

AVALIAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS EPOXÍDICOS REFORÇADOS COM TECIDO DE JUTA E DOPADOS COM NEGRO DE FUMO ATRAVÉS DO ENSAIO DE TRAÇÃO*

Raphael Henrique Morais Reis¹

Larissa Fernandes Nunes²

Flávio James Humberto Tommasini Vieira Ramos³

Lúcio Fabio Cassiano Nascimento⁴

Sergio Neves Monteiro⁵

Resumo

Há um grande esforço da comunidade acadêmica em desenvolver novos materiais com propriedades diferenciadas, especificamente, em sistemas de blindagem multicamada. Basicamente, os sistemas de blindagem multicamadas são formados por três camadas, tais como, pastilhas cerâmicas, compósitos reforçados com fibras naturais, e, por fim, camadas de tecido de aramida. Com isso em vista, este trabalho investigou os efeitos mecânicos causados pela adição do negro de fumo em compósitos reforçados com fibra de juta. O negro de fumo, de longa data, é conhecido como agente reforçante em pneus, já os compósitos reforçados com fibras de juta possuem ampla publicação científica nos sistemas de blindagem multicamadas, e a combinação de ambos, ao menos até o momento, foram pouco investigadas. Com isso em mente, foram preparadas e ensaiadas, dois compostos, seguindo a norma ASTM D3039/D3039M-17, ambos compostos por 30% em volume de fibra de juta e resina epóxi diferenciando-se apenas pela dopagem, em um deles, de 5% em volume de Negro de fumo. Os resultados encontrados nos compósitos dopados apresentaram uma melhora equivalente a 15%, na resistência mecânica, quando comparado ao seu equivalente não dopado. Além disso, os compósitos dopados com negro de fumo apresentaram propriedades condutoras, não exploradas devidamente neste trabalho.

Palavras-chave: Sistema de blindagem multicamadas; Ensaio de tração; Negro de fumo; Tecido de juta.

MECHANICAL EVALUATION OF EPOXIDE COMPOSITES REINFORCED WITH JUTE FABRIC AND DOPED WITH BLACK CARBON THROUGH THE TENSION TEST

Abstract

There is a great deal of effort by the academic community to develop new materials with differentiated properties, specifically in multilayer shielding systems. Basically, multilayer shield systems are formed of three layers, such as ceramic inserts, composites reinforced with natural fibers, and, finally, layers of aramid fabric. With this in view, this work investigated the mechanical effects caused by the addition of carbon black in jute fiber reinforced composites. Long-term carbon black is known as a reinforcing agent in tires, while jute fiber reinforced composites have extensive scientific publication in multilayer shield systems, and the combination of these, at least to date, has been poorly investigated. With this in mind, two composites, following the standard D3039 / D3039M-17, were prepared and tested, both composed of 30% by volume of jute fiber and epoxy resin differing only by the doping in one of 5% by volume of Carbon Black. The results obtained in the doped composites presented an improvement equivalent to 15% in the mechanical resistance when compared to its non-doped equivalent. In addition, the carbon black doped composites presented conductive properties, not properly exploited in this work.

Keywords: Multilayer armor system; Tensile test; Black carbon; Jute fabric.

¹ Engenheiro Metalurgista, Mestrando em Ciência dos Materiais, Departamento de Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil.

- ² Engenheiro(a) Metalurgista, M.Sc, Doutorando(a) em Ciência dos Materiais, Departamento de Ciência de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil.
- ³ Desenho Industrial – Projeto de Produto, Pós doutor, pesquisador, Departamento de Ciência de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil.
- ⁴ Engenheiro Metalurgista, D.Sc, Professor Titular do PGCM e Professor/Coordenador da Graduação, Departamento de Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil.
- ⁵ Engenheiro Metalurgista, PhD em Materials Science And Engineering, Professor Convidado do PGCM, Departamento de Ciência dos Materiais. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Materiais com propriedades diferenciadas têm sido o foco de inúmeras pesquisas, sobretudo, sobre sistemas de blindagem multicamadas (SBM) . Os SBMs utilizam propriedades específicas dos materiais que o compõem de modo a oferecer uma melhor proteção balística aos combatentes e veículos táticos. Basicamente, esse sistema é composto por três camadas, estrategicamente posicionadas. Na camada frontal são pastilhas de cerâmicas avançadas, a camada intermediária é um material compósito reforçado com fibras naturais, e por fim, tem-se uma série de tecidos de aramidas [1-13].

