

## Caracterização da funcionalidade de um compósito ativo CFRP/Ni-Ti

Z. T. Vilar\*, A. G. dos Santos, M. B. A. Cavalcanti, C. J. de Araujo, W. F. de Amorim Jr

Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA), Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica  
Universidade Federal de Campina Grande, Rua Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, CEP 58429-140, Campina Grande – Paraíba

(Recebido em 18/07/2011; revisado em 28/11/2011; aceito em 26/12/2011)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

### Resumo:

A possibilidade de unir dois ou mais materiais diferentes para obter estruturas capazes de sentir e adaptar-se às alterações do ambiente e às circunstâncias operacionais, têm conduzido ao desenvolvimento de compósitos ativos com propriedades funcionais que tornam possível o controle de forma, vibração, rigidez e/ou o monitoramento de sua integridade estrutural. Estas características são muito bem aceitas em aplicações tecnológicas mais avançadas. Neste contexto, nesse estudo foram fabricados compósitos ativos a partir de folhas de pré-impregnados (pre-pregs) de epóxi com fibras de carbono (CFRP) e fios finos de ligas com efeito de memória de forma (LMF). Assim, fios pré-deformados de uma LMF Ni-Ti foram inseridos entre as folhas de CFRP e tiveram sua recuperação da forma restringida durante o ciclo de cura do compósito. Foram produzidos dois tipos de compósitos com diferença de inclinação das fibras de carbono em relação aos fios Ni-Ti. Os fios Ni-Ti e os compósitos CFRP/Ni-Ti foram caracterizados por Análise Dinâmico-Mecânica (DMA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), verificando o comportamento do módulo de elasticidade e as temperaturas de transformação de fase durante o aquecimento. O potencial de ativação dos compósitos CFRP/Ni-Ti obtidos foi analisado. O compósito CFRP/Ni-Ti com menor módulo de elasticidade apresentou um considerável aumento no valor de rigidez durante o aquecimento, demonstrando seu potencial de ativação. Os testes em DSC indicaram a existência de esforço mecânico nos fios inseridos no CFRP, comprovando também a presença de transferência de carga entre os fios Ni-Ti e o CFRP.

**Palavras-chave:** Compósitos ativos; ligas com memória de forma; ligas Ni-Ti; análise dinâmico-mecânica (DMA), calorimetria exploratória diferencial (DSC).

### Abstract:

The possibility of uniting two or more different materials to obtain structures capable to feel and adapt to environment alterations and operational conditions, has been leading to the development of active composites with functional properties that makes possible the control of shape, vibration, rigidity and/or structural integrity monitoring. These characteristics are very well accepted in modern technological applications. In this context, active composites were manufactured using pre-impregnated (Pre-Pregs) of epoxy with carbon fibers (CFRP) and Ni-Ti shape memory alloy (SMA) thin wires embedded and tensioned in different conditions. The Ni-Ti SMA wires and the obtained CFRP/Ni-Ti composites were characterized by Dynamical Mechanical Analyses (DMA) and Differential Scanning Calorimetry (DSC), verifying the behavior of the storage modulus and the temperature of phase transformation when heated. The activation capability of Ni-Ti wires embedded into the CFRP matrix was checked by verification of stiffness increase of the CFRP/Ni-Ti composite. Ni-Ti wires embedded in the CFRP matrix and free have different phase transformation temperatures indicating the presence of mechanical stresses in the embedded wires.

**Keywords:** Active composites; shape memory alloys; Ni-Ti alloys; dynamical mechanical analyses (DMA); differential scanning calorimetry (DSC).

### 1. Introdução

A evolução natural dos materiais estruturais nos últimos 40 anos desenvolveu-se na busca de propriedades específicas e elevadas, com a necessidade de proporcionar uma flexibilidade e uma funcionalidade maior aos componentes. Essa evolução foi alavancada pelo grande interesse e uso de materiais compósitos em várias aplicações. Desta tendência

crescente surgiu a exploração das propriedades originais que os compósitos avançados de hoje oferecem em relação às propriedades que são difíceis de obter com os materiais estruturais tradicionais tais como o aço, o alumínio ou a madeira.

Por outro lado, a descoberta do efeito de memória de forma (EMF) por Chang e Read em 1930 é uma das etapas revolucionárias no campo da pesquisa em materiais metálicos

\*Email: [zoro.ufcg@gmail.com](mailto:zoro.ufcg@gmail.com) (Z. T. Vilar)

ativos. Desde então, ligas metálicas que apresentam este fenômeno (Ligas com Memória de Forma – LMF) têm sido bastante estudadas e usadas como atuadores em muitas aplicações por permitirem atingir características importantes tais como dimensões reduzidas e grande esforço de recuperação, causado pela mudança de fase reversível (martensita – austenita) que dá origem ao fenômeno EMF [1,2]. Dessa forma, uma nova aplicação para estes materiais foi desenvolvida quando surgiu a idéia de inserir atuadores de LMF em compósitos, com o objetivo de proporcionar controle estrutural. Este tipo de material foi nomeado como compósito híbrido de liga com memória de forma (CHLMF) [3].

