

UTILIZAÇÃO DE NANOFOLHAS DE GRAFENO PARA MELHORIA DO DESEMPENHO MECÂNICO E DA ESTABILIDADE TÉRMICA DE COMPOSTOS FIBROSOS

Maria Gabriela Carvalho, mariagabrielacarvalho@yahoo.com.br¹

Antonio Ferreira Ávila, aavila@netuno.lcc.ufmg.br²

Adriana Maria Valladão N. Van Petten, avaladao@reitoria.ufmg.br³

¹Programa de Pós-Graduação Engenharia Mecânica/UFMG – Avenida Antonio Carlos 6627, CP: 31270 – 901, Belo Horizonte, MG.

²Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG, Programa de Pós-Graduação Engenharia Mecânica/UFMG – Avenida Antonio Carlos 6627, CP: 31270 – 901

³Departamento de Terapia Ocupacional/UFMG – Avenida Antonio Carlos 6627, CP: 31270 – 901, Belo Horizonte, MG.

Resumo: *Nanocompósitos poliméricos reforçados com nanofolhas de grafeno têm sido considerados promissores para aplicações nas indústrias automobilística, aeroespacial e de dispositivos biomédicos uma vez que, quando comparados ao polímero convencional, estes materiais apresentam maiores resistência mecânica e rigidez específicas. As nanofolhas de grafeno, obtidas a partir da esfoliação do nanografite, são uma interessante opção aos nanotubos de carbono, já que este material, assim como os nanotubos, possuem excelentes propriedades mecânicas, estruturais, térmicas e elétricas, além de apresentarem um custo significativamente inferior. Este trabalho investigou a utilização de nanocompósitos, formados por epóxi e nanografeno, nas propriedades mecânicas e na estabilidade térmica de compósitos fibrosos. Como reforço macroscópico foi utilizada fibra de vidro de tessitura plana e gramatura igual a 180g/m². O sistema epoxídico DGEBA foi modificado por nanografite (HC-11 IQ) esfoliado, em diferentes concentrações 1, 2 e 3%. O desempenho mecânico dos compósitos foi avaliado por meio de ensaios de Flexão de Três Pontos (ASTM D790). A Termogravimetria (TG) foi utilizada para avaliação da estabilidade térmica dos materiais. A análise morfológica foi feita a partir das técnicas de Difração de Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A DRX e a MEV indicaram esfoliação parcial do nanografite em folhas de grafeno e boa dispersão das nanopartículas na matriz polimérica. Em geral, os compósitos fibrosos nanomodificados apresentaram melhores desempenho mecânico e estabilidade térmica em relação ao compósito convencional. Um aumento de 4% no módulo de elasticidade foi observado para o compósito híbrido contendo 2% de nanografite. Além disso, este mesmo compósito apresentou uma temperatura inicial de degradação cerca de 24°C superior àquela do grupo controle. O presente estudo se constitui como um dos pioneiros na utilização das nanopartículas de grafite para a melhoria do desempenho mecânico de compósitos fibrosos, os quais têm grande potencial para aplicações estruturais nos quais sejam necessários materiais leves e de alto desempenho.*

Palavras-chave: *grafeno, nanografite, nanocompósitos, compósitos, materiais nanoestruturados*

1. INTRODUÇÃO

Lâminas de grafeno são estruturas finíssimas, formadas por carbono, com cerca de 1nm de espessura (Yasmin *et al.*, 2006) obtidas a partir da esfoliação das nanolâminas de grafite, como pode ser observado na Fig (1). Estes materiais têm sido considerados como uma interessante opção aos nanotubos de carbono para a produção de nanocompósitos poliméricos com aplicações de engenharia (Debelak e Lafdi, 2007; Yasmin *et al.*, 2006; Yasmin e Daniel 2004), pois associa baixo custo às excelentes e já conhecidas propriedades mecânicas, estruturais, térmicas e elétricas do grafite.