A cada camada dos SBMs temos uma redução da energia de impacto causada pelo projétil balístico sendo a maior parte reduzida na camada frontal. No entanto, a camada intermediária além de contribuir na absorção de energia, assim como a camada frontal, ela possui a função de capturar os fragmentos remanescentes do primeiro impacto. Em outras palavras, a segunda camada deve reter as partículas cerâmicas e os fragmentos do projétil [1-13]. Sendo assim, a avaliação dos compósitos que compõem a camada intermediária são de suma importância, principalmente, ao que se refere ao seu desempenho mecânico.

Compósitos são caracterizados pela união de dois ou mais materiais no qual um desses materiais terá o papel de matriz e os demais o de reforço [14,15]. Em SBMs a matriz possui origem polimérica termoplástica, como o epóxi e o poliéster [1-13]. Os elementos de reforço tipicamente utilizados nos SBMs são as fibras e tecidos naturais. As fibras de Juta são comumente conhecidas na literatura [10-13], principalmente, como reforços em compósitos para SBM, investigadas na forma de fibras e tecido com frações volumétricas, geralmente, de 30%. Logo, possivelmente, essa fibra é uma das mais indicadas para o desenvolvimento de compósitos, com a adição de outros elementos de reforço além das fibras.

O negro de fumo (NF) é amplamente utilizado na indústria da borracha como agente de reforço [16,17]. Propriedades mecânica e ao desgaste são as mais buscadas neste tipo de segmento ao agregar as partículas de NF a borracha [16]. No entanto, existem outras propriedades que podem ser obtidas pelo reforço do NF em matrizes poliméricas, as principais são a de condutividade elétrica e blindagem magnética [16-21]. De fato, a união desses fatores traz a possibilidade do desenvolvimento de novas aplicações, além das já existentes, as camadas intermediárias dos SBM.

Assim sendo, neste trabalho são investigados, separadamente, os comportamentos mecânicos, em esforços trativos, do compósito reforçados com 30% em volume de tecidos de Juta (EJ30), o comparando com, o compósito de matriz epoxídica dopada com 5% em volume de NF e reforçada com 30% em volume de tecidos de Juta (EJNF). As amostras tiveram seu preparo, dimensionamento e execução embasadas pela norma ASTM D3039/D3039M-17, específica para ensaios à tração de compósitos com fibras naturais. O objetivo principal deste trabalho é avaliar a consequência da dopagem de NF no comportamento mecânico dos compósitos reforçados com a fibra de juta. Em segundo plano, avaliar, superficialmente, outros aspectos como a adição de propriedades condutoras ao compósito.

2 DESENVOLVIMENTO

O trabalho descrito abaixo foi executado pelo Departamento de Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia (IME) em parceria com o Laboratório de Ensaios Não Destrutivo, Corrosão e Soldagem (LNDC) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

2.1 Materiais e Métodos

Em primeiro lugar, os componentes foram pesados em uma balança eletrônica Gehaka BK300, nas proporções ideia para cada amostra. Para amostra EJ30 a proporção usada foi de 30%vol. de tecidos de juta, recortados conforme as dimensões do molde de prensagem, e 70%vol. da mistura líquida de resina epóxi e catalisador. Em contrapartida, as amostras EJNF foram medidas seguindo as proporções de 30%vol. de tecido, 5%vol. de NF e 65%vol. da mistura líquida de resina epóxi e catalisador. Em seguida, os tecidos foram colocados em uma estufa de secagem, equipamento Quimis modelo Q317M-22, a 80oC por cerca de 24 hora e os demais componentes armazenados.