Nesse contexto, elementos fabricados a partir de LMF são considerados intrinsecamente como atuadores termomecânicos em virtude da capacidade que apresentam de produzir um deslocamento importante, associado a uma recuperação de deformação “aparentemente plástica”, quando submetidos a uma variação de temperatura [4]. Este deslocamento pode corresponder a uma deformação introduzida, e recuperável por simples aquecimento, de até 8% em tração uniaxial. Essa reversibilidade da forma responsável pela produção de um deslocamento, muitas vezes contrário à dilatação térmica dos metais convencionais, pode ser acompanhada de um trabalho mecânico externo caso o material atuador esteja submetido a um carregamento mecânico durante seu aquecimento. Assim, um fio com EMF pode erguer um peso quando aquecido [5]. Alternativamente, se a deformação recuperável por EMF é restringida de alguma forma quando o material é aquecido, uma força considerável pode ser gerada. Vale ressaltar que qualquer um dos modos de transferência de calor (condução, convecção e radiação) pode ser usado para acionar o elemento de LMF. Além disso, o deslocamento ou força produzida pode ser resultante de qualquer tipo de carregamento mecânico, ou seja, o atuador de LMF responde sob carregamento axial, torção, flexão ou uma combinação destes, contrariamente aos atuadores bimetalicos, por exemplo, que respondem a temperatura trabalhando apenas em flexão [6].

Uma estrutura inteligente, como definido por Rogers e colaboradores em 1989 [3], tem funções múltiplas como de sensor, atuador e processador. Estas estruturas são sistemas que têm a capacidade de perceber alterações nas condições operacionais e/ou ambientais e de promover adaptações através de um conjunto de atuadores, visando manter o comportamento em um nível satisfatório previamente definido. Este processo é conduzido através da integração de sensores, atuadores e microprocessadores avançados na estrutura [7]. A função dos atuadores é realizar as intervenções no sistema de forma que a variável de controle responda adequadamente aos estímulos externos ou aos sinais de controle. Os sensores são responsáveis pela percepção do comportamento real da variável de controle e sua transmissão

aos controladores, que por sua vez tem como função comparar o valor real da variável de controle, ao valor desejado para esta variável e determinar a ação a ser executada pelo atuador, de forma a minimizar a diferença entre o comportamento real e o desejado [8,9].

Uma forma de obtenção de compósitos ativos, capazes de tornarem-se uma “estrutura inteligente”, consiste na integração de fios finos de LMF como elementos atuadores no interior de matrizes, geralmente poliméricas, contendo ou não fibras de reforço. Esses fios de LMF possuem potencial elevado de recuperação de forma, com diâmetros situados entre 0,075 e 0,5 mm. Isto permite a sua integração direta em compósitos reforçados com fibras tradicionais em matriz polimérica, sem comprometer a integridade estrutural do sistema formado.

Na comparação com outros materiais atuadores, existem vantagens adicionais importantes oferecidas pelas LMF, tais como: deformações reversíveis elevadas (até 8%), capacidade de molhabilidade elevada, mudanças reversíveis de propriedades mecânicas e físicas, habilidade de gerar tensões extremamente elevadas durante a recuperação de forma por aquecimento (até 800 MPa), alto desempenho por longo tempo do seu período de vida útil e baixa complexidade de fabricação, exibindo, além disso, propriedades notáveis quando se toma por base o comportamento termomecânico [10].

Neste cenário, a incorporação de LMF na forma de fios finos aos compósitos poliméricos reforçados com fibras de carbono (CFRP - Carbon Fiber Reinforced Polymer) pode resultar em estruturas ativas capazes de provocar alterações em propriedades importantes como rigidez, amortecimento, força de recuperação e frequência natural da estrutura [11], e que são dotados da capacidade de auto-adaptação às condições existentes no meio, ou de exibirem propriedades variáveis de acordo com o controle de um parâmetro externo (temperatura ou corrente elétrica).

O conceito básico deste compósito híbrido de CFRP/LMF consiste em fios finos de LMF como atuadores e alguns sensores que podem ser embebidos entre as camadas de CFRP. O efeito da ativação é obtido aquecendo os fios de LMF acima das temperaturas de transformação, quando eventuais danos micromecânicos são detectados pelos sensores [12]. A idéia é simples, a nível estrutural, um sistema integrado de sensores fornece dados da estrutura e de seu carregamento a um processador e a um sistema de controle que comunica por sua vez os atuadores para modificar as propriedades da estrutura para uma condição apropriada, fornecendo assim benefícios imensos em aplicações estruturais [13].

Neste contexto, para este estudo foram fabricadas duas placas de compósitos ativos a partir de folhas pré-impregnadas de epóxi com fibras de carbono (CFRP) usando

duas inclinações diferentes ( $0^\circ$  e  $90^\circ$  em relação aos fios de Ni-Ti) e fios finos de uma LMF Ni-Ti pré-deformados em tração. Os fios Ni-Ti e os compósitos CFRP/Ni-Ti foram caracterizados por Análise Dinâmico-Mecânica (DMA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), verificando o comportamento do módulo de armazenamento e as temperaturas de transformação de fase durante o aquecimento. O potencial de ativação dos compósitos CFRP/Ni-Ti obtidos foi analisado e discutido.

## 2. Materiais e Métodos

Os compósitos CHLMF desenvolvidos neste estudo consistem de quatro camadas de pré-impregnados de resina epóxi de alta resistência com fibras de carbono unidirecionais (P0007, AS4/8552 RC34 AW194), fabricados pela *Hexcel Composites* (Espanha). Cinco fios Ni-Ti com diâmetro de 0,29 mm foram pré-deformados e distribuídos uniformemente ao longo do plano neutro da viga formada, conforme ilustrado na Figura 1.

