de transformação inversa, encontrando-se na fase austenítica, caso seja aplicada uma tensão grande o suficiente, haverá a formação de martensita não maclada, sendo este processo denominado martensita induzida por tensão. O material irá deformar-se mediante o condicionamento da tensão e retornar a forma inicial a partir do momento de alívio desta (Santos, 2011).

As ligas de Níquel e Titânio que apresentam em sua composição porcentagens atômicas semelhantes são denominadas Nitinol, e vem ganhando grande importância devido as suas propriedades como o EMF e boa biocompatibilidade (Huang et al., 2010 e Wang, Zhu, 2018).

Os efeitos são devido a uma propriedade de mudança de fase sem difusão, onde as duas fases sólidas, austenite e martensite, com diferentes arranjos moleculares são definidas pela temperatura a que se encontra a liga ou pela aplicação de tensão na mesma, acima de um limite estabelecido (Santos, 2011).

Visando o desenvolvimento de produtos com a utilização destes materiais, as técnicas de simulação são de grande importância,

uma vez que a construção de protótipos e respectivos ensaios podem apresentar custos elevados. Com isto em mente, os modelos matemáticos foram desenvolvidos e são revistos para que seja possível antecipar o comportamento dos protótipos.

O presente artigo tem como proposta a comparação de dois modelos numéricos capazes de simular o comportamento esperado, sendo um deles executado através do algoritmo apresentado por (Silva, 2018), onde um modelo adaptado foi utilizado em conjunto com a modelagem dinâmica de interesse, tendo sido o método numérico de Runge Kutta de 4ª ordem utilizado para a resolução das equações, e o outro pelo software comercial Ansys® Workbench™, analisando os resultados obtidos observados nos dados de saída deste último.

2. METODOLOGIA

Como mencionado, os principais efeitos das LMF são devido à transformação de fase sólida, onde modelos constitutivos procuram representar o comportamento através de leis mecânicas, cinéticas e térmicas em alguns deles.

O código utilizado no Matlab® tem como base o modelo constitutivo desenvolvido por (Brinson, 1993), tendo este sido deduzido em (Silva, 2018). Para o Ansys® Workbench™, o modelo utilizado foi proposto por (Auricchio, 2001) e a forma de sua implementação pode ser observada em (Ansys® - Mechanical APDL 19.2 Material Reference, 2018).

Devido aos modelos constitutivos adotados para cada *software* serem diferentes entre si, torna-se necessário uma análise dos principais parâmetros que definem cada um. Os modelos têm na sua fundamentação leis mecânicas e cinéticas. Para a aplicação de (Silva, 2018) no Matlab®, a lei constitutiva considerada tem a forma presente na Equação 1.

$$\sigma - \sigma_0 = E * (\varepsilon - \varepsilon_0 - \varepsilon_r * (\delta - \delta_0)) + \Theta * (T - T_0) \quad (1)$$

Para esta equação considerada, tem-se que o módulo de elasticidade, E, pode ser definido através da Equação 2.

$$E = E_A - \delta * (E_M - E_A) \quad (2)$$

É possível observar a dependência do módulo de elasticidade na relação constitutiva, explicitando a influência que esta variável apresenta na obtenção dos resultados.

Tomando como base o material de referência presente em (Ansys® - Mechanical APDL 19.2 Material Reference), tem-se a relação de tensão-deformação apresentada na Equação 3.

$$\sigma = E : (\varepsilon - \varepsilon_{tr}) \quad (3)$$

onde ε_{tr} é o tensor da deformação de transformação.

No início de um ciclo de carregamento-descarregamento, temos que a LMF do provete encontra-se inicialmente na fase de austenite. O diagrama tensão-deformação irá indicar uma reta linear, onde a mesma segue a lei de Hooke para o módulo de elasticidade austenítico do material.