Baseado na norma ASTM D3039/D3039M-17 [22], confeccionou-se as amostras para o ensaio de tração referente a cada compósitos. Com o tecido seco, o processo de prensagem dos compósitos foram iniciados. Para a amostra EJNF, os componentes, resina, NF e catalisador foram misturados, manualmente por 20 segundos, antes de serem dispostos junto com o tecido de juta na matriz. A amostra EJ30, por sua vez, seguiu o mesmo processo mas sem a adição do NF. A dimensão da matriz metálica utilizada tinha 15 cm de comprimento, 12 cm de largura e 0,2 cm de espessura, com um volume total de 36 cm³. Enfim, ambos os compósitos, EJ30 e EJNF, foram compactados em uma prensa hidráulica, equipamento Skay 15 toneladas, com uma pré carga de 3 toneladas durante 1 minuto e uma carga final de 5 toneladas durante 24 horas.

Passado o tempo de curas dos compósitos, os mesmos foram serradas por uma serra fita Makita LB1200F. Cada amostra foi dimensionada com ,aproximadamente, 120 mm de comprimento, 12 mm de largura e 2 mm de espessura, valores proporcionais aos indicados pela norma[22]. Por fim, os CPs foram enumerados e enviados ao local de ensaio.

O ensaios de tração foram realizados com uma taxa de tração equivalente a 2 mm/min. As amostras foram acopladas ao equipamento através de garras em cunhas e ensaiadas. Os resultados obtidos foram processados e analisados via software emitindo o relatório final com os valores e gráficos aqui apresentados.

O teste para avaliar propriedades extras na dopagem de NF foi a de condução elétrica. Através da adaptação de um circuito elétrico básico, para acender um diodo emissor de luz (LED,) as propriedades condutoras da dopagem com NF foram observadas pelo acionamento do LED. A figura 1 mostra o circuito elétrico utilizado na avaliação. O conceito básico utilizado neste teste foi a substituição da resistência elétrica do circuito pelo compósito para avaliar se há passagem de corrente.

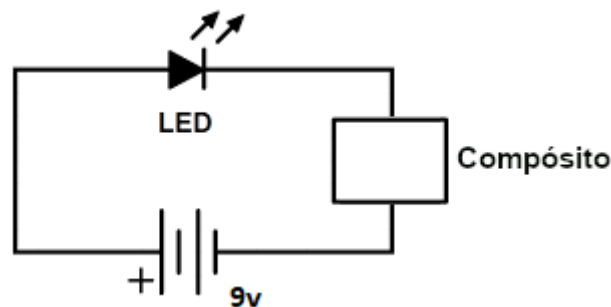


Figura 1. Esquema do circuito elétrico adaptado para avaliar a propriedade condutora do compósito.

2.2 Resultados e Discussões

Os CPs foram todos avaliados sem qualquer imprevisto, tais como, amostras descartadas ou escorregamento entre os CPs e a garra em cunha. Primeiramente, foram avaliadas as amostras não dopadas, tendo estas apresentado um limite de resistência à tração (LRT) médio equivalente a 37,51 MPa. Em contrapartida, as amostras em que as matrizes dopadas com NF obtiveram um LRT equivalente a 43,18 MPa. Aparentemente, o NF possibilitou uma melhora, aproximadamente, de 15% no LRT médio do compósito de matriz epoxídica reforçada com tecido de juta. A Tabela 1 apresenta os principais resultado médios obtidos pelo ensaio de tração

Tabela 1. Comparação dos resultados médios gerados pelo ensaio de tração.

| Amostra | Tensão (N) | Limite de Resistência à Tração (MPa) | Deformação Máxima (%) | Módulo de Elasticidade (GPa) |
|---------|------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| EJ30 | 975 | 37,51 | 1,07 | 4,26 |
| EJNF | 1122 | 43,18 | 1,06 | 4,93 |

Analisando os demais resultados, pode-se observar um crescimento, assim como no LRT, de aproximadamente 15% no módulo de elasticidade nos CPs de EJNF, quando comparado à amostra EJ30. Contudo, a grandeza relacionada a deformação máxima houve uma leve diminuição, menores que 1%, nas amostras dopados. Possivelmente, a interação das partículas de NF com a matriz epoxídica produziu uma maior distribuição das forças trativas, assim como acontece nas fibras, provavelmente, gerando essa melhora de 15% no seu desempenho mecânico.