Para este estudo foram fabricadas duas amostras de compósitos com diferentes configurações, denominadas de CFRP/Ni-Ti 1 e CFRP/Ni-Ti 2. Na primeira todas as camadas de CFRP foram dispostas na mesma direção e formando um ângulo de  $0^\circ$  (paralelo) em relação aos fios Ni-Ti. Para o segundo compósito, as duas camadas mais internas de CFRP, que estão em contato com os fios Ni-Ti, foram dispostas com uma inclinação de  $90^\circ$  (perpendicular) em relação aos fios enquanto as duas outras camadas de CFRP foram orientadas na mesma direção dos fios Ni-Ti. As dimensões dessas amostras de compósito foram definidas com base no equipamento DMA empregado para as medições de variação de rigidez em função da temperatura.

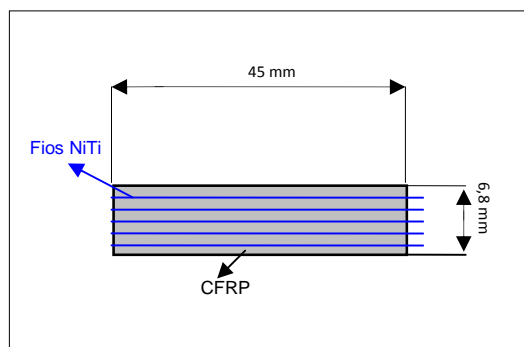


Figura 1. Desenho esquemático dos compostos ativos CFRP/Ni-Ti

Os fios Ni-Ti utilizados na fabricação das amostras passaram por um tratamento térmico de recozimento a  $450^\circ\text{C}$  por 15 minutos com resfriamento ao ar e decapagem usando a solução química 3% HF +15% HNO<sub>3</sub> +82% H<sub>2</sub>O (% em volume) por 10 minutos, seguindo metodologia proposta por Xu e colaboradores [12] para remoção de alguma camada de óxido depositada na superfície após o tratamento térmico. Por fim, os fios Ni-Ti foram pré-deformados de 2% a temperatura ambiente antes de serem inseridos entre as camadas de CFRP

com o auxílio do dispositivo mostrado esquematicamente na Figura 2.

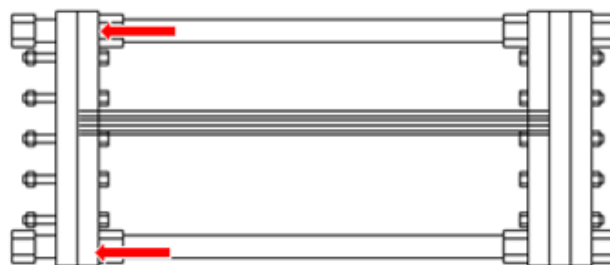


Figura 2. Esquema do sistema desenvolvido para pré-deformação dos fios Ni-Ti

Durante o processo de cura dos compósitos, os fios Ni-Ti foram mantidos tensionados para evitar sua contração por efeito memória, já que a temperatura de cura é superior a temperatura de transformação de fase reversa (martensita para austenita).

Os fios Ni-Ti, assim como a matriz de CFRP e os compósitos CFRP/Ni-Ti, foram caracterizados por DMA e DSC, verificando o comportamento do módulo de armazenamento (E), fator de perda ou amortecimento (Tan Delta) e as temperaturas de transformação de fase. Para os ensaios em DMA as amostras foram testadas em modo de viga simplesmente engastada (single cantilever) utilizando-se uma frequência de 1 Hz com uma amplitude de  $15\ \mu\text{m}$  e taxa de aquecimento de  $2^\circ\text{C}/\text{min}$ . Para as análises em DSC utilizou-se uma taxa de aquecimento de  $5^\circ\text{C}/\text{min}$ . Os fios Ni-Ti foram testados em três diferentes estados: sem deformação, deformado livre e deformado embebido no CFRP. Cada amostra de compósito produzido foi ensaiada em dois estados: CFRP sem fios Ni-Ti e CFRP com fios Ni-Ti. Por fim, foi realizada uma análise microscópica nas duas amostras de CFRP/Ni-Ti produzidas.

Os ensaios de DMA e DSC foram realizados em equipamentos da TA Instruments, respectivamente modelos DMA Q800 e DSC Q20. A análise microscópica foi realizada em um microscópio óptico OLYMPUS, modelo BX51.

## 3. Resultados e Discussão

A Figura (3a) mostra o aspecto de uma das amostras de CFRP/Ni-Ti fabricadas com os fios Ni-Ti. As amostras obtidas têm dimensões médias de 45 mm x 6,8 mm x 0,61 mm. Para a produção dessas amostras utilizou-se 5 fios Ni-Ti, equivalendo a uma fração volumétrica de aproximadamente 8 %. A Figura (3b) mostra as curvas de temperatura e pressão aplicada em função do tempo durante o processo de cura dos compósitos CFRP/Ni-Ti. Estes resultados indicam um bom controle do processo de cura sob carga constante.