A partir do ponto inicial de tensão da transformação direta (Austenite para Martensite), sabendo-se que o material não se comporta de forma uniforme, a transformação irá iniciar-se numa região do provete que apresente uma maior tensão e irá propagar-se para o resto do provete. A zona onde a transformação ocorre é mencionada na literatura (Zheng, He e Moumni, 2016a) como *Lüders-Like Bands (LLB)*, onde a mesma é caracterizada por apresentar grãos com alto grau de deformação, praticamente transformados em martensite, enquanto que fora da mesma existe a região onde os grãos predominantes possuem ainda baixa deformação na sua maioria na fase Austenítica. A interface entre ambas as regiões apresenta grãos parcialmente deformados.

Um estudo experimental conduzido por (Brinson, Schmidt e Lammering, 2004) indica que apesar da maior parte da transformação de fase ocorrer dentro das *LLB*, regiões fora destas podem apresentar transformações de Austenite para Martensite. Como apresentado por (Zheng, He e Moumni, 2016b) a presença das *LLB* em elementos compostos por NiTi policristalinos é um fenômeno complexo.

Isto deve-se ao facto de que nos grãos, existe uma interface entre as fases Martensítica e Austenítica, onde a primeira pode apresentar diversas variantes. Sendo assim, a formação das *LLB* é um resultado das interações termomecânicas entre a rede cristalina e os grãos.

A simulação utilizada para a comparação é de um ensaio de tração, onde é aplicada uma carga com uma tensão máxima obtida de 476 [MPa] a uma temperatura constante de 60 [°C]. Para a simulação no Matlab®, a única indicação geométrica para obtenção dos resultados é a área de 3,14 [mm²], enquanto que no Ansys® Workbench™ o desenvolvimento foi feito em um provete cilíndrico com mesma seção transversal e comprimento de 100 [mm].

A simulação no Ansys® Workbench™ foi realizada com a *Toolbox* para “Análise Estrutural Estática”, onde este determina deslocamentos, tensões, deformações e forças em estruturas e componentes provocados por cargas externas, podendo ser utilizado para análise de estruturas lineares e não-lineares.

A configuração do material foi feita diretamente no “*Engineering Data*”, onde as propriedades definidas podem ser observadas na Tabela 1.

A geração de malha foi feita pelas configurações padrões do Ansys® Workbench™ para malha global, uma vez que a geometria do modelo é relativamente simples, alterando-se somente o valor máximo para o tamanho de cada elemento para 0,02 [m] e a opção de preferências físicas para “Mecânica Não-Linear”. Possuindo um total de 11010 nós e 1437 elementos, da forma apresentada na Figura 1.

A configuração dos parâmetros de análise foi feita de forma que houvesse em uma das extremidades um carregamento linear até a força máxima de 1420,5 [N] e um descarregamento linear até 0 [N], enquanto a extremidade oposta permaneceria encastada, ou seja, como um suporte fixo. A opção de “*Large Deflection*” foi ativada, devido ao deslocamento no modelo, para que fosse levada em conta qualquer possível alteração na rigidez devido a uma modificação da forma.

Tabela 1 – Propriedades do material “Nitinol” configuradas no Ansys® Workbench™.

Elasticidade Isotrópica	
Módulo de Young	67 [GPa]
Coefficiente de Poisson	0,33
Superelasticidade	
Sigma SAS	432,8 [MPa]
Sigma FAS	502,8 [MPa]
Sigma SSA	351,9 [MPa]
Sigma FSA	151,8 [MPa]
Epsilon	0,067 [m/m]
Alpha	0

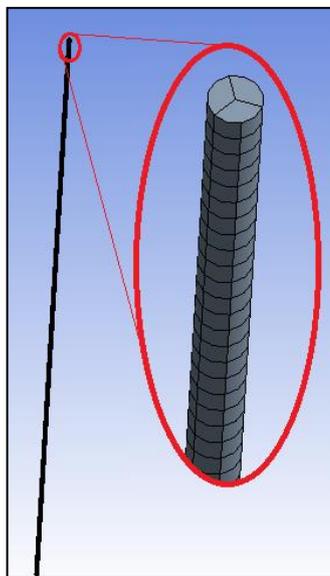


Fig 1 - Modelo com malha aplicada no software Ansys® Workbench™.