O comportamento apresentado pelos compósitos pesquisados, eventualmente, pode ser comparado aos precipitados existentes nas ligas metálicas[23,24]. Geralmente, o desenvolvimento de precipitados em uma liga produzem, assim como foi visto nos compósitos investigados, aumento no LRT e no módulo de elasticidade. Além disso, houve redução da deformação máxima assim como é encontrado em ligas que possuem esses precipitados. Inesperadamente, este padrão no comportamento mecânica foi semelhante aos compósitos, sendo assim, necessário uma pesquisa mais profunda sobre essas semelhanças, principalmente, quanto ao tamanho dos precipitados [24].

O ensaio de tração gerou 11 gráficos referentes à carga aplicada versus a extensão de cada amostra ensaiada. A Figura 2 mostra os gráficos gerados. Visualmente, existe uma pequena dispersão de resultados para cada amostras de EJ30. A carga máxima alcançada por essa amostra foi de 1381 newtons, no CP 3, e a mínima de

555 newtons, no CP 8. No entanto, estatisticamente houve um desvio padrão da carga relativamente baixa, equivalente a 241 newtons, enquanto o coeficiente de variação, por sua vez, foi de aproximadamente 24,7%.

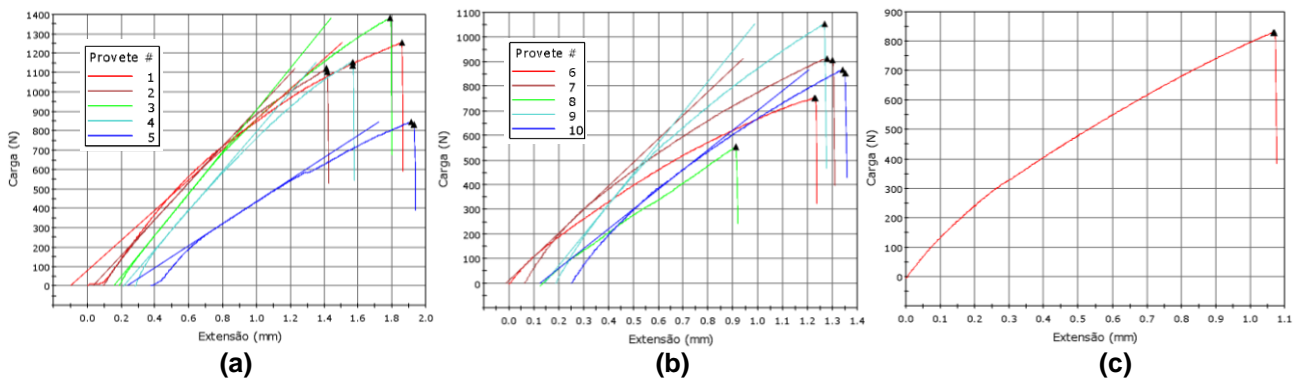


Figura 2. Gráficos da tensão versus extensão gerado pelo ensaios de tração dos compósitos não dopados com NF; (a) amostras de 1 a 5; (b) amostras de 6 a 10; (c) amostra 11; .

O alongamento, apresentado pelas amostras de EJ30, obtiveram um valor máximo de 1,55%, no CP 1, e mínimo de 0,66%, no CP 8. Logo, o desvio padrão referente ao alongamento alcançou a faixa de 0,25% e um coeficiente de variação com cerca de 23%. Sendo assim, de forma geral, pode-se afirmar que a dispersão dos dados foi de aproximadamente $24\% \pm 2$ em todas as propriedades avaliadas para a amostra EJ30. Essa afirmação pode ser verificada ao se analisar o coeficiente de variação do módulo de elasticidade com aproximadamente 22,4 %.

Semelhante às amostras não dopadas, EJ30, apresentada acima, o ensaio de tração das amostras dopadas, EJNF, geraram 11 gráficos. Os valores máximo e mínimo para a carga aplicada foram de 1462 e 660 newtons, respectivamente, nos CPs 7 e 10. Além disso, os valores máximos e mínimos de alongamento das amostras EJNF foram de 1,48 e 0,57 por cento, respectivamente. A Figura 3 mostra os gráficos obtidos pelos 11 CPs ensaiados da amostra EJNF.

