

Avaliação do Comportamento Dinâmico-Mecânico de Silicone Contendo Fitas de Ligas com Memória de Forma NiTi Embebidas

O. B. Melo^{1*}, C. J. de Araújo², M. S. O. Araújo¹, D. C. Bezerra²

¹ Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande – PB.

² Unidade Acadêmica de Engenharia de Mecânica – Universidade Federal de Campina Grande-UFCG
Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande – PB.

(Recebido em 04/08/2016; revisado em 28/11/2016; aceito em 07/04/2017)
(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

Este trabalho apresenta um estudo do comportamento termomecânico de um compósito ativo, obtido por meio da introdução de fitas de uma liga com memória de forma (LMF) de NiTi em uma matriz polimérica flexível (silicone). Nesse sentido, foram produzidos dois compósitos ativos com diferença no número de fitas NiTi inseridas (4 e 6 fitas). Inicialmente, as fitas foram obtidas a partir da laminação a frio de fios NiTi superelásticos, com subsequente tratamento térmico. Os fios e as fitas de NiTi, a matriz polimérica de silicone e os compósitos ativos formados foram caracterizados por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Análise Dinâmico-Mecânica (DMA), verificando o comportamento do módulo de elasticidade, fator de amortecimento e das temperaturas de transformação de fase. A partir dos resultados obtidos, verificou-se a capacidade de funcionalidade dos compósitos ativos Silicone-NiTi, os quais apresentam variação positiva de módulo de elasticidade e fator de amortecimento ao serem aquecidos acima das temperaturas de transformação das fitas NiTi. Os compósitos ativos contendo maior fração volumétrica de fitas de LMF NiTi apresentaram melhores valores dessas propriedades.

Palavras-chave: Silicone; Ligas com Memória de Forma; Ligas NiTi; Fitas; DMA.

Abstract:

This work present a study of the thermomechanical behavior of an active composite obtained by the introduction of NiTi shape memory alloy (SMA) ribbons into a flexible polymeric matrix (silicone). Accordingly, there were produced two active systems with difference in number of embedded ribbons NiTi (4 and 6 ribbons). Initially, the ribbons were obtained from cold rolling of NiTi superelastic wires, with subsequent heat treatment. The NiTi wires and ribbons, the silicone polymer matrix and the compounds systems formed were characterized by dynamic mechanical analysis (DMA) and Differential Scanning Calorimetry (DSC), checking behavior of elastic modulus, damping factor and phase transformation temperatures. From the results, it was verified the activation capacity of the Silicone-NiTi active systems, which had positive change of elastic modulus and damping factor when heated above transformation temperatures of the NiTi ribbons. The composite systems containing higher volume fraction of NiTi SMA ribbons showed the best values of these properties.

Keywords: Silicone; Shape Memory Alloys; NiTi Alloys; Ribbons; DMA.

1. Introdução

Os compósitos foram grandes precursores na busca de novos materiais com propriedades específicas e elevadas, que pudessem se adaptar e suprir as necessidades que um material tradicional não conseguiria. Nos últimos anos uma nova classe de compósitos tem ganhado grande destaque em aplicações tecnológicas mais avançadas. A possibilidade de unir dois ou mais materiais de diferentes características para obter estruturas capazes de sentir e adaptar-se às alterações do ambiente e às circunstâncias operacionais têm levado ao desenvolvimento de compósitos ativos ou inteligentes com

propriedades funcionais que tornam possível o controle de forma, vibração, capacidade de amortecimento, rigidez e/ou o monitoramento de sua integridade estrutural [1].

Uma forma de obtenção de compósitos ativos consiste na incorporação de ligas com memória de forma (LMF) como elementos atuadores no interior de matrizes, geralmente poliméricas, contendo ou não fibras de reforço.

As LMF, internacionalmente conhecidas por *Shape memory alloys* (SMA), possuem a capacidade de regressar à sua forma inicial por meio de um aumento de temperatura após sofrer uma deformação que se mantém após retirada do carregamento mecânico. A recuperação de forma é decorrente de uma transformação de fase reversível, no estado

*Email: oscarborgesmelo@gmail.com (O. B. Melo)

sólido, caracterizada pela transformação de uma fase de mais alta temperatura (austenita) para uma de menor temperatura (martensita), e vice-versa. A esse fenômeno dá-se o nome efeito memória de forma (EMF) e os materiais que apresentam esse comportamento são tidos intrinsecamente como atuadores termomecânicos. Outra importante característica desses materiais é a alta capacidade de amortecimento de vibrações mecânicas e de recuperar grandes deformações além do limite elástico, ou seja, deformação pseudoplástica (superelasticidade)[2]. Dentre os materiais metálicos que apresentam esses comportamentos, as LMF de NiTi são as mais comumente utilizadas devido a sua maior deformação recuperável, a seu maior trabalho mecânico produzido por unidade de peso e o seu comportamento termomecânico estável após um longo período de ativação reversível, além de sua excelente resistência a corrosão e biocompatibilidade[3]. Este tipo de material sofre deformações relativamente importantes, de até 10%, sem exibir qualquer plasticidade no domínio pseudoelástico[4]. Pesquisadores investigam muitas aplicações para LMF incorporadas em compósitos, incluindo o uso para mudança da curvatura das asas de aeronaves, bem como no controle de vibração e redução a danos de impacto [5].

Os compósitos resultantes da união de matrizes diversas com as LMF pertencem à uma classe de materiais classificados como "inteligentes" ou "funcionais", uma vez que algumas das suas propriedades estruturais podem ser alteradas pela transformação de fase da LMF quando um estímulo térmico é aplicado, e retornar para suas propriedades originais quando o estímulo é retirado[6].