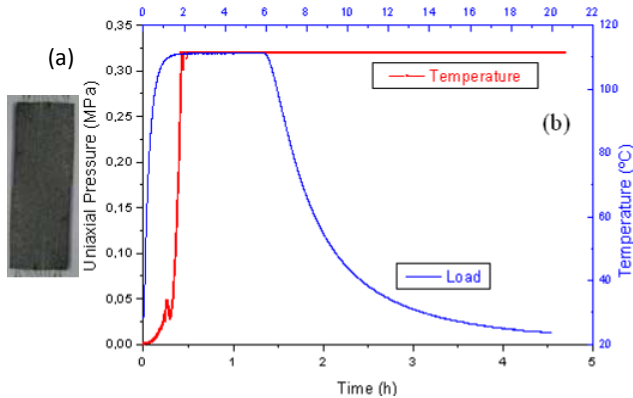


Figura 3. Compósito ativo CFRP/Ni-Ti (a) e respectivo ciclo de cura (b)

A Figura 4 mostra o comportamento tensão - deformação obtido durante o carregamento e descarregamento do fio Ni-Ti a temperatura ambiente. Observa-se que após a retirada da carga equivalente a 2 % de deformação, o fio apresenta uma recuperação elástica de aproximadamente 0,4 %, restando uma deformação permanente de 1,6 %, possível de ser recuperada por aquecimento.

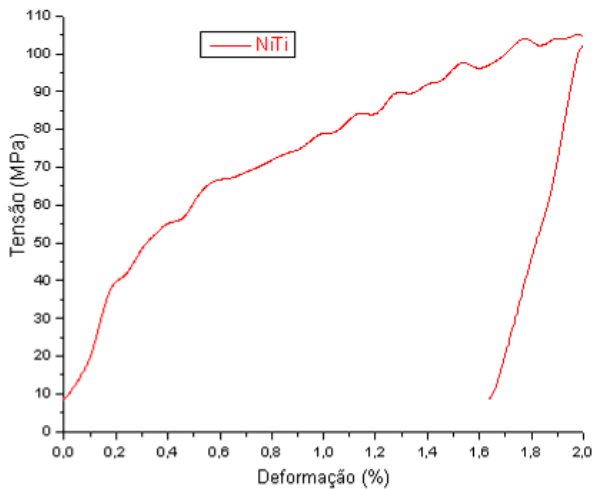


Figura 4. Curva tensão – deformação do fio Ni-Ti a temperatura ambiente (~ 27 °C)

Os gráficos da Figura (5) apresentam a variação do fluxo de calor em função da temperatura (Figura 5a) para os fios Ni-Ti em três estados diferentes (sem deformação, deformado e deformado e embebido no CFRP) e a variação do módulo de armazenamento (Figura 5b). A tabela 1 sumariza as temperaturas de transformação de fase obtidas a partir destas curvas.

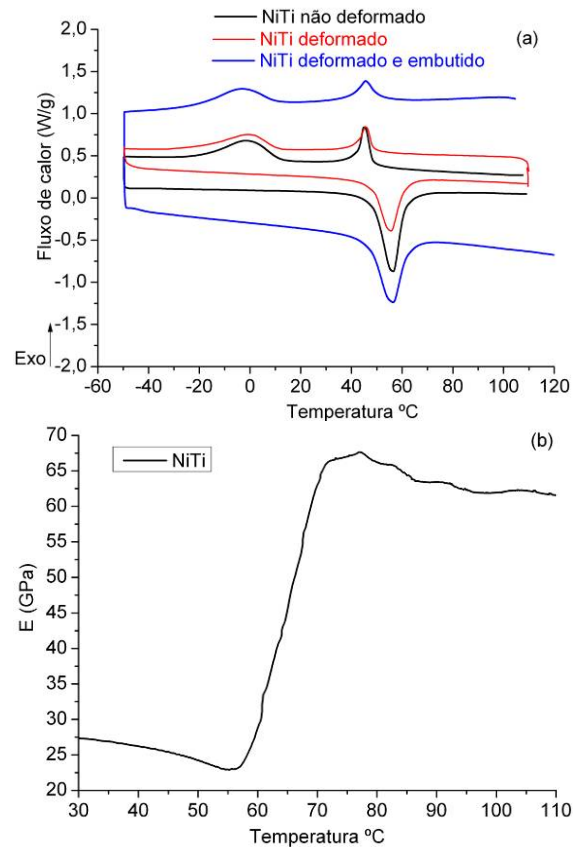


Figura 5. Caracterização termomecânica dos fios Ni-Ti em DSC (a) e DMA (b)

Tabela 1. Temperaturas de transformação de fase obtidas a partir da Figura 5

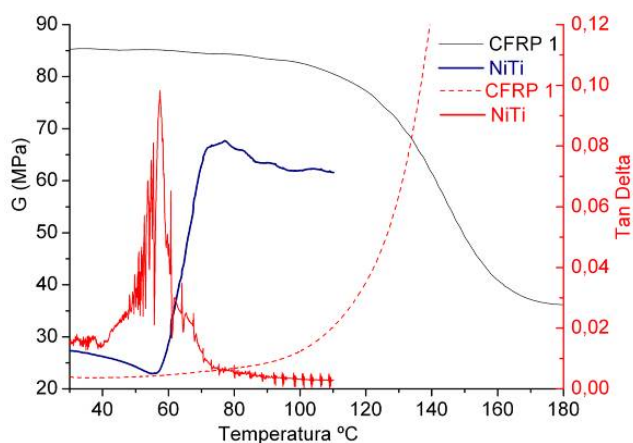
Fios NiTi	Não Deformado - DMA	Não Deformado -DSC	Deformado	Deformado e embutido
$R_s$ (°C)	--	48,87	49.28	52.55
$R_r$ (°C)	--	41,26	40.40	37.64
$M_s$ (°C)	--	12,40	12.75	10.64
$M_r$ (°C)	--	-21,04	-22.18	-23.99
$A_s$ (°C)	62,54	48,23	47.01	46.15
$A_r$ (°C)	76,85	60,70	61.27	62.53