O método de solução foi definido pelo próprio software com a opção “*Program Controlled*”, onde o mesmo definiu como sendo o “Método Direto de Matrizes Esparsas” (SHARCNET, 2018).

Como dados de saída da simulação, foi escolhido o “*Stress Equivalent*” e a “*Equivalent Total Strain*” para que com esses valores, fosse possível a formação do diagrama tensão-deformação.

A análise e avaliação dos resultados apresentados por cada simulação serão discutidos, tendo como referência a lei constitutiva adotada por cada modelo.

3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Para obter-se uma melhor comparação, optou pela utilização do Matlab® para a geração do diagrama tensão-deformação. Sendo assim, os dados fornecidos pelo Ansys® Workbench™, apresentados na Figura 2a foram exportados ao Matlab® e os mesmos podem ser observados na Figura 2b.

A Figura 3 apresenta uma sobreposição de ambos os gráficos para uma comparação da magnitude entre as deformações. Pela comparação qualitativa dos gráficos, é possível observar que existem diferenças. Uma delas é a magnitude da deformação no diagrama tensão-deformação e a explicação baseia-se na diferença das leis mecânicas consideradas para a elaboração dos modelos constitutivos mencionadas anteriormente.

Durante a configuração das propriedades da liga na biblioteca do material no Ansys® Workbench™, a entrada do módulo de elasticidade pode receber somente um valor, sendo assim, assume-se que o mesmo refere-se ao valor da fase austenítica. Nesta fase estável, a liga estará situada para uma condição sem tensão atuante sobre a mesma para a temperatura utilizada na simulação e as temperaturas de transformação fornecidas.

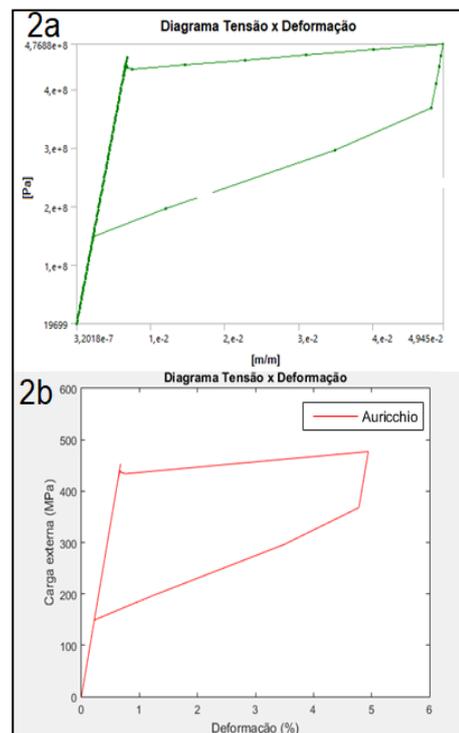


Fig 2 - a) Diagrama tensão x deformação obtido pelo método de Auricchio. b) Diagrama gerado no Matlab®.

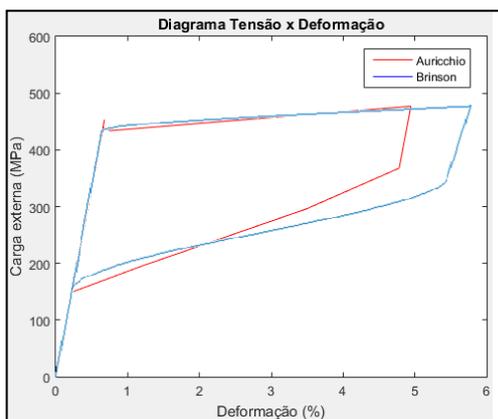


Fig 3 - Sobreposição dos diagramas tensão-deformação gerados pelos métodos de Auricchio e Brinson.

Fonte: Adaptado de Silva, 2018.

Observa-se que o modelo utilizado no Ansys[®] Workbench[™] depende do módulo de elasticidade austenítico da liga, enquanto que o modelo do Matlab[®] depende de uma relação em função da fração martensítica, δ , relacionando os módulos austenítico e martensítico.