Diante disso, a incorporação de LMF sob a forma de fios em uma matriz polimérica apresenta a vantagem de agregar pouca massa ao compósito podendo aumentar consideravelmente a sua rigidez e originar a possibilidade de obtenção de mudança controlada na sua forma. Porém, a interação entre os dois materiais tem sido um desafio, já que a maioria das aplicações requer transferência de carga do fio para a matriz. Tentativas iniciais feitas por alguns pesquisadores para incorporação de fios de LMF NiTi em polímeros foram mal sucedidas devido à fraca adesão interfacial[7, 8].

Uma quantidade considerável de trabalhos foi publicada a respeito do comportamento mecânico de compósitos reforçados com fios LMF, mas relativamente pouco tem sido relatado sobre tal comportamento para compósitos reforçados com fitas finas de LMF.

O requisito para materiais apresentarem maior rigidez e resistência mecânica em mais de uma direção tem sido um impulso na busca por materiais com propriedades isotrópicas. Com isso as fitas ganham destaque, pois possuem seção transversal retangular. Essa característica geométrica as torna mais eficientes que os fios, possibilitando o aumento da resistência bem como a rigidez do compósito, resultando em materiais compósitos com maior aderência a matriz e, assim, melhorando ainda mais as potencialidades de tais compósitos. Investigações recentes têm indicado que é possível que os compósitos incorporando fitas alcancem aumentos significativos em propriedades como resistência mecânica e

rigidez em mais de uma direção, em comparação com os correspondentes compósitos incorporando fios com seção transversal circular, já que nas fitas, devido sua geometria, o plano isotrópico pode ser mantido[9].

A obtenção de compósitos ativos com uma matriz flexível vem despertando o interesse de pesquisadores para a combinação entre a matriz de silicone e LMF para aplicações tecnológicas mais avançadas. Cada um dos dois materiais constituintes é bem conhecido por seu comportamento típico: NiTi exibe superelasticidade e o comportamento de memória de forma, e o silicone apresenta hiperelasticidade permitindo grandes deformações. Pesquisadores desenvolveram uma estrutura compósita tubular de matriz de silicone e fios LMF de NiTi propondo satisfazer as necessidades específicas da área biomédica para fabricação de *stents* [10]. Outra aplicação para compósitos ativos flexíveis são atuadores do tipo dobradiças, utilizados para implantar antenas, painéis solares e mastros de satélites, como a fabricação de estruturas implementáveis, com movimento de dobradiça, combinando uma matriz flexível de silicone e LMF, produzindo um protótipo de espelho destacável usado para refletir a luz solar sobre um painel solar em pequena escala [11]. Em outro trabalho, foi desenvolvido um dispositivo de prensão que consiste de três dedos, em que cada dedo é constituído por um atuador de dobradiça, com duas dobradiças [12].

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo analisar as propriedades dinâmico-mecânicas de compósitos ativos flexíveis originados por meio da incorporação de fitas de LMF de NiTi numa matriz polimérica de silicone. Estes compósitos podem ser capazes de sofrer alterações controláveis em função da temperatura em propriedades importantes como rigidez, amortecimento e forma da estrutura durante o aquecimento, devido a transformação de fase das fitas de LMF embebidas.

2. Materiais e Métodos

Para a realização deste trabalho foram adquiridos fios originalmente superelásticos de uma LMF NiTi com seção transversal circular (0,5mm de diâmetro), comercializados pela empresa brasileira Dental Morelli (São Paulo, SP).

2.1. Fitas de NiTi

Os fios NiTi foram submetidos a um processo de laminação a frio, gerando fitas com dimensões de 0,72x0,20mm. Posteriormente, as fitas obtidas foram submetidas a diferentes tratamentos térmicos, para aliviar os efeitos de encruamento causado pela laminação a frio. O tratamento ocorre em três estágios: aquecimento até a temperatura desejada, manutenção nesta temperatura durante um tempo determinado e finalmente o resfriamento a temperatura ambiente. Os tratamentos selecionados, variando temperatura e tempo, foram: 450°C/20min e 550°C/3h. Estes tratamentos foram escolhidos com o objetivo de converter os fios de LMF NiTi em estado superelástico para fitas que apresentem o efeito de memória de forma por aquecimento a

partir da temperatura ambiente, de aproximadamente 27°C [13].

2.2. Matriz Polimérica

A matriz polimérica flexível selecionada para receber as fitas laminadas de NiTi foi o Silicone do tipo RVT615A, fabricado pela empresa Momentive (Nova York, EUA). Este silicone é utilizado para aplicações em proteção de equipamentos eletrônicos, componentes e conjuntos contra choques, vibração, umidade, ozônio, poeira, produtos químicos e outras. A sua escolha ocorreu por possibilitar a obtenção de um compósito ativo flexível capaz de reagir aos estímulos térmicos e mecânicos gerados pelas fitas LMF e também permitir uma inspeção visual do alinhamento das mesmas. O silicone RVT615A é transparente, incolor e possui baixa viscosidade. Portanto, necessitou-se de um agente de cura (catalisador), fornecido pela mesma empresa,

denominado RVT615B. Ressalta-se que este silicone foi empregado em outro trabalho em um estudo sobre revestimento de isoladores elétricos [14].

2.3. Preparação dos Corpos de Prova

Para obter os corpos de prova dos compósitos ativos de silicone-NiTi, foi confeccionado um molde do tipo macho (encaixe) e fêmea (base) em ABS, por meio de prototipagem rápida (impressão 3D). Estes moldes possuem cavidades retangulares de 60,0x12,8x3,2mm. Essas dimensões foram selecionadas considerando o formato de corpos de prova para análise dinâmico-mecânica no modo *dual cantilever*, utilizando o equipamento de DMA modelo Q800, da TA Instruments. Esse molde permite a passagem e o alinhamento das fitas de NiTi, além de estanqueidade e abertura de modo a garantir a integridade do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 1.

