



ESTUDO DE PROPRIEDADES DE ADESIVO MODIFICADO COM NANOTUBO DE CARBONO

Henrique Nunes Pereira Oliva, Michelly Martins Ferreira, Leonardo de Paula Silva Ferreira, Elvis Carneiro Monteiro, Nathalia Caroline Ferreira Menezes

Introdução

O trabalho relacionado ao aprimoramento das propriedades mecânicas dos materiais vem se mostrando uma prática cada vez mais importante e é fundamental para o desenvolvimento de novas tecnologias. Portanto neste estudo são abordados materiais compósitos e adesivos estruturais modificados. Juntas coladas se mostram como uma boa opção para aplicações estruturais devido a sua boa relação de custo-benefício, além de possuírem grande versatilidade e pouco alterarem aspectos da estrutura como dimensões e peso. No entanto, como a região colada é frequentemente tida como o ponto fraco da estrutura, muitos estudos têm sido desenvolvidos com o objetivo de alterar tal quadro e melhorar o desempenho das juntas coladas.

O presente trabalho visa contribuir com o melhoramento de juntas coladas. Foi investigado o efeito da dispersão de nanoestruturas de base carbono em adesivos estruturais. O objetivo é mostrar que a capacidade de carga do adesivo pode ser aumentada com a dispersão de pontos de reforço (nanoestruturas) nos mesmos. Portanto, tal estudo está alinhado à crescente demanda pela utilização de adesivos estruturais associados a materiais compósitos de alto desempenho. Nanopartículas foram dispersas em diferentes concentrações em adesivos epóxi e estes adesivos foram testados em juntas simples coladas (comumente conhecidas por *Single-lap joints*, do inglês) de aderentes metálicos. São utilizadas partículas de nanotubo de carbono (CNT) com variadas concentrações em peso para cada grupo ensaiado. São quatro grupos, com concentrações de 0, 0,5, 1 e 2% em peso de partículas de CNT dispersas no adesivo epóxi.

O objetivo deste trabalho é estudar o efeito da dispersão de partículas (nanotubo de carbono) em adesivo estrutural. Pretende-se melhorar a capacidade de carga do adesivo com a dispersão de nanoestruturas no mesmo. Para isso foram testadas concentrações específicas de nanopartículas e, a partir dos resultados, foi indicada a melhor concentração.

Materiais e métodos

A. Materiais e Equipamentos

Para confecção das juntas são utilizados aderentes de alumínio, com espessura de 3,18mm e largura de 25,4mm. A escolha pelo alumínio é baseada no fato de se tratar de um material isotrópico, o que o torna um bom modelo para estudo devido a menor complexidade e maior comodidade para realização de simulação em Elementos Finitos (EF).

O adesivo utilizado foi o sistema epóxi Araldite LY 5052/ ARADUR 5052, fornecido pela *Huntsman Corporation*. As partículas de nanotubo de carbono foram fornecidas pelo Departamento de Física da UFMG e o seu tipo é de parede múltipla. O processo de dispersão das partículas se deu com o auxílio de um misturador ultrassônico digital da marca *kondortech* com atuação por cerca de uma hora.

Balanças da marca *Ohaus* foram utilizadas para controle da proporção resina/endurecedor do adesivo e pesagem das nanopartículas. Para a colagem dos corpos de prova (CPs) foram utilizados dispositivos de colagem, desenvolvidos e fabricados no Laboratório de Compósitos da UFMG. Tais dispositivos atuam como moldes para posicionamento das juntas e manutenção da posição das mesmas durante o processo de cura do adesivo. O adesivo foi curado em estufa com temperatura de 40 °C durante quatro horas e pós-cura, na mesma estufa, com temperatura elevada a 60 °C por um período de tempo de 15 horas, conforme recomendação do fabricante. Uma máquina universal de ensaio da empresa EMIC, linha DL, modelo 10.000, é empregada para os ensaios de resistência aparente ao cisalhamento por tração. A célula de carga utilizada foi de 100 kN para medição de força. O *software* do fabricante, chamado TESC, é responsável pelo controle do equipamento e aquisição de dados da célula de carga.