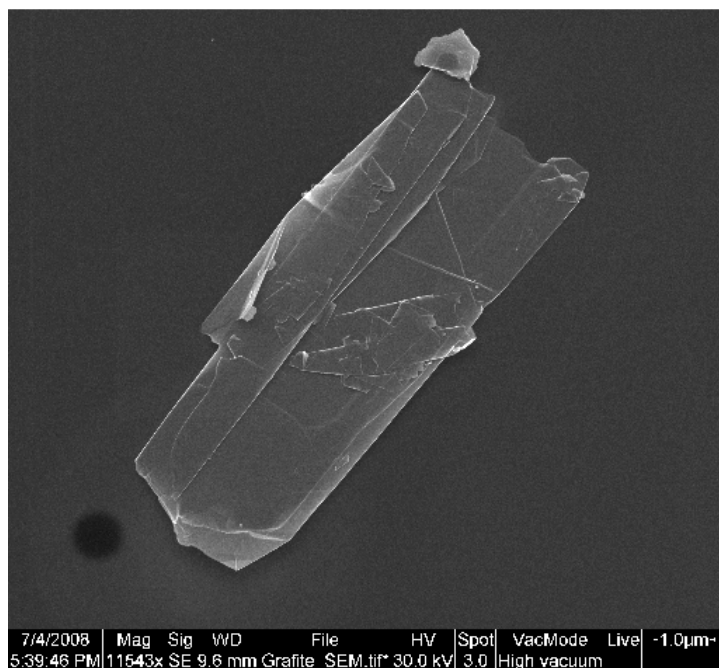


Figura 1: Nanolâminas de grafite formadas por várias folhas de grafeno. Micrografia feita por Microscopia Eletrônica de Varredura.

Quando totalmente dispersas, as lâminas de grafeno podem apresentar alta razão de aspecto, entre 200 e 1500, elevado módulo de elasticidade, de aproximadamente 1 TPa (Stankovich *et al.*, 2007), superfície específica superior a 2600 m²/g (Stankovich *et al.*, 2007; Viculis *et al.*, 2005) condutividade elétrica de 10⁴ S/cm (Debelak e Lafdi, 2007). A esfoliação total do nanografite em lâminas de grafeno, entretanto, não é um fenômeno facilmente obtido devido à forte interação entre os átomos de carbono que formam essas lâminas (Yasmin *et al.*, 2003). A maioria dos estudos relata a formação de estruturas parcialmente esfoliadas, ou seja, o nanografite é quebrado em blocos de várias folhas de grafeno (Wei *et al.*, 2009; Stankovich *et al.*, 2007; Yasmin *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2003). Estudos recentes, entretanto, indicam que ainda que não totalmente dispersas em meio polimérico, as nanolâminas de grafeno podem conduzir à formação de materiais multifuncionais. Yasmin e Daniel (2004) comprovaram experimentalmente a possibilidade de fabricação de compósitos multifuncionais com a adição de pequenas frações volumétricas de nanolâminas de grafite à resina epoxídica. Foi verificada uma superioridade de 25% no módulo de elasticidade do nanocompósito contendo 5% de nanografite em relação ao polímero puro, o que foi atribuído à alta resistência e à elevada razão de aspecto das lâminas de grafite. Além disso, a distribuição uniforme das nanopartículas na matriz e a boa adesão interfacial são fatores responsáveis pelo bom desempenho mecânico do nanocompósito. Em relação às propriedades viscoelásticas, o estudo mostrou que os nanocompósitos apresentam um módulo de armazenamento superior ao da resina pura. Verificou-se também, para o nanocompósito, redução significativa do coeficiente de expansão térmica e aumento da temperatura de decomposição da resina.

Os nanocompósitos poliméricos podem ser combinados aos tradicionais compósitos fibrosos em um novo tipo de material compósito, denominado nanocompósito híbrido. A combinação de nanocompósitos e reforços fibrosos torna possível a otimização das propriedades dos materiais compostos, além de favorecer sua utilização em aplicações estruturais (Vlasveld *et al.*, 2005). Estudos recentes têm relatado melhoria nas propriedades de compósitos fibrosos por meio da modificação da matriz polimérica com nanopartículas, principalmente nanopartículas de caráter cerâmico, tais como a montmorilonita. Em geral, os estudos relatam melhoria das propriedades do compósito governadas pela matriz, dentre as quais: rigidez (Velmurugan e Mohan, 2009; Manfredi *et al.*, 2008; Tsai e Wu, 2008; Lin *et al.*, 2006; Kornmann *et al.*, 2005; Haque *et al.*, 2003), resistência transversal à flexão (Tsai e Wu, 2008), resistência à compressão (Subramanian, 2006) e resistência transversal à tração (Tsai e Wu, 2008). Além das propriedades mecânicas, a estabilidade térmica dos compósitos e as propriedades viscoelásticas podem ser alteradas pela adição de nanopartículas à matriz. Haque *et al.* (2003) e Velmurugan e Mohan (2009) verificaram aumento da temperatura inicial de decomposição dos compósitos fibrosos com a adição de pequena fração em peso de nanopartículas cerâmicas à matriz epoxídica.

Embora haja inúmeras pesquisas avaliando a estrutura das nanopartículas de grafite e a sua utilização para a produção de nanocompósitos poliméricos, verificam-se poucos estudos enfocando sua aplicabilidade para a melhoria das propriedades de compósitos fibrosos, ao contrário do que ocorre em relação às nanopartículas cerâmicas. Este estudo, portanto, teve como objetivos principais desenvolver nanocompósitos híbridos de matriz modificada com a adição de diferentes concentrações de nanografite (1, 2 e 3%) e avaliar o efeito desta modificação nas propriedades mecânicas (rigidez e resistência mecânica à flexão) e na estabilidade térmica dos compósitos fibrosos.