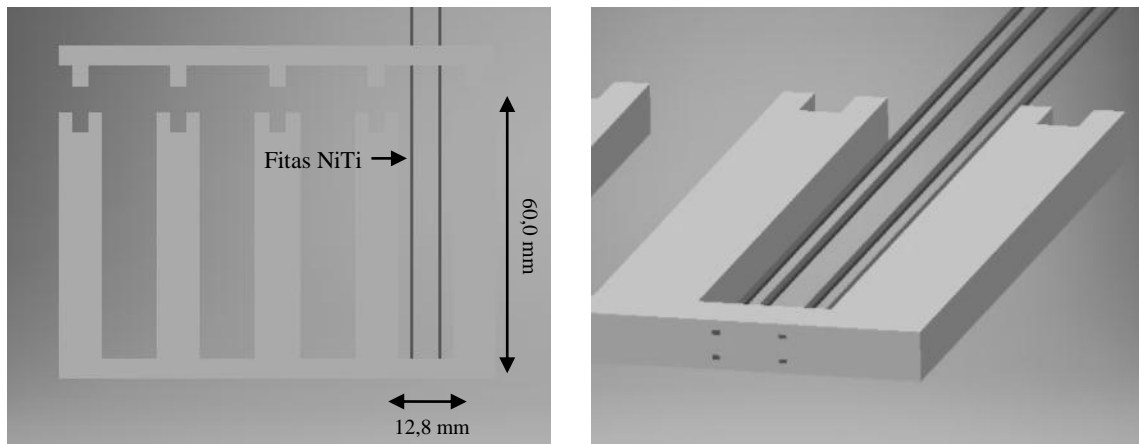


Figura 1. Esquema do molde em ABS confeccionado para preparação dos compósitos ativos silicone-NiTi, destacando as fitas alinhadas.

As fitas de NiTi tratadas termicamente foram introduzidas no sentido longitudinal no molde, variando seu número em 4 e 6, equivalentes a uma fração volumétrica de 1,83% e 2,75%, respectivamente. Em ambos os casos, as fitas foram distribuídas acima e abaixo do plano neutro dos corpos de prova, em configurações 2x2 (4 fitas) e 3x3 (6 fitas). Em seguida, o silicone foi misturado ao agente de cura numa proporção de 10:1 em massa, em baixa velocidade de agitação para evitar a criação de bolhas que pudessem vir a prejudicar as propriedades da matriz. Posteriormente, a mistura foi vertida no molde contendo as fitas de NiTi alinhadas. A cura do compósito ativo silicone-NiTi foi realizada a temperatura ambiente durante 24h. Por fim, foram obtidos corpos de prova do silicone puro (matriz), com 4 e 6 fitas embebidas na matriz (para cada tratamento térmico), denominados CPS, CP4 e CP6, respectivamente.

2.4. Caracterização dos Compósitos Ativos Silicone-NiTi

Os fios de NiTi originais e as fitas laminadas, assim como o CPS, os compósitos ativos CP4 e CP6, foram caracterizados por DMA (Análise Dinâmico-Mecânica) e DSC (Calorimetria

Diferencial de Varredura), verificando o módulo de elasticidade (E), fator de perda ou amortecimento ($Tan \delta$) e as temperaturas de transformação de fase destes materiais. Para os ensaios em DMA, os CP's foram testados em modo de viga bi engastada (*dual cantilever*) aplicando uma frequência de 1Hz com uma amplitude de 15 μ m a uma taxa de aquecimento de 2°C/min numa faixa de temperatura entre 30°C e 120°C, por limitação do equipamento, não permitindo operar com temperaturas inferiores a 30°C. Para as análises em DSC, utilizou-se uma taxa de aquecimento e resfriamento de 5°C/min numa faixa de temperatura de -60°C a 120°C. Neste caso, as temperaturas de transformação foram obtidas aplicando o método de cruzamento das tangentes aos picos DSC, de acordo com a norma ASTM F2082-06. Por fim, foi realizada uma análise de imagens em MEV no fio, na fita laminada e no CP4 com fitas submetidas ao tratamento térmico a 550°C/3h para verificar a qualidade superficial dos materiais e a qualidade da interface entre a fita e a matriz. Para esse CP4 foi feito um corte transversal no centro do corpo de prova utilizando a máquina de corte modelo VH 20.000 RPM, da marca Polimax. Os ensaios de DMA e DSC foram realizados em equipamentos da TA Instruments,

respectivamente modelos DMA Q800 e DSC Q20. A análise de imagens foi realizada em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo Vega3, da marca Tescan.

3. Resultados e Discussões

As superfícies dos fios NiTi, no estado como recebido, juntamente com a fita laminada e tratada termicamente a 550°C por 3h foram analisadas em MEV com aumentos de 500x. Já o compósito ativo CP4 (550°C por 3h) foi avaliado qualitativamente com aumentos de 15x, 17x e 150x. As imagens obtidas estão apresentadas nas Figuras 2 e 3.

Na Figura 2 é perceptível a diferença de rugosidade superficial entre o fio e a fita NiTi laminada e tratada

termicamente. Qualitativamente, constata-se que o processo de laminação causa maior rugosidade na fita em comparação com o fio devido aos esforços mecânicos resultantes da interação entre os rolos de laminação e o material.