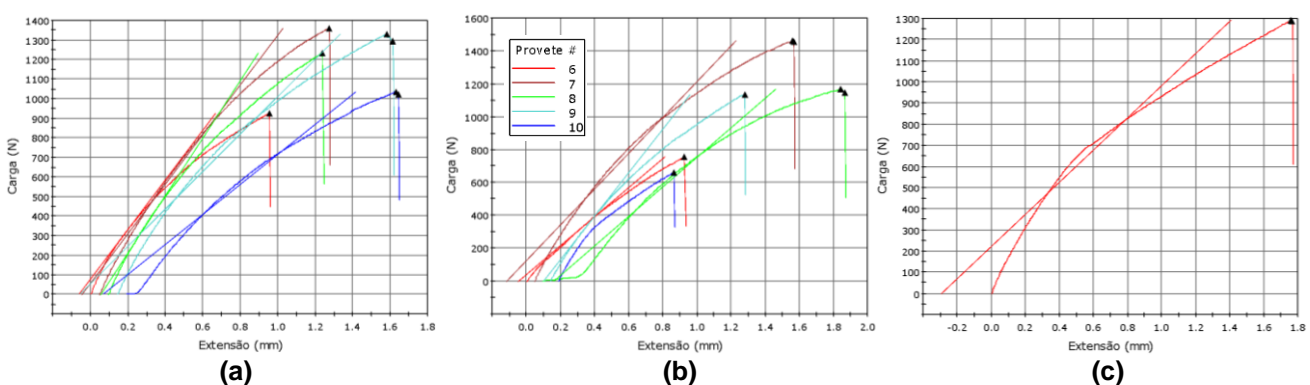


Figura 3. Gráficos da carga versus extensão gerado pelo ensaios de tração dos compósitos não dopados com NF; (a) amostras de 1 a 5; (b) amostras de 6 a 10; (c) amostra 11.

A análise estatística das amostras EJNF demonstram valores similares aos das amostras de EJ30. O desvio padrão (DP) encontrado para a carga aplicada foi equivalente a 255 newtons enquanto o DP da extensão máxima equivale a 0,24%. Em outros termos, especificamente, no ponto de vista do coeficiente de variação, pode-se verificar um valor médio, aproximado, de $25\% \pm 3$ para cada propriedade encontrada da amostras EJNF. Esses valores indicam uma pequena dispersão nos

dados avaliados, embora, ainda sejam índices positivos para a confiabilidade dos resultados.

Em suma, os dados apresentados pelas amostras EJ e EJNF revelam que a utilização do negro de fumo como dopante em uma matriz polimérica contribui positivamente na resistência mecânica do material. Entretanto, os valores de extensão encontrados nas amostras dopadas foram menores, o que é interpretado como uma perda de ductilidade do material. Além do mais, foi verificado que as grandezas referentes ao limite de escoamento (LE), limite de resistência à tração (LRT) e limite de resistência à fratura (LRF), basicamente, eram iguais para cada corpo de prova, independente da matriz ser dopada com NF, ou não. A tabela 2 apresenta os valores médios dos três melhores resultados obtidos nas amostras EJ30 e EJNF.

Tabela 2. Comparação dos resultados médios referentes ao LE, LRT e LRF.

| Amostra | Limite de Escoamento (MPa) | Limite de Resistência à Tração (MPa) | Limite de Resistência à Fratura (MPa) |
|----------------|-----------------------------------|---|--|
| EJ30 | 45,3 | 44,8 | 45,3 |
| EJNF | 50,3 | 49,9 | 50,3 |

Materiais que apresentam, cada vez mais, valores próximos de LE, LRT e LRF geralmente possuem um comportamento considerado frágil [25]. Logo, os compósitos investigados nesse trabalho podem ser considerado materiais com comportamento, aparentemente, frágeis. Portanto, a redução da extensão média gerada pela matriz dopada com o NF, além de ser menor que 1%, em termos gerais, pode ser considerada insignificante as aplicações desse material, além de estar, possivelmente, dentro do erro estatístico dos dados.