Qualitativamente, a partir dos resultados obtidos em DSC pode-se observar que ocorre o alargamento dos picos de transformação de fase para os fios Ni-Ti nos diferentes estados de deformação, indicando que o fio Ni-Ti deformado e inserido no CFRP encontra-se de fato sob deformação no interior do compósito. Essa maior deformação está associada ao fato de que os fios foram introduzidos no CFRP e mantidos deformados (aproximadamente 2 %) durante o processo de cura, através de restrições proporcionadas pelo acessório da Figura 2. Esse fato aponta também para a existência de uma boa aderência entre o fio de Ni-Ti e o CFRP, mantendo a deformação no fio após o processo de cura. Portanto, espera-se que durante o aquecimento os fios Ni-Ti possam exercer tensões de recuperação sobre a matriz de CFRP,

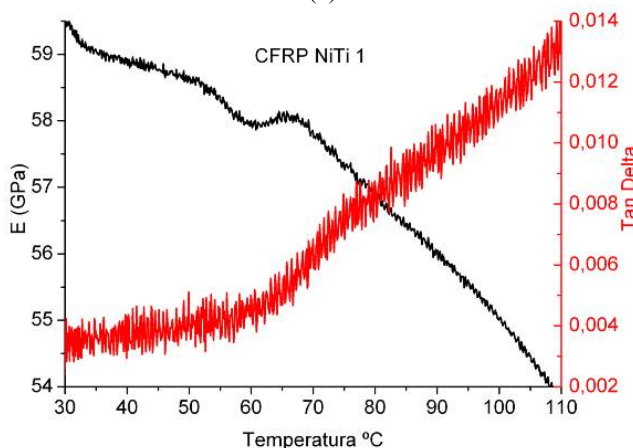
possibilitando algum nível de funcionalidade ao compósito ativo assim desenvolvido.

A partir dos resultados obtidos em DMA (Figura 5b) observa-se o expressivo aumento do módulo de armazenamento para o fio Ni-Ti durante a transformação de fase. Esse módulo cresce de 27 GPa a 30 °C para 67 GPa a 80 °C.

A Figura 6(a) apresenta os resultados do comportamento do módulo de armazenamento e do amortecimento (tan delta) em função da temperatura, para os fios Ni-Ti tratados e o CFRP 1 (fibras alinhadas) sem fios Ni-Ti. Já a Figura 7(b) apresenta os resultados para o CFRP/Ni-Ti 1.



(a)



(b)

Figura 6. Propriedades dinâmico-mecânicas dos fios Ni-Ti, do CFRP 1 e CFRP/Ni-Ti 1

Pode ser observado pelo comportamento da Figura 6(a) que o compósito CFRP 1 possui um módulo de armazenamento bem superior ao dos fios Ni-Ti, mesmo após a sua transformação de fase. Além disso, verifica-se que o CFRP apresenta uma boa estabilidade térmica até aproximadamente 100 °C, com uma temperatura de transição vítrea inicial ( $T_{gi}$ ) situada em torno de 120,83 °C, a qual é superior a temperatura final de ativação do fio de Ni-Ti ( $A_f$ ).

Dessa forma, o fio Ni-Ti pode ser totalmente transformado sem que a integridade do compósito CFRP seja comprometida. A Figura 6(a) também indica que a capacidade de amortecimento do CFRP é bastante limitada quando comparada aquela apresentada pelo fio Ni-Ti na região abaixo da  $T_g$ , entre 30 °C e 70 °C.

A partir de uma análise da Figura 6(b) observa-se que a introdução dos fios Ni-Ti faz com que o módulo de elasticidade do compósito CFRP/Ni-Ti 1 seja reduzido. Este resultado é esperado por se tratar da introdução de um elemento de módulo inferior ao da matriz CFRP 1. Durante o aquecimento para ativação dos fios Ni-Ti não foram observadas variações significativas que possam ser associadas ao potencial de ativação do compósito CFRP/Ni-Ti 1 obtido, verificando-se apenas uma pequena anomalia em torno da temperatura de transformação de fase dos fios Ni-Ti (60 °C a 70 °C). O comportamento do módulo de elasticidade é decrescente com o aumento da temperatura, levando a uma diminuição de aproximadamente 5 GPa entre 40 °C e 110 °C. Este fato é atribuído principalmente ao alto módulo de elasticidade do CFRP 1 comparativamente ao dos fios Ni-Ti. Uma situação semelhante foi observada por Bettini e colaboradores [14], os quais afirmam que para uma orientação dos fios Ni-Ti no sentido das fibras de reforço existe uma maior aderência entre os fios Ni-Ti e o compósito, por outro lado, esta configuração conduz geralmente para um baixo poder de ativação devido a elevada rigidez do material anfitrião, sendo necessárias frações volumétricas elevadas para se obter uma estrutura com potencial de ativação. De forma semelhante ao módulo de elasticidade, no que diz respeito a propriedade de amortecimento, não observou-se uma influência significativa da transformação dos fios Ni-Ti na matriz CFRP 1.

Da mesma forma, a Figura 7(a) apresenta os resultados do comportamento do módulo de elasticidade e do amortecimento em função da temperatura, para os fios Ni-Ti deformados e o CFRP 2 (fibras a 90°). Por outro lado, a Figura 7(b) apresenta os resultados para o compósito ativo CFRP/Ni-Ti 2.