Nas imagens do CP4 apresentadas na Figura 3 observa-se uma região de descolamento na parte lateral (espessura) de uma das fitas NiTi, provavelmente originada durante a operação de corte. No entanto, a adesão da área superficial no sentido da largura da fita NiTi na matriz é mais importante, sugerindo uma boa qualidade da interface entre fita e matriz, gerada pela alteração da rugosidade superficial e da geometria na forma de fitas embebidas no silicone.

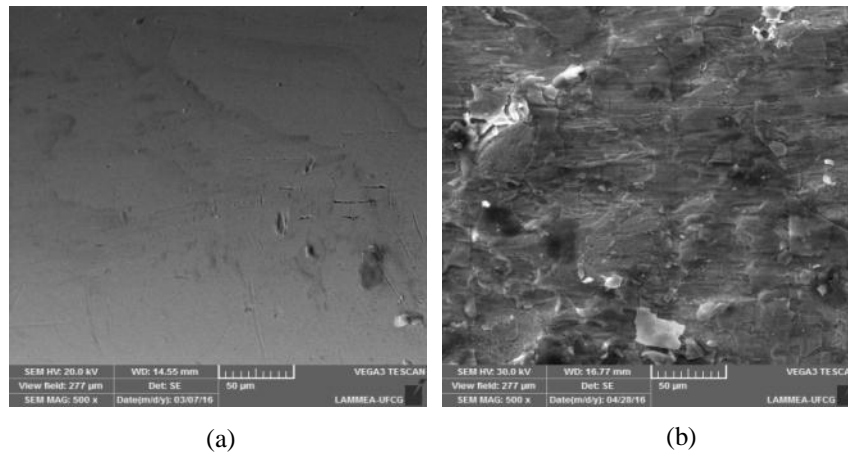


Figura 2. Imagens de superfícies obtidas em MEV com aumento de 500x. (a) Fio NiTi. (b) Fita NiTi após laminação e tratamento térmico a 550°C por 3h.

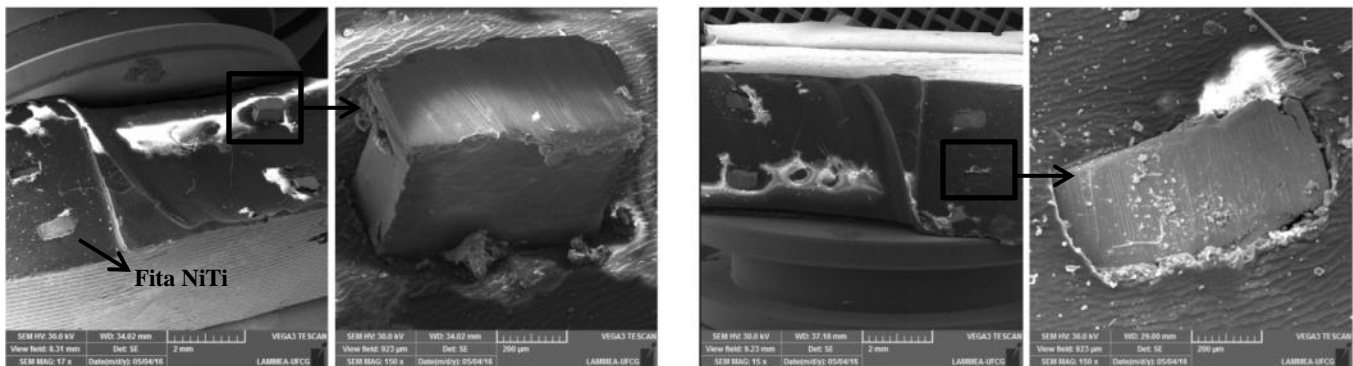


Figura 3. Imagens da seção transversal dos compósitos silicone-NiTi (CP4) obtidas em MEV com aumento de 150x.

No que diz respeito à análise térmica dos materiais, a Figura 4 permite identificar os picos característicos de transformação de fase dos fios e fitas de LMF NiTi e a Tabela 1 as temperaturas críticas de transformação de fase autenita (A_s e A_f) e fase R (R_s , R_f), bastante evidente em LMF NiTi principalmente após tratamentos térmicos ou termomecânicos [15,16], assim como as temperaturas de pico da transformação, R_p e A_p . É possível notar que os picos de transformação de fase para as duas diferentes fitas se

deslocam para faixas de temperaturas mais altas. Na fita NiTi com tratamento térmico a 450°C/20min, há um pequeno deslocamento dos picos, decorrente do tratamento aplicado. Tomando como referência o aquecimento, constata-se um aumento das temperaturas de transformação da ordem de 11,5°C destas fitas com relação ao fio NiTi. Já para a fita com tratamento térmico a 550°C/3h ocorre um maior deslocamento dos picos, da ordem de 26,2°C.