Os CPs fraturados que apresentaram melhores desempenhos mecânicos de ambas as amostras, EJ30 e EJNF, foram analisados morfologicamente em sua interface fibra/matriz. A Figura 4 (a) e 4 (b) ilustram as imagens geradas, via MEV, para as amostras EJ30 e EJNF, respectivamente. Aparentemente, as amostras não apresentaram grande diferença quanto à adesão entre a fibra e a matriz. Entretanto, foi possível identificar, na Figura 4 (b), partículas, possivelmente, associadas a aglomerados de NF, em torno da interface fibra/matriz, assim como na superfície da fibra e da matriz isoladamente. Contudo, não foi possível associar diretamente a relação dessas partículas com o desempenho mecânico apresentado pelas amostras EJNF.

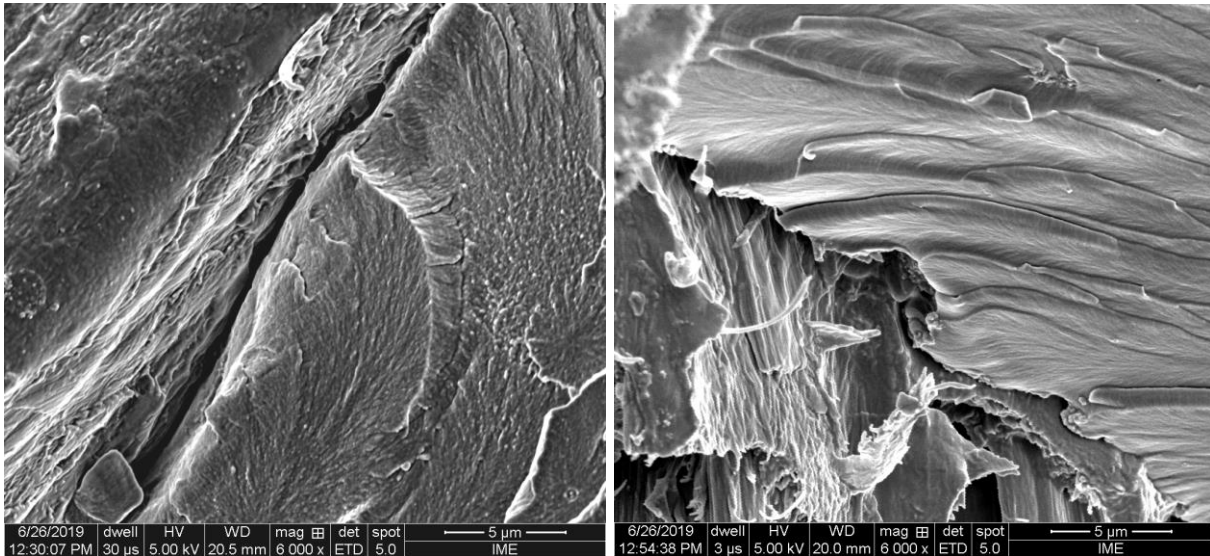


Figura 4. Imagem em MEV dos compósitos (a) EJ30 e (b) EJNF.

A fim de identificar eventuais propriedades condutivas causadas pela dopagem de NF foram efetuados testes em um circuito elétricos de LED. A figura 5 ilustra o resultado do teste executado. Basicamente, a amostra EJNF foi utilizada como um resistor e sobre a mesma foi gerada uma diferença de potencial através de uma bateria de 9 volts. Dessa forma, unicamente era esperado que o LED, caso acesso, confirma-se a condução de eletricidade por esse compósito. Enfim, após o teste foi confirmado que as amostras dopadas com 5% vol. de NF são capazes de conduzir corrente suficiente para o funcionamento de circuito eletrônicos, como os de um LED.



Figura 5. Teste de condução elétrica na amostra EJNF.

3 CONCLUSÃO

Concluindo, os resultados obtidos neste trabalho mostram que a dopagem da matriz epoxídica com NF de compósitos reforçados com tecido de juta melhoram em 15% as propriedades mecânicas desse material. Sendo mais específico, houve uma melhora no LRT na grandeza equivalente de 37,5 para 43,2 MPa entre as amostras EJ30 e EJNF, respectivamente. Proporcionalmente, o módulo de elasticidade dos compósitos investigados passou de 4,26 para 4,93 GPa após a dopagem da matriz com NF. Suponha-se que o comportamento apresentado pelos espécimes se assemelha ao comportamento das ligas metálicas, sem e com precipitados, essa hipótese se deve ao aumento de resistência