Portanto a diferença da deformação para a mesma tensão máxima, obtida na liga sujeita a um carregamento uniaxial, para cada algoritmo deve-se ao modelo constitutivo adotado em cada um deles.

4–CONCLUSÕES

Conclui-se que ambos os modelos são capazes de simular o comportamento de SE em LMF, onde apresentaram o laço de histerese proposto. Destaca-se que, os modelos constitutivos utilizados seguem diferentes metodologias. Assim, apesar dos resultados apresentarem algumas semelhanças, principalmente no carregamento inicial, observou-se, entretanto, uma disparidade considerável na deformação do material, na carga máxima, quando os modelos foram confrontados.

Desta forma, devido a divergência dos modelos, os autores, acreditam que estudos experimentais são de grande importância para a determinação do modelo mais confiável, e seus devidos ajustes, com o intuito de obter modelos numéricos capazes de prever futuras aplicações a serem desenvolvidas.

REFERÊNCIAS

- Ansys[®] - Mechanical APDL 19.2 Material Reference, “Chapter 4: nonlinear material properties”. Disponível em: <https://ansyshelp.ansys.com/account/secure.d?returnurl=/Views/Secured/corp/v192/ans_mat/smas.html%23strsmareadlist1>. Acesso em: 03/11/2018.
- Auricchio, F. “A robust integration-algorithm for a finite-strain shape-memory-alloy superelastic model”. International Journal of Plasticity, Vol. 17, pp. 971-990, 2001.
- 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, Vol. 4, no. 2, pp. 229-242, 1993.
- Brinson, L. C., Schmidt, I., Lammering, R. “Stress-induced transformation behavior of a polycrystalline niti shape memory alloy: micro and macromechanical investigations via in situ optical microscopy”. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 52, pp. 1549-1571, 2004.
- Costa, M. J., Nunes, N. L. “Aplicação de ligas com memória de forma como dispositivo de segurança”. Dissertação, Escola Naval, Alfeite, 2016.
- Huang, W. M., Ding, Z., Wei, J., Zhao, Y., Purnawali, H. “Shape memory materials”. Materialstoday, Vol. 13, no. 7-8, 2010.
- Lobo, P. S., Almeida, J., Guerreiro, L. “Semi-active damping device based on superelastic shape memory alloys”. Structures, Vol. 3, pp. 1-12, 2015.
- Paulo Jr, W. L. “Modelagem e avaliação numérica de absorvedores dinâmicos de vibrações sintonizáveis baseados em ligas com memória de forma”. Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2012.
- Qian, H., Li, H., Song, G. “Experimental investigations of building structure with a superelastic shape memory alloy friction damper subject to seismic loads”. Smart Materials and Structures, Vol. 25, no. 12, 2016.
- Santos, F. P. A. “Vibration control with shape-memory alloys”. Tese, Faculdade de Ciência

- e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.
- Silva, M. A. “Simulação do comportamento dinâmico de sistemas mecânicos vibratórios amortecidos pelo comportamento pseudo-elástico de ligas com memória de forma”. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2018.
- Simões, C. M. T., “Aplicação de ligas com memória de forma como sensores em engenharia civil”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.
- SHARCNET – Shared Hierarchical Academic Research Computing Network. “Types of solver”, disponível em: <https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/ans_bas/Hlp_G_BAS3_4.html>. Acesso em: 03/11/2018.
- Wang, B., Zhu, S. “Cyclic tension-compression behavior of superelastic shape memory alloys bar with buckling-restrained devices”. *Construction and Building Materials*, Vol. 186, pp. 103-113, 2018.
- Zheng, L., He, Y., Moumni, Z. “Effects of Lüders-like bands on niti fatigue behaviors”. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 83, pp. 28-44, 2016a.
- Zheng, L., He, Y., Moumni, Z. “Lüders-like band from motion and fatigue life of pseudoelastic polycrystalline niti shape memory alloy”. *Scripta Materialia*, Vol. 123, pp. 46-50, 2016b.