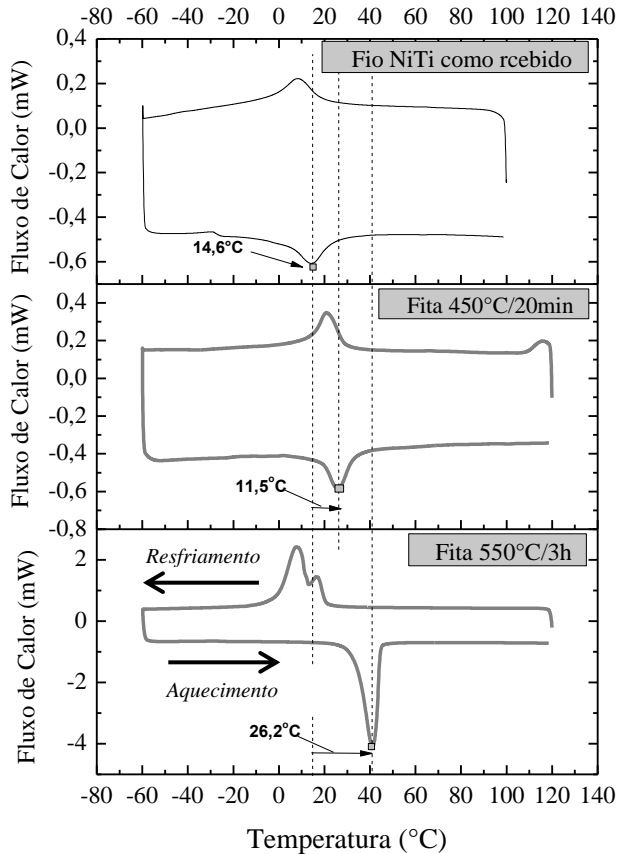


Figura 4. Caracterização em DSC do fio NiTi como recebido (Superelástico) e das fitas com tratamento térmico a 450°C/20min e 550°C/3h.

Tabela 1. Temperaturas de transformação de fase dos fios e das fitas de NiTi com tratamentos térmicos de 450°C/20min e 550°C/3h.

	Temperaturas de Transformação de Fase (°C)					
	R _S	R _F	R _P	A _S	A _F	A _P
Fio	17,9	-3,9	8,5	3,3	27,3	14,6
Fita 450°C/20min	30,5	13,8	21,1	12,7	49,9	26,3
Fita 550°C/3h	20,0	13,6	14,6	26,3	48,2	40,9

Além disso, para essa fita em particular é possível identificar o surgimento de mais um pico de transformação de fase no resfriamento, característico da fase martensita, o tratamento térmico realizado foi de longa duração (3h). À medida que a LMF NiTi é tratada termicamente em temperaturas mais elevadas, durante um longo período de tempo, as temperaturas da fase martensita (M_s e M_f) tendem a aumentar enquanto aquelas da fase R (R_s e R_f) tendem a diminuir, fazendo os picos de transformação associados a

estas fases se aproximarem ou se sobrepor, devido a formação de precipitados ricos em Ni [17].

Na Figura 5 é possível verificar a curva de DSC obtida para o silicone RVT615A, com a identificação da sua temperatura de transição vítrea (T_g), da ordem de -47°C.

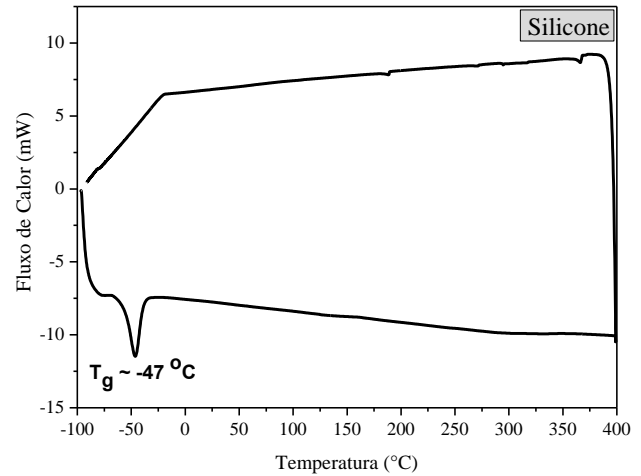


Figura 5. Caracterização térmica da matriz de silicone RVT615A em DSC

A partir dos resultados obtidos em DMA, mostrados na Figura 6, observa-se um importante aumento do módulo de elasticidade durante o aquecimento das fitas NiTi. Para a fita com tratamento de 450°C/20min esse módulo cresce de 21GPa a 30°C para 49GPa a 120°C. Já para a fita submetida ao tratamento de 550°C/3h o crescimento do módulo é maior, de 37GPa a 30°C para 95GPa a 120°C. Em uma comparação entre o fio original e as fitas laminadas a frio e tratadas termicamente, é importante notar que as fitas com tratamento de 550°C/3h apresentaram maior módulo de elasticidade após a transformação de fase, em altas temperaturas (95GPa). Sendo assim, trabalhar com essas fitas é mais propício quando se deseja alcançar melhores propriedades em temperaturas mais elevadas.

Constata-se também, a partir da Figura 6 em comparação com a Figura 4, que as temperaturas da transformação direta (aquecimento, A_s e A_f) medidas em DMA são superiores, em aproximadamente 20°C, às aquelas obtidas por DSC. Essa diferença ocorre devido a uma inércia de transferência de calor no DMA quando se trabalha com materiais metálicos, levando a uma diferença entre a leitura do termopar do equipamento e a real temperatura da amostra em análise [18].