A partir do comportamento da Figura 7(a) constata-se que a introdução de duas das quatro camadas de CFRP em ângulo de 90° promoveu uma redução no módulo de elasticidade do compósito CFRP/Ni-Ti 2 obtido, atingindo um valor máximo de 58 GPa, que é inferior ao módulo do fio Ni-Ti quando na fase mais quente, de maior módulo (austenita, 68 GPa). A introdução dos fios Ni-Ti no CFRP 2 reduz ainda mais o módulo de elasticidade do compósito obtido, que passa para um valor próximo de 18,2 GPa. Essa grande diminuição de módulo é atribuída principalmente ao grande nível de invasividade provocado pelos fios Ni-Ti que se encontram a 90° das fibras de carbono. Para este caso, durante o aquecimento foi observado um aumento de aproximadamente 10% no valor do módulo de elasticidade do CFRP/Ni-Ti 2 em torno da temperatura de transformação de fase dos fios Ni-Ti. Da mesma forma, observou-se um grande aumento no amortecimento do sistema em torno da temperatura de transformação de fase dos fios Ni-Ti.

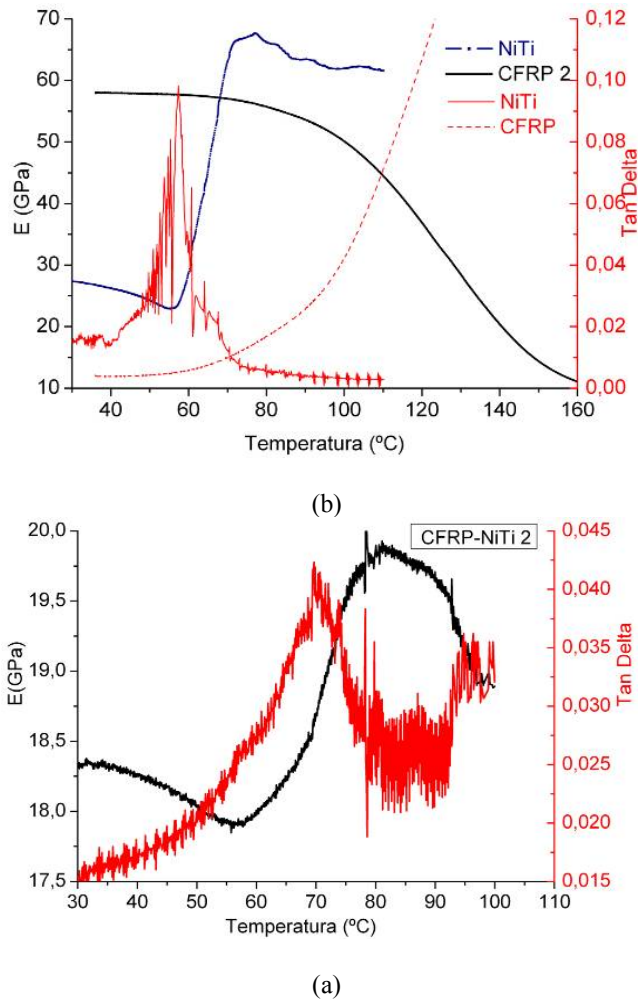


Figura 7. Propriedades dinâmico-mecânicas dos fios Ni-Ti, do CFRP 2 e CFRP/Ni-Ti 2

A Figura 8 apresenta micrografias em microscopia ótica do compósito CFRP/Ni-Ti 1. Através dessas imagens foi comprovado um baixo nível de invasividade dos fios Ni-Ti dentro do compósito, de modo que o fio atuador passa a fazer parte das camadas de CFRP (Figura 8a). Foi observada ainda, de maneira qualitativa, uma boa interface entre os fios Ni-Ti e a matriz de CFRP (Figura 8b).

Para o compósito em que os fios Ni-Ti foram introduzidos em uma matriz CFRP com fibras no sentido perpendicular, foi observado, pela Figura 9, um alto nível de invasividade dos fios Ni-Ti e uma interface defeituosa, com a presença de vazios e baixa aderência entre as camadas de CFRP. Verificou-se claramente que os fios Ni-Ti terminam por não fazer parte das camadas de CFRP e que grande parte de sua área superficial não está em contato direto com as fibras de reforço, mas sim com a resina epóxi. As fibras de carbono da camada superior não têm contato direto com a camada inferior sendo unidas por uma interface polimérica. Em consequência, foi obtido um compósito com um baixo módulo de elasticidade (inferior ao dos fios Ni-Ti) e com um

bom potencial de ativação, porém com a presença de defeitos que explicam um aumento no módulo de elasticidade de apenas 10 % entre 60 °C e 80°C, mas que não é mantido a temperaturas superiores a 80°C.