B. Procedimento Experimental

Com a utilização do misturador se deu o processo de dispersão das nanopartículas de CNT e as concentrações inseridas no adesivo, medidas em proporção de peso de nanopartícula por peso de mistura adesiva (wt. %), foram 0%,



0.5%, 1% e 2%. Foram avaliadas cinco juntas coladas para cada composição, o que representou um total de 40 corpos de prova, visto que cada junta requer dois CPs, para formação da união de simples sobreposição (Fig. 1).

Os CPs para confecção das juntas tiveram sua geometria definida à luz da Norma ASTM D1002 – 10 [1]. Suas medidas são de 114,3 mm de comprimento e 3,18 mm de espessura. A Fig. 1 Ilustra a junta composta de dois CPs em simulação por Elementos Finitos. A largura é de uma polegada, ou seja, 25,4mm.

A máquina de ensaios universal foi utilizada para os ensaios de cisalhamento aparente por tração. A célula de carga utilizada possui capacidade de carga de 10.000 kgf e o deslocamento medido foi o referente ao cabeçote. Foram realizados ensaios nos cinco CPs.

C. Simulação Numérica

Foram realizadas simulações numéricas em EF para a caracterização das distribuições de tensões nas juntas coladas. Como descrito por Kumar *et al.* [2], as tensões mais importantes em uma junta colada são S_{yy} (*Peel*) e S_{xy} (*Shear*). Além disso, os problemas de análise de tensões em juntas são fortemente dependentes da malha (Turaga e Sun [3]), por isso, utilizou-se uma malha refinada na região da colagem. Foi considerado o estado plano de tensões, com uma malha de 265.000 elementos PLANE183. Foram realizadas duas simulações para cada junta, uma com a carga de ruptura obtida no ensaio e outra com uma carga menor, de 2.000 N. O valor de módulo de elasticidade para cada simulação foi obtido do ensaio e o coeficiente de *Poisson* de Turaga e Sun [3].

Resultados e Discussão

Como forma de avaliar características de juntas coladas, o ensaio de caracterização mecânica com relação à junta *single-lap* permite, entre outras análises, avaliar a resistência aparente ao cisalhamento do adesivo. Para colagem, foram utilizados dispositivos de colagem e grampos C. Os grampos serviram para manter a posição das juntas no momento de colagem dos Tabs (elemento de seção quadrada de 25,4 mm de lado e mesma espessura do CP, representado nas extremidades da junta, Fig. 1, com a função de auxiliar o encaixe destas na máquina de ensaios).

Os resultados para os quatro grupos de juntas com composições distintas são mostrados na Fig. 2, onde são expostos valores de tensão médios e módulos de elasticidade. A partir da análise dos valores de tensão para as concentrações de nanopartículas, nota-se que a tensão máxima foi obtida para o adesivo com concentração de 2% de CNT, o que, de certa forma era esperado, pois os pontos de reforço melhoram o desempenho de adesivos epóxis, como é apresentado em trabalhos como de Cruz [4] e Oliva [5].

A junta contendo 0,5% de CNT apresentou uma resistência cerca de 7% maior do que a junta contendo adesivo puro. E a com concentração de 2% de CNT mostrou uma melhora ainda maior, quase 10% mais resistente. Contudo, um resultado interessante foi o da tensão máxima média observada para o grupo contendo 1% de CNT, que se apresentou inferior ao respectivo para as juntas puras (0% CNT). Tal fenômeno pode ter sido ocasionado pela formação de aglomerados durante o processo de mistura das nanopartículas na resina epóxi. Tais aglomerados fragilizam o sistema e sua presença é evidenciada pelo aumento do desvio padrão observado para os resultados das juntas contendo nanopartículas (Tab. 1). A possível ocorrência de aglomerados em algumas juntas reflete em uma oscilação dos resultados, pois o aglomerado fragiliza a junta na qual este estiver presente.

As simulações com o módulo de elasticidade e carga de ruptura obtidos do ensaio apresentaram convergência do valor de tensão de *Peel* (S_{yy}) em torno de um mesmo resultado (Tab. 2). Isso mostra que a tensão limite do adesivo para ruptura não foi alterada pela adição de nanocomponentes. Já as simulações com carga constante de 2.000 N mostraram uma redução da tensão de *Peel* para os casos com adição de nanocompósitos. Este fato mostra que as juntas com aditivos suportariam maior carregamento, visto que seria necessária uma carga maior para atingir o estado de tensões que causa a ruptura.

Conclusão

Os ensaios de cisalhamento aparente mostraram que a adição de CNT aumenta a resistência ao cisalhamento e o deslocamento na ruptura do adesivo, pois com 0,5% de CNT foi evidenciada uma melhora e, com 2% a melhora foi ainda maior, o que, até esse ponto, deixa clara a influência positiva da adição de nanopartículas à região colada. Contudo, um fenômeno interessante foi observado, quando foi notada a resistência para o grupo de juntas com 1% CNT: a presença de aglomeração de nanopartículas, que comprometem a evolução de desempenho esperada para a adição de pontos de reforço ao adesivo.



Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com apoio da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

Referências

- [1] ASTM D1002-10. 2013. *Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*. USA. 11 Nov. 2014. Disponível em <<http://www.astm.org/Standards/D1002.htm>>. Acesso em 30 Jul. 2015.
- [2] KUMAR, B, SUN, C. T., WANG, P. H., STERKENBURG, R.. "Adding Additional Load Path in a Bounded/Bolted Hybrid Joint", AIAA Journal, Vol. 47, 2010, pp. 1593-1598.
- [3] TURAGA, UVRS, SUN, C. T. "Improved Design for Metallic and Composite Single-Lap Joints", Journal of Aircraft, Vol. 45, 2008, pp. 440-447.
- [4] CRUZ, D. T. L., NETO, A. S., ÁVILA, A. F., *Nano-Modified Adhesives by Graphene: The Effect Ageing Investigation*. 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 2013.
- [5] OLIVA, H. N. P., FERREIRA M. M., ÁVILA, A. F. *Study of Adhesive With Hybrid Nanocomposites (CNT and Graphene)*. 5th International Symposium on Solid Mechanics. Belo Horizonte, MG, Brazil. 2015.

Tabela 1. Valores médios e desvio padrão de Tensão de Ruptura (T) e Módulo de Elasticidade (E)

%CNT	E [Mpa]		T [MPa]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
0.0	2815.1	339.1	3.90	0.12
0.5	2324.6	579.3	4.18	0.49
1.0	2809.0	277.8	3.75	0.41
2.0	2190.5	725.1	4.25	0.33

Tabela 2. Tensões de Peel e Shear para as simulações numéricas

%CNT	Carga de Ruptura		Carga de 2000 N	
	Syy [Mpa]	Sxy [Mpa]	Syy [Mpa]	Sxy [Mpa]
0,0	1584,2	418,2	1573,5	410,0
0,5	1550,3	408,1	1438,7	390,7
1,0	1523,2	403,8	1571,9	412,3
2,0	1534,1	405,2	1398,9	382,6



Figura 1. Modelo de junta ensaiada

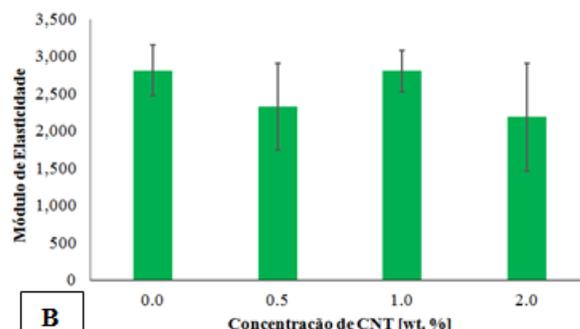
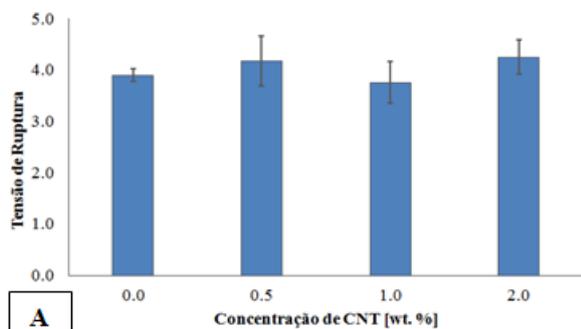


Figura 2. **A.** Tensão de Ruptura; **B.** Módulo de Elasticidade para as juntas ensaiadas.