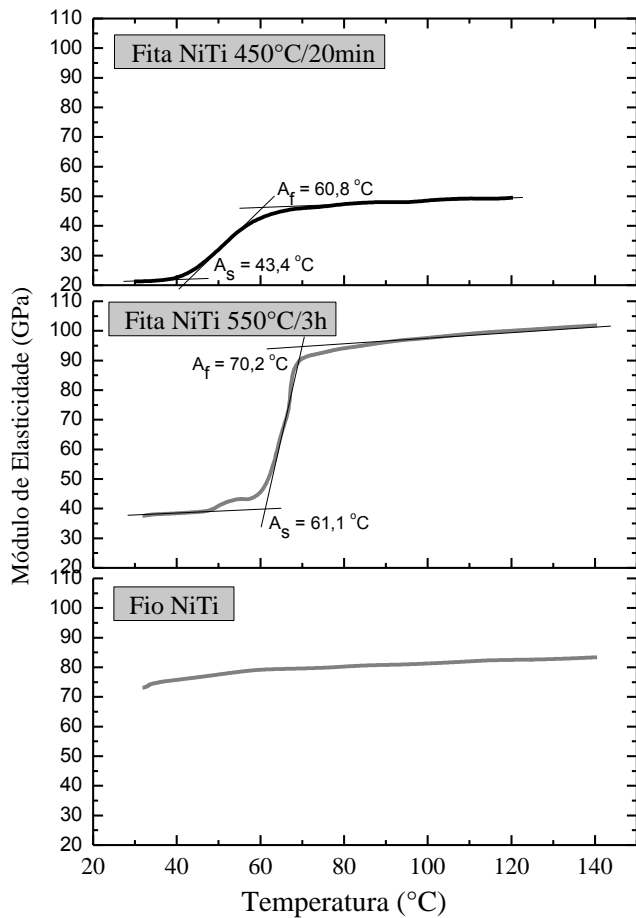


Figura 6. Variação do módulo de elasticidade em função da temperatura durante o aquecimento do fio NiTi como recebido (superelástico) e das fitas de NiTi com tratamentos térmicos a 450°C/20min e 550°C/3h.

A incorporação de diferentes quantidades de fitas da LMF NiTi no módulo de elasticidade dos compósitos ativos são apresentados na Figura 7. Conforme mencionado

anteriormente, as frações volumétricas das fitas LMF NiTi foram de apenas 1,83% e 2,75%. Verifica-se, como esperado, que o módulo de elasticidade do silicone é afetado pela introdução dessa fração volumétrica de fitas de LMF. Para as fitas com tratamento térmico de 550°C/3h (Figura 7b), na temperatura de 30°C, a introdução de 4 fitas NiTi (1,83%) quadruplica o módulo de elasticidade do compósito ativo silicone-NiTi, enquanto que para 6 fitas (2,75%) o valor do módulo nessa temperatura sofre um aumento de quase 10 vezes. Para o tratamento térmico de 450°C/20min (Figura 7c), praticamente não se observou influência da quantidade de fitas NiTi, de modo que na temperatura de 30°C o aumento de módulo foi de aproximadamente 8 vezes, possivelmente porque para esse tratamento o ensaio inicia-se praticamente na fase austenítica. Já no tratamento de 550°C/3h houve um aumento significativo da A_f , permitindo uma maior variação do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura e da fração volumétrica.

Durante o aquecimento dos compósitos ativos silicone-NiTi, observa-se na Figura 7 um crescimento gradativo do módulo de elasticidade já a partir de aproximadamente 40°C, como resultado da mudança de fase martensita-austenita das fitas, para ambos os tratamentos térmicos. O aumento do módulo de elasticidade com a temperatura indica um acréscimo na rigidez do material, resultando em uma menor dissipação de energia pela estrutura correspondente a altas temperaturas.

Ao final do aquecimento, a uma temperatura de 120°C, as fitas NiTi na fase austenítica se encontram mais rígidas (Figura 6) contribuindo para o aumento no módulo de elasticidade, ou seja, levando a um melhoramento das propriedades mecânicas de todo o compósito ativo. Na temperatura de 120°C os compósitos ativos silicone – NiTi tem módulos de elasticidade aumentados, respectivamente, de 2,5 e 3 vezes, para os tratamentos de 450°C/20min e 550°C/3h, independentemente da quantidade de fitas e com relação ao silicone puro. Estes aumentos são inferiores aqueles observados na temperatura de 30°C pois o silicone puro também aumenta de rigidez durante o aquecimento.

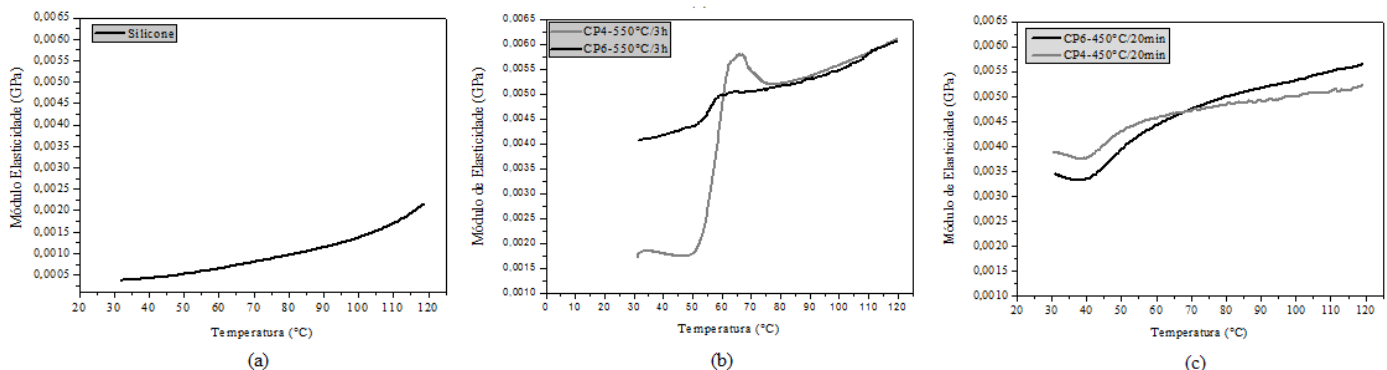


Figura 7. Variação do módulo de elasticidade em função da temperatura durante o aquecimento para os corpos de prova de (a) Silicone (b) dos CP4 e CP6 com fitas de tratamento a 550°C/3h e (c) a 450°C/20min.