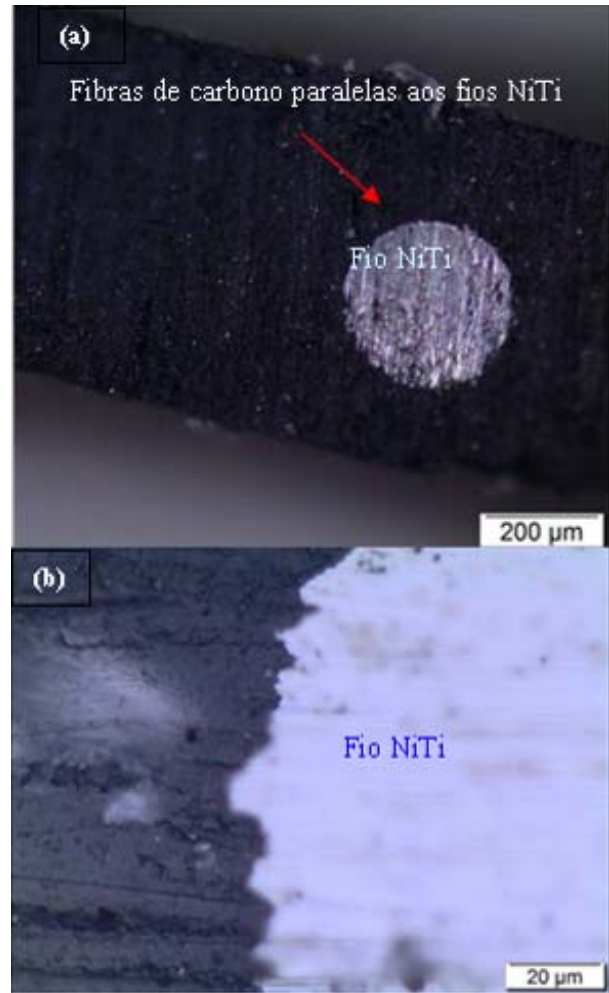


Figura 8. Microscopia ótica do CFRP/Ni-Ti 1. Aumentos de 10X (a) e 50X (b)

Comparando as imagens apresentadas nas figuras 8 e 9, foi observado que no compósito CFRP/Ni-Ti 2 o fio Ni-Ti está cercado pela matriz polimérica, enquanto as fibras estão afastadas do mesmo. Contrariamente, no CFRP/Ni-Ti 1 foi observado um contato direto entre as fibras de carbono e os fios Ni-Ti em toda a sua circunferência. Conforme discutido por Faiella e colaboradores [15], a presença desse contato direto leva a ocorrência de uma ação contrativa das fibras unidirecionais sobre o fio Ni-Ti de forma a promover uma elevada transferência de carga entre os fios Ni-Ti e o CFRP. Esse efeito é bastante reduzido no caso das fibras perpendiculares. Dessa maneira, deve-se otimizar o sistema de forma a se produzir um compósito com um nível de invasividade relativamente baixo e ao mesmo tempo com um módulo de elasticidade próximo aos fios Ni-Ti e com uma boa aderência entre as camadas de CFRP, bem como entre as

camadas e os fios Ni-Ti. Esse fato leva a necessidade de estudos em CFRP/Ni-Ti com as fibras de carbono em diferentes ângulos em relação aos fios Ni-Ti.

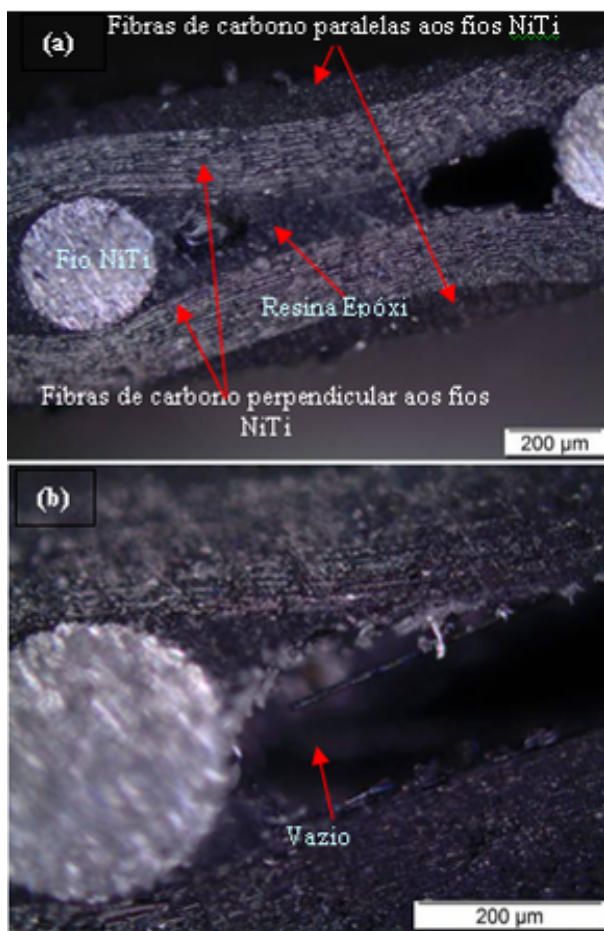


Figura 9. Microscopia ótica do CFRP-Ni-Ti 2. Aumentos de 10X (a) e 20X (b)

A Figura 10 apresenta o comportamento do módulo de elasticidade dos compósitos CFRP com as fibras dispostas em diferentes ângulos (90, 45, 30, 15 e 0°)

É possível observar da Figura 10 que o módulo de elasticidade do CFRP sofre uma grande diminuição com o aumento do ângulo das fibras de carbono.

Assim sendo, espera-se que o CFRP com as fibras alinhadas em 15° possa representar uma boa opção para confecção de compósitos ativos CFRP/Ni-Ti. Nesse caso, estima-se que não haveria uma invasividade tão grande dos fios Ni-Ti por estarem dispostos a um ângulo relativamente pequeno em relação às fibras de carbono. Ao mesmo tempo, esse compósito apresenta um módulo de elasticidade próximo ao dos fios Ni-Ti antes da sua transformação de fase, devendo conferir ao compósito ativo CFRP/Ni-Ti assim formado um certo grau de funcionalidade, superior aquele visualizado no comportamento da Figura 7b.