2. METODOLOGIA

2.1. Preparação dos Nanocompósitos Híbridos

Para a produção dos nanocompósitos poliméricos foi utilizado o sistema epoxídico da HUNTSMAN®, composto pelo Araldite RemLam M®, à base de *diglicidil éter de bisfenol A* (DGEBA) e pelo endurecedor HY956®, à base de aminas alifáticas. Diferentes concentrações, em peso (1, 2 e 3%) de grafite expandido HC 11IQ, fornecido pela Nacional Grafite, foram utilizadas para modificação do polímero. As diferentes concentrações de nanopartículas foram misturadas ao DGEBA com um misturador de alto cisalhamento por 15 minutos e, em seguida, o sistema foi submetido a vácuo para de possíveis bolhas que poderiam comprometer seu desempenho mecânico. Após o processo de vácuo, o agente endurecedor foi adicionado ao sistema, em um processo manual de mistura, formando então os nanocompósitos.

Um tecido de fibra de vidro bidirecional, de gramatura 180 g/m², produzido pela Texiglass® Indústria e Comércio Têxtil LTDA foi utilizado para a produção dos nanocompósitos híbridos. A matriz polimérica foi depositada no tecido por meio de um processo manual de laminação, utilizando-se a relação, em peso, de 60% de fibra e 40% de matriz. As placas laminadas foram submetidas ao processo de cura e pós-cura, segundo instruções do fabricante da resina.

2.2. Caracterização dos Nanocompósitos Híbridos

Para a caracterização morfológica dos materiais utilizou-se a difração de raio X e a microscopia eletrônica de varredura. A difração de raios X (DRX) foi utilizada para a identificação do grau de esfoliação das nanopartículas na matriz polimérica dos compósitos desenvolvidos. Para tanto, foi utilizado um difratômetro de raios X Shimadzu XRD 6000® com filamentos Cu ($\lambda=0,154$ nm), com varredura em ângulos entre $2\theta = 2$ e 80° e velocidade de goniômetro de $2^\circ/\text{min}$. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para a caracterização da superfície de fratura dos compósitos submetidos ao ensaio de flexão de três pontos. Cada uma das amostras foi recoberta com uma camada de 1 nm de ouro. A análise foi feita em um microscópio modelo Quanta 200 FEI®.

O ensaio de flexão de 3 pontos foi utilizado para caracterização mecânica dos materiais. As variáveis de análise foram o módulo de elasticidade à flexão e a tensão máxima à flexão. Para cada condição experimental (0%, 1%, 2% e 3% de nanografite) foram produzidos 12 corpos de prova, com as seguintes dimensões: média de 0,70 mm de espessura, 12,7 mm de largura e 70 mm de comprimento. O vão livre entre apoios foi de 25,4 mm (ASTM D790, 2003). Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaios universal Instron®, modelo 5869, com velocidade de deslocamento do cabeçote igual a 1,53 mm/min.

A estabilidade térmica dos nanocompósitos híbridos foi analisada a partir da termogravimetria (TG), utilizando-se o analisador térmico Shimadzu TGA-60H®. O parâmetro para a comparação entre os grupos experimentais foi a temperatura na qual o material perdeu 5% de sua massa ($T_{5\%}$). As amostras dos nanocompósitos híbridos e do compósito convencional foram submetidas a uma variação de temperatura ($\sim 25^\circ\text{C}$ a 800°C), sob atmosfera dinâmica de nitrogênio com razão de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização Morfológica

A Tab. (1) apresenta os valores dos espaçamentos basais obtidos para as nanopartículas de grafite e para os nanocompósitos. É possível observar que os valores referentes aos nanocompósitos são ligeiramente superiores àquele verificado para o nanografite puro (0,34 nm), o que sugere que as cadeias poliméricas se intercalaram entre as nanolâminas de grafite, mantendo, porém, o arranjo das folhas de grafeno.

Tabela 1: Valores de espaçamento basal obtidos para o nanografite puro e para os compósitos contendo diferentes concentrações desta nanopartícula

Material	Espaçamento basal (nm)
Nanografite	0,34
Compósito 1NG	0,37
Compósito 2NG	0,37
Compósito 3NG	0,36

De acordo com Hussain *et al.* (2006), para as nanopartículas de grafite, esta morfologia pode ser classificada como parcialmente esfoliada, uma vez que, embora as lâminas do grafite expandido tenham sido completamente delaminadas originando nanolâminas, as lâminas de grafeno que as compõem continuam interligadas. Morfologias parcialmente esfoliadas também foram verificadas nos estudos de Stankovich *et al.* (2007) e Yasmin *et al.* (2006).

Para o nanocompósito contendo 3% de nanografite, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) apontou a presença de aglomerados de nanopartículas. Na Fig. (2) podem ser observadas regiões de aglomerados de lâminas de grafite em meio à resina. Estas nanolâminas de grafite podem estar associadas à formação de grandes blocos de folhas de grafeno.

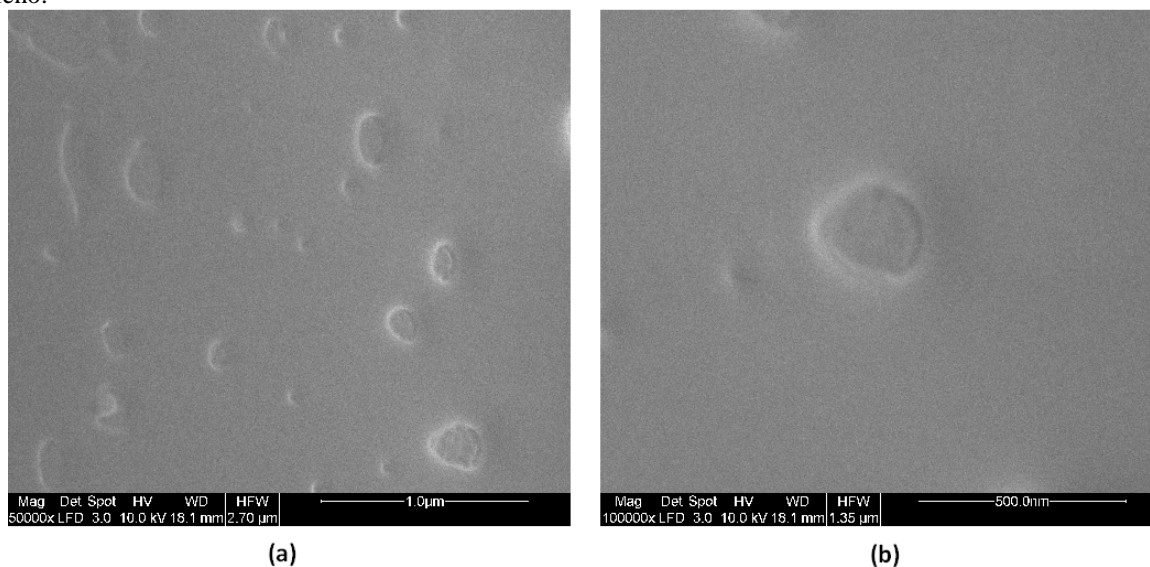


Figura 2: Matriz do compósito contendo 3% de nanografite indicando aglomerados de lâminas de nanografite. (a) aumento de 50 000x; (b) aumento de 100 000x

Os blocos de folha de grafeno observados à MEV possuem espessuras de aproximadamente 100 nm. Yasmin *et al.* (2006) também reportaram a existência de blocos de folhas de grafeno e a formação destas nanolâminas.. Tal fato está associado à forte integração atômica (ligação covalente) carbono-carbono.

3.2. Caracterização Térmica

Os dados relativos à temperatura inicial de degradação ($T_{5\%}$) estão dispostos na Tab. (2). Todos os nanocompósitos híbridos apresentaram maior estabilidade térmica quando comparados compósito convencional. A superioridade observada foi de cerca de 24°C em $T_{5\%}$ para o nanocompósitos contendo 1% e 2% de nanografite e de 7 °C para o compósito contendo 3% da nanopartícula. A maior estabilidade térmica dos nanocompósitos híbridos em relação ao compósito convencional observada neste estudo sugere que as nanopartículas de grafite podem funcionar como barreira, dificultando a difusão dos produtos voláteis gerados durante o processo de degradação da matriz polimérica, e, em conseqüência, a perda de massa do sistema, assim como observado por Yasmin e Daniel (2004).

Tabela 2: Valores de $T_{5\%}$ obtidos para cada condição experimental analisada

Material	$T_{5\%}$ (°C)
Compósito Convencional	185,6
Compósito Híbrido 1% nanografite	207,5
Compósito Híbrido 2% nanografite	209,5
Compósito Híbrido 3% nanografite	192,0

Observa-se ainda que parece haver uma tendência de aumento da estabilidade térmica com o aumento da concentração de nanopartículas. Observa-se, entretanto, que, diferentemente do esperado, o nanocompósito produzido com 3% de nanografite apresentou um valor de $T_{5\%}$ menor que aquele verificado para o nanocompósito produzido com 2%. Esse resultado pode estar associado, por exemplo, a uma quantidade em excesso de agente endurecedor utilizada na preparação deste material, durante seu processamento.

3.3. Caracterização Mecânica

Os valores médios de módulo de elasticidade obtidos para os compósitos híbridos e para compósito convencional encontram-se na Tab. (3).

Tabela 3: Valores de média e desvio padrão para o módulo de elasticidade à flexão verificados em cada condição experimental testada

Módulo de Elasticidade (MPa)			
Condição Experimental	n	Média	Desvio Padrão
Compósito Convencional	12	14323,00	241,45
Compósito Híbrido 1% nanografite	12	15046,76	166,64
Compósito Híbrido 2% nanografite	12	14877,94	200,50
Compósito Híbrido 3% nanografite	12	13774,83	161,15

Os compósitos contendo 1% e 2% de nanografite apresentaram módulos de elasticidade à flexão cerca de 5% e 4%, respectivamente superiores ao compósito convencional, o que indica que a nanomodificação da matriz polimérica interferiu positivamente na rigidez do compósito. De acordo com Vlasveld *et al.* (2007), Lin *et al.* (2006), Vlasveld *et al.* (2005), a adição de nanopartículas de alto módulo de rigidez à matriz polimérica de compósitos fibrosos pode restringir a mobilidade das cadeias poliméricas na interface com as fibras quando o material é submetido a um carregamento, aumentando assim o valor do módulo de elasticidade.

Com o aumento da concentração de nanopartículas, entretanto, há redução da rigidez. Para uma concentração de 3%, o desempenho do compósito híbrido foi 4% inferior àquele do compósito convencional. O aumento da viscosidade do sistema polimérico pela introdução de maior quantidade de nanopartículas pode ter favorecido a formação de bolhas e de vazios (Fig. 3) que comprometeram a rigidez do material, conforme também observado por Daud *et al.* (2009) e Shen *et al.* (2009). No caso da concentração de 3% de nanografite, deve-se somar ao problema de vazios a formação de aglomerados de lâminas conforme visto na Figura 3, decorrentes da saturação do sistema epoxídico.

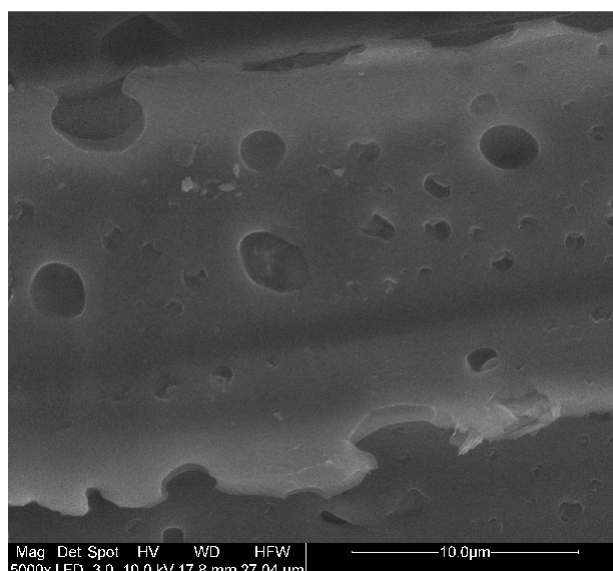


Figura 3: Micrografia da matriz do compósito contendo 3% de nanografite indicando grande quantidade de poros.

A adição de nanopartículas de grafite à matriz dos compósitos fibrosos também teve importantes implicações no valor tensão máxima à flexão destes materiais, como pode ser visto na Tab. (3). Os compósitos contendo 1% e 2% de nanografite misturados à matriz apresentaram valores de tensão máxima 1% e 5% superiores ao do compósito convencional.

Tabela 3: Valores de média e desvio padrão para o a tensão máxima à flexão verificada em cada condição experimental testada

Tensão Máxima à Flexão (MPa)			
Condição Experimental	n	Média	Desvio Padrão
Compósito Convencional	12	333,21	9,100
Compósito Híbrido 1% nanografite	12	336,20	7,084
Compósito Híbrido 2% nanografite	12	350,50	5,903
Compósito Híbrido 3% nanografite	12	318,590	9,782

A dispersão de nanopartículas na resina pode ter melhorado a interface entre a matriz e as fibras, promovendo uma melhor distribuição de tensões, conforme observado por Velmurugan e Mohan (2009), Vlasveld *et al.* (2005), Kornmann *et al.* (2005) e Haque *et al.* (2003) para compósitos fibrosos com matriz modificada por nanopartículas cerâmicas. Embora se tenha observado uma tendência de aumento do valor de tensão máxima dos compósitos com o aumento da concentração de nanopartículas adicionadas à matriz, verifica-se que o compósito contendo 3% de nanografite, assim como em relação ao módulo de elasticidade, apresentou um valor de tensão máxima cerca de 4% inferior àquele do compósito convencional. O baixo desempenho mecânico deste compósito, conforme relatado anteriormente pode estar relacionado à presença de aglomerados de nanopartículas (Fig. 3b) decorrentes da saturação do sistema epoxídico e também às inúmeras bolhas (Fig. 3). A Fig. (4) apresenta as micrografias das superfícies de fratura do compósito convencional e dos compósitos híbridos.

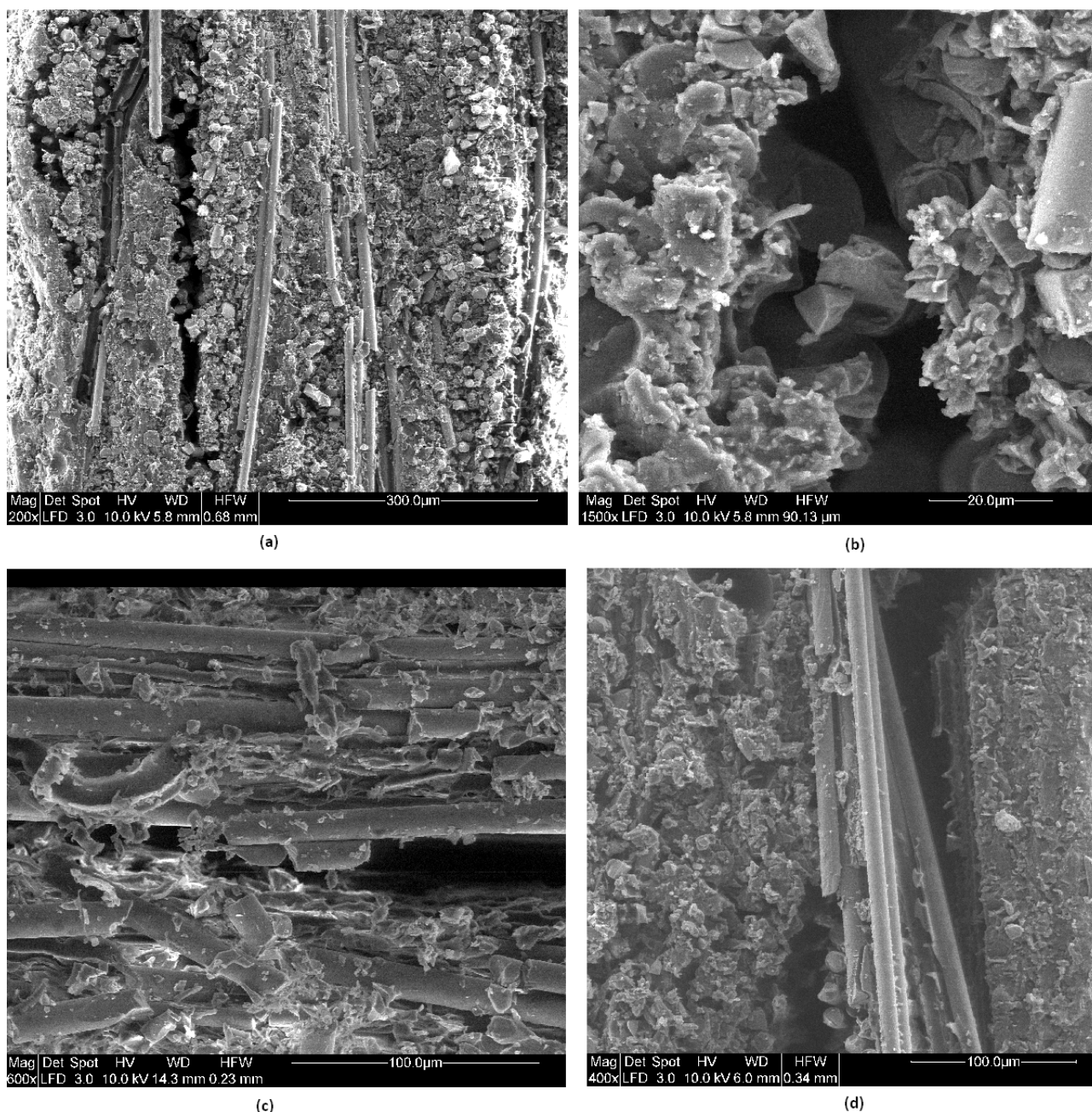


Figura 4: Micrografias das superfícies de fratura (a) do compósito convencional; (b) do compósito contendo 1% de nanografite; (c) do compósito contendo 2% de nanografite; e (d) do compósito contendo 3% de nanografite.

A adição de nanopartículas à matriz epoxídica alterou o mecanismo e a superfície de falha dos compósitos fibrosos. A superfície de falha do compósito convencional é caracterizada por fibras com pouco resíduo de matriz e pela presença de trincas interlaminares que parecem ter se iniciado pelo descolamento entre as fibras e o material matricial. As superfícies dos compósitos contendo 1% e 2% de nanografite, por outro lado, apresentam linhas de fratura menores que a do compósito convencional, o que pode indicar que houve uma espécie de ancoragem, possivelmente decorrente da ação das nanopartículas. Além disso, é possível observar resíduos de nanocompósitos impregnados na fibra indicando uma boa adesão entre esses materiais e também sugerindo que a falha do material pode ter se iniciado pela quebra da matriz, e não pela separação entre ela e as fibras. Na superfície de falha do compósito contendo 3% de nanografite, entretanto, são verificadas regiões de descolamento entre as fibras e a matriz. Além disso, foram também verificados regiões de poros e aglomerados de nanolâminas, conforme mostrado nas Figuras 2 e 3.

4. CONCLUSÕES

Os estudos de difração de raios X mostraram que o processo de dispersão do nanografite foi capaz de produzir estruturas parcialmente esfoliadas na forma de blocos de folhas de grafeno. Para a concentração de 3% de nanopartículas, entretanto, observou-se, a partir da microscopia eletrônica de varredura, a formação de aglomerados de nanolâminas. A análise térmica evidenciou um aumento da estabilidade térmica do compósito fibroso com a adição de

nanografite à matriz polimérica, o que indica que o nanografite pode funcionar como barreira à volatilização de produtos resultantes da degradação térmica do polímero. Os resultados deste estudo demonstraram ainda que os compósitos híbridos contendo nanopartículas de grafite dispersas em sua matriz (concentração <3%) apresentaram melhor desempenho mecânico que o compósito convencional. O compósito contendo 3% de nanografite disperso na matriz, entretanto, apresentou desempenho mecânico inferior ao do compósito convencional. Esse fato foi relacionado a uma grande quantidade de bolhas e vazios decorrentes do processamento da matriz e da laminação. O presente estudo se constitui como um dos pioneiros na utilização do nanografite para a melhoria do desempenho de compósitos fibrosos. Os resultados encontrados são promissores e indicam a possibilidade, a partir do aperfeiçoamento dos processos de dispersão das nanopartículas e de produção dos laminados, do desenvolvimento de materiais estruturais leves e que apresentem uma associação interessante entre propriedades mecânicas e térmicas e que possam ser utilizados em aplicações nas indústrias automotiva, aeroespacial e aeronáutica.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e à CAPES a concessão da bolsa de mestrado da primeira autora e ao CNPq, processos 300434/2008-1 e 472213/2007-5, os recursos materiais para execução desta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- American Society For Testing And Materials. ASTM D 790, 2003. Standard test methods for flexural properties of reinforced plastic and electrical insulating materials. USA.
- Chen, G.; Weng W.; Wu, D.; Wu, C., 2003, "PMMA/graphite nanosheets composite and its conducting properties", *European Polymer Journal*, v. 39, n.12 , pp.2329-2335.
- Debelak, B.; Lafdi, K., 2007, "Use of exfoliated graphite filler to enhance polymer physical properties", *Carbon*, v. 45, n. 9, pp. 1727-1734.
- Yasmin, A.; Luo, J-J; Daniel, I. M., 2006, "Processing of expanded graphite reinforced polymer nanocompósitos", *Composites Science and Technology*, v. 66, n. 9, pp. 1182-1189.
- Yasmin, A.; Daniel, I. "Mechanical and thermal properties of graphite platelet/epoxy composites", *Polymer*, v. 45, n. 24, pp. 8211-8219, 2004.
- Daud, W.; Bersee, H. E. N.; Picken, S. J.; Beukers, A., 2009, "Layered silicates nanocomposites matrix for improved fiber reinforced composites properties", *Composites Science and Technology*, v. 69, n. 1, pp. 2285-2292.
- Haque, A.; Shamsuzzoha, M.; Hussain, F.; Dean, D., 2003, "S2-glass/epoxy polymer nanocomposites: manufacturing, structure, thermal and mechanical properties", *Journal of Composite Materials*, v. 37, n. 20, pp. 1821-1837.
- Hussain, F.; Okamoto, M.; Gorga, R. S., 2006, "Review article: polymer matrix nanocomposites, processing manufacturing, and application: an overview", *Journal of Composite Materials*, v. 40, n. 17 pp. 1511- 1575.
- Kornmann, X.; Rees, M.; Thomann, Y.; Necola, A.; Barbezat, M.; Thomann, R., 2005, "Epoxy-layered silicate nanocomposites as matrix in glass fibre-reinforced composites", *Composites Science and Technology*, v. 65, n.14, pp.2259-2268.
- Lin, L. Y.; Lee, J.; Hong, C.; Yoo, G., Advani, S. G., 2006, "Preparation and characterization of layered silicate/glass fiber/epoxy hybrid nanocomposites via vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM)", *Composites Science and Technology*, v. 66, n. 13, pp. 2116-2125.
- Manfredi, L. B.; Santis, H.; Vázquez, A., 2008, "Influence of the addition of montmorillonite to the matrix of unidirectional glass fibre/epoxy composites on their mechanical and water absorption properties", *Composites: Part A*, v. 39, n. 11, pp. 1726-1731.
- Shen, Z.; Bateman, S.; Wu, D. Y.; McMahon, P.; Dell'olio, M.; Gotama, J., 2009, "The effect of carbon nanotubs on mechanical and thermal properties of woven glass fibre reinforced polyamide-6 nanocomposites", *Composites Science and Technology*, v. 69, n. 2, pp. 239-244.

- Stankovich, S. S.; Dikin, D. A.; Piner, R. D.; Kohlhass, K. A.; Kleinhammes, A.; Jia, Y.; Wu, Y.; Nguyen, S. T.; Ruoff, R. S., 2007, "Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide", Carbon, v. 45, n. 7, pp. 1558-1565.
- Subramaniyan, A. K.; Sun, C. T., 2006, "Enhancing compressive strength of unidirectional polymeric composites using nanoclay", Composites: Part A, v. 37, n. 12, pp. 2257-2268.
- Tsai, J-L; Wu, M-D., 2008, "Organoclay effect on mechanical responses of glass/epoxy nanocomposites", Journal of Composite Material, v. 42, n. 6, pp. 553-568.
- Velmurugan, R. e Mohan, T. P., 2009, "Epoxy-clay nanocomposites and hybrids: synthesis and characterization", Journal of Reinforced Plastics and Composites, v. 28, n. 1, pp. 17-37.
- Viculis, L. M.; Mack, J. J.; Mayer, O. M.; Hahn, H. T.; Kaner, R. B., 2005, "Intercalation and exfoliation routes to graphite nanoplatelets", Journal of Material Chemistry, v. 15, n. 8, pp. 974-978.
- Vlasveld, D. P. N.; Bersee, H. E. N.; Picken, S. J., 2005, "Nanocomposite matrix for increased fibre composite strength". Polymer. v. 46, n. 23, pp. 10269-10278,
- Vlasveld, D. P. N.; Daud, W.; Bersee, H.E.N.; Picken, S. J., 2007, "Continuous fibre composites with a nanocomposite matrix: improvement on flexural and compressive strength at elevated temperatures", Composites: Part A, v. 38, n.3, pp. 730-738.
- Wei, T.; Fan, Z.; Luo, G.; Wang, S.; Song, L., 2009, "Dispersibility and stability improvement of graphite nanoplatelets in organic solvent by assistance of dispersant and resin". Materials Research Bulletin. v.44, n. 5, pp. 977-983,
- Yasmin, A.; Abot, J. L.; Daniel, I. M., 2003, "Processing of clay/epoxy nanocomposites by shear mixing". Scripta Materialia. v. 49, n. 1, pp. 81-86.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

GRAPHENE NANOSHEETS ADDITION FOR FIBROUS COMPOSITES IMPROVEMENT ON MECHANICAL PROPERTIES AND THERMAL STABILITY.

Maria Gabriela R. Carvalho, mariagabrielacarvalho@yahoo.com.br¹

Antonio F. Avila, aavila@netuno.lcc.ufmg.br²

Adriana M.V Van Pettern, avaladao@ufmg.br³

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Graduate Program on Mechanical Engineering (PPGMEC-UFMG), 6627 Antonio Carlos Avenue, Belo Horizonte, MG, 31270-901, Brazil.

²Universidade Federal de Minas Gerais, Department of Mechanical Engineering and Graduate Program on Mechanical Engineering (PPGMEC-UFMG), 6627 Antonio Carlos Avenue, Belo Horizonte, MG, 31270-901, Brazil.

³Universidade Federal de Minas Gerais, Department of Occupational Therapy, 6627 Antonio Carlos Avenue, Belo Horizonte, MG, 31270-901, Brazil.

Abstract: *The goal of this paper is to investigate the effect of graphene nanosheets addition to laminated composites behavior under bending loadings. To be able to understand the nanoparticle dispersion into the polymeric systems and later on their application to laminate composites, a set of nanographene based nanocomposites are synthesized using a high shear mixer. TGA, DSC, XRD, and SEM/TEM/AFM analysis were performed for nanoparticles dispersion evaluation. Furthermore, the results have showed that nano-structures formed are mostly into the exfoliated condition. The Hybrid laminates were evaluated using three point bending tests. The results have shown that graphene based hybrid nanocomposites lead to better performance than conventional laminate composites*

Keywords: *graphene, nanographite, nanocomposites, composites, nanostructured materials*