Na Figura 8 é possível observar a variação de $Tan\delta$ (amortecimento) em função da temperatura dos CP4 e CP6 em comparação com a matriz de silicone. Como esperado, constata-se que o comportamento é inverso aquele observado para o módulo de elasticidade (Figura 7). Percebe-se que o silicone inicia com maiores valores de $Tan\delta$ devido sua mais alta ductilidade na temperatura de 30°C. No geral, nessa temperatura, os valores de amortecimento situam-se entre 0,06 e 0,08. Verifica-se também que os valores de $Tan\delta$, tanto para o CP4 quanto para o CP6 (450°C/20min), diminuem juntos e que quanto maior a fração volumétrica de fitas, maior a perda no fator de amortecimento, consequentemente, mais rígido o sistema silicone - NiTi. No final, na temperatura de 120°C, todos os CP's tendem para um mesmo valor de amortecimento, situado em torno de 0,01.

Ressalta-se que com esses compósitos ativos, é possível conferir funcionalidade ao silicone embebendo uma pequena fração volumétrica de fitas de LMF NiTi. Assim, torna-se possível produzir uma mudança controlada de forma do sistema silicone - NiTi por meio de uma mudança controlada de temperatura. Na Figura 9, por meio de uma sequência de imagens e medição de temperatura, revela-se esse comportamento funcional para o CP6 (550°C/3h), indicando a criação de uma espécie de “pele artificial” sensível ao calor. Ressalta-se que esse comportamento mostrado na Figura 9, de recuperação de forma do sistema silicone - NiTi após imposição de uma deformação pseudoplástica seguida de aquecimento subsequente, pode também ser obtido por passagem de corrente elétrica nas fitas NiTi, provocando o aumento de temperatura por efeito Joule.

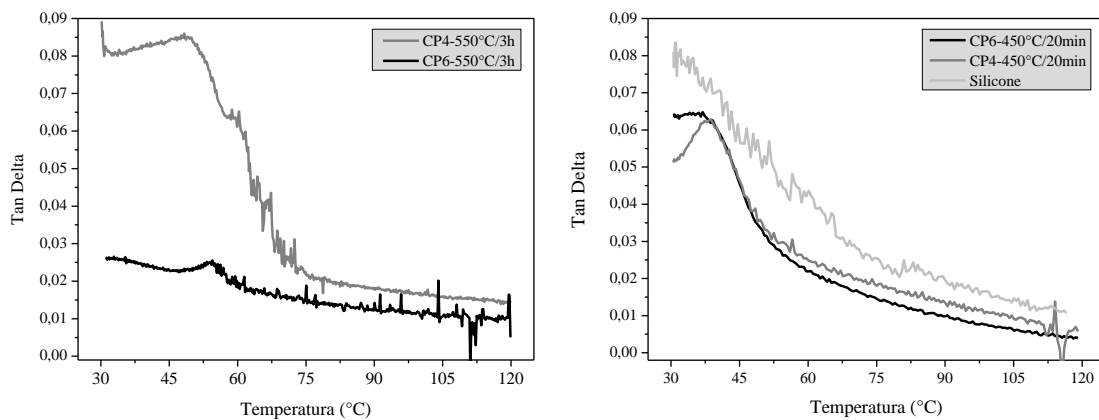


Figura 8. Variação de amortecimento ($\tan \delta$) em função da temperatura para o silicone e os (a) compósitos CP4 e CP6 com fitas NiTi submetida aos tratamentos a 550°C/3h e (b) CP4 e CP6 com fitas tratadas a 450°C/20min.

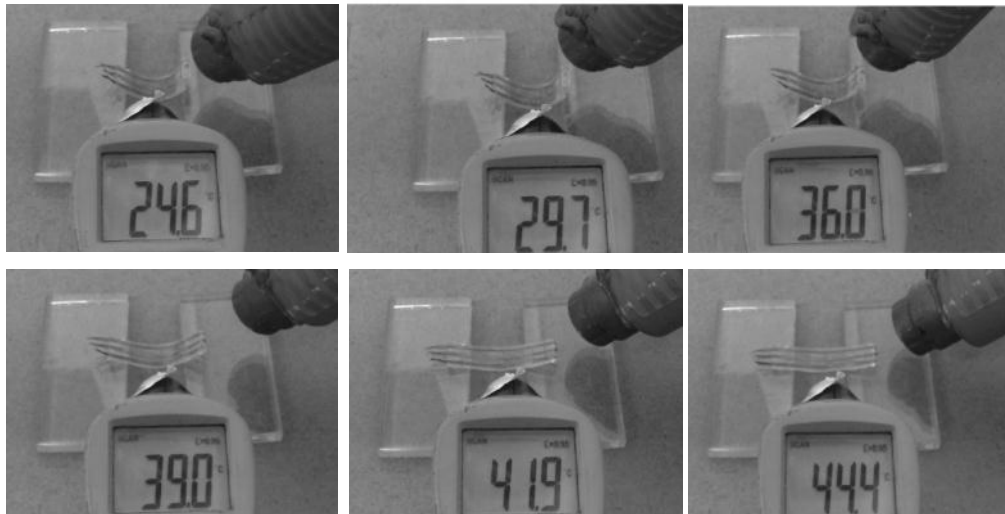


Figura 9. Funcionalidade do compósito ativo Silicone-NiTi (CP6, 550°C/3h) com estímulo de temperatura, utilizando um soprador térmico.

Considerações Finais

Neste estudo, a fabricação de compósitos ativos flexíveis por meio da incorporação de fitas NiTi, com tratamentos térmicos de 450°C/20min e 550°C/3h, em uma matriz de silicone, foi relatada e discutida. Os resultados obtidos neste estudo sugerem que as características de rigidez (módulo de elasticidade) dos compósitos ativos com matriz de silicone, durante o aquecimento até uma temperatura máxima limitada, podem ser melhoradas mesmo para uma pequena fração volumétrica de fitas inseridas, de 1,83%. Com aumento dessa fração volumétrica, melhores propriedades são alcançadas. Quando 2,75% de fração volumétrica de fitas NiTi são incorporados a matriz de silicone observa-se um efeito mais reduzido da capacidade de amortecimento ($Tan \delta$), devido a maior rigidez do compósito ativo gerado pelo número de fitas.

Vale ressaltar que, de um ponto de vista qualitativo, os compósitos ativos silicone - NiTi apresentaram uma boa adesão entre as fitas e a matriz, devido à maior rugosidade e maior área superficial da fita, promovida durante o processo de laminação. Essa adesão suficiente possibilitou um bom nível de funcionalidade ao compósito ativo desenvolvido.

Finalmente, este estudo permitiu verificar que os compósitos ativos obtidos utilizando matriz flexível em silicone, representam uma opção de desenvolvimento de material para aplicação em projetos aeronáuticos ou biomédicos, podendo ser aplicados como atuadores térmico ou elétrico (efeito Joule) para controles de rigidez, de amortecimento e consequentemente de vibração, além de controle de forma, dentre outras aplicações específicas que podem requerer o potencial ativo que estas estruturas podem fornecer.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento dos seguintes projetos: INCT de Estruturas Inteligentes em Engenharia (Processo nº 574001/2008-5), Casadinho UFCG-UFRJ-ITA (Processo nº 552199/2011-7), CT-Aeroespacial 22/2013 (Processo nº 402082/2013-3) e PQ 1D (Processo nº 304658/2014-6).

Referências

- [1] Vilar, Z. T., Santos, A. G., Cavalcanti, M. B. A., Araújo, C. J., Amorim Jr, W. F. Caracterização da funcionalidade de um compósito ativo CFRP/Ni-Ti. Revista Eletrônica de Materiais e Processos. vol .7.1, p. 26-33, 2012.
- [2] Shaw, J. A.; Kyriakides, S. Thermomechanical aspects of Ni-Ti. Journal of Mechanics and Physics of Solids. vol.43, p.1243-1281, 1995.
- [3] Duerig, T. W., Pelton A. R. Ti-Ni Shape Memory alloys. Materials Properties Handbook: Titanium alloys. USA, ASM international. p. 1035-1048, 1994.
- [4] Favier, D., Liu, Y., Orgeas, L., Sandel, A., Debove, L., and Comte-Gaz, P. Influence of thermomechanical processing on the superelastic properties of a Ni-rich nitinol shape memory alloy. Mater. Sci. Eng A, 429, p. 130–136, 2006.
- [5] Beauchamp, C.H., Nadolink, R. H., Dickinson, S.C., Dean, L. M. Shape memory alloy adjustable camber (SMAAC) control surfaces, in: Proceedings of the First European Conference on Smart Structures and Material, Glasgow. p 189-192, 1992.
- [6] Bodaghi, M., Shakeri, M., Aghdam, M.M., Thermo-mechanical behavior of shape adaptive composite plates with surface-bonded shape memory alloy ribbons. Composite Structures. vol. 119, p. 115-133, 2015.
- [7] Rogers, C. A., Liang, C. Baker, D. K.: Dynamic control concepts using shape memory alloy reinforced plates, Smart Materials, Structures and Mathematical Issues, Technomic Publishing Company, Inc., 1989.
- [8] Rogers, C. A. Active vibration and structural acoustic control of shape memory alloy hybrid composites: Experimental results. Jnl. of Acoustical Society of America. vol. 88, p. 2803, 1990.
- [9] Chen, P. E., Lewis, T.B., Stress analysis of ribbon reinforced composites. Polymer Engineering and Science. vol 10, n 1, p. 43-47, 1970.
- [10] Rey, T., Le Cam, J.-B., Chagnon, G., Favier, D., Rebouah, M., Razan, F., Robin, E., Didier, P., Heller, L., Faure, S., Janouchova, K. An original architected NiTi silicone rubber structure for biomedical applications. Materials Science and Engineering C 45. p. 184-190, 2014.
- [11] Wang W., Rodrigue H., Ahn, S-H. Deployable Soft Composite Structures. Scientific Reports, doi: 10.1038/srep20869, 2016.
- [12] Wang W., Rodrigue H., Kim H-I., Han M-W., Ahn S-H., Soft composite hinge actuator and application to compliant robotic gripper. Composites Part B. doi: 10.1016/j.compositesb.2016.05.030, 2016.
- [13] Grassi, E. N. D. Comportamento Termomecânico de Minimolas Superelásticas de NiTi: Influência de Tratamentos Térmicos. 2014. 115f. [dissertação de mestrado]. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande; 2014.
- [14] Bezerra, D. C. Revestimento de isoladores elétricos utilizando Borracha de silicone/albumina trihidratada/nanosilica. [tese de doutorado]. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande; 2014.
- [15] Lagoudas, D.C. Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications. Texas: Springer, 2008. ISBN 9780387476841.
- [16] Otsuka, K.; Wayman, C.M. Shape Memory Materials. Cambridge University Press, 1998. ISBN 0 521 663849.
- [17] Menard, K.; Dynamic Mechanical Analysis: A Practical Introduction. 2º ed. CRC Press, Boca Raton, 2007. p. 205.

- [18] Vilar, Z. T. Uma análise crítica da utilização de um analisador dinâmico-mecânico (DMA) no estudo de ligas com memória de forma. [trabalho de conclusão de curso]. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande; 2010.