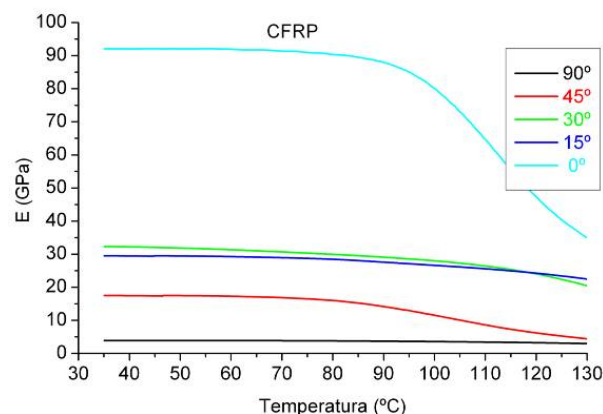


Figura 10. Comportamento termomecânico da matriz de CFRP em diferentes ângulos

#### 4. Conclusões

Neste estudo, a fabricação e ativação de compósitos ativos de CFRP com incorporação de fios Ni-Ti com efeito de memória de forma foi relatada e discutida. A obtenção de compósitos CFRP/Ni-Ti com configurações diferentes mostrou que a utilização de uma matriz CFRP em ângulo fornece um compósito com menor módulo de elasticidade tornando possível observar a capacidade de atuação de fios Ni-Ti embebidos nesta matriz.

A introdução de fios Ni-Ti em uma matriz de CFRP com parte das camadas de fibras de carbono orientadas a 90°, gerou um compósito com potencial de ativação considerável. Observou-se a necessidade de otimização da produção dos compósitos CFRP/NiTi sendo necessário o estudo de uma variação de ângulo das fibras de carbono que promovam uma redução no módulo de elasticidade do compósito e que ao mesmo tempo não faça com que os fios Ni-Ti tornem-se muito invasivos a ponto de produzir uma interfase pobre entre as camadas de CFRP e os fios Ni-Ti, de modo a se alcançar um máximo desempenho na capacidade de ativação do compósito obtido.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento dos seguintes projetos associados a este trabalho: INCT de Estruturas Inteligentes em Engenharia (Processo 574001/2008-5) e Casadinho UFCG-ITA (Processo 620091/2008-8).

Ao Engenheiro Edmundo Ortiz da Hexcel Composites (S.J. dos Campos, SP, Brasil) pela doação dos pré-impregnados de CFRP utilizados neste trabalho.

#### Referências

- [1] 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.
- [2] Brinson L. C.; Lammering R. Finite element analysis of the behavior of shape memory alloys and their applications. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 30, pp.3261-3341, 1993
- [3] Rogers, C. A.; Liang, C.; Barker, D. K.; Dynamic control concepts using shape memory alloy reinforced plates. *Smart Materials Structures and Mathematical Issues*. Technomic Publishing Company Inc, 1989.
- [4] Otsuka K.; Wayman, C. M. *Shape Memory Materials*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 284p, 1998.
- [5] De Araujo, C. J. *Comportement Cyclique de Fils en Alliage à Mémoire de Forme Ti-Ni-Cu: Analyse Electro-Thermomécanique, Dégradation et Fatigue par Cyclage Thermique Sous Contrainte*, Doctoral Thesis: INSA de Lyon, France. 1999.
- [6] Duerig, T. W.; Stockel, D.; Keeley, A. *Actuator and Work Production Devices. Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, Edited by T. W. Duerig, London, Butterworth-Heinemann, pp.369-393, 1990.
- [7] Tebaldi, A.; Coelho, L. dos S.; Junior, V. L. Detecção de Falhas em Estruturas Inteligentes Usando Otimização por Nuvem de Partículas: Fundamentos e Estudo de Casos. *Revista Controle & Automação*, v.17, pp. 1 – 19, 2007.
- [8] Janocha, H. *Adaptronics and Smart Structures Basics. Materials, Design and Application*, 1999.
- [9] Utku, S. *Theory of Adaptive Structures-Incorporating Intelligence into Engineered Products*. New York: CRC Press, 269p. 1998.
- [10] Tsoi, K. A.; Schrooten, J; Zheng, Y; Stalmans, R. Thermomechanical Response of TiNi Fiber-impregnated CFRP Composites. *Materials Letters*; v. 59, pp. 2472 – 2475, 2005.
- [11] Jang, B.; Kishi, T. Thermomechanical Response of TiNi Fiber-Impregnated CFRP Composites.
- [12] Xu, Y.; Otsuka, K.; Nagai, H.; Yoshida, H.; Asai, M.; Kishi, T. A SMA/CFRP Hybrid Composite with Damage Suppression Effect at Ambient Temperature. *Scripta Materialia*, v. 49, pp. 587–593, 2003.
- [13] Barret, C. *Launch Vehicle Flight Control Augmentation Using Smart Materials and Advanced Composites*. Alabama: NASA Technical, pp. 1-62; 1995.
- [14] Bettini, P.; Riva, M.; Sala, G.; Di Landro, L.; Airoidi, A.; Cucco, J. Carbon Fiber Reinforced Smart Laminates with Embedded SMA Actuators—Part I: Embedding Techniques and Interface Analysis. Vol. 18; pp. 664–671; 2009.
- [15] Faiella, G.; Antonucci, V.; Daghia, F.; Fascia, S.; Giordano, M. Fabrication and Thermo-Mechanical Characterization of a Shape Memory Alloy Hybrid Composite. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 0-201, pp 1-8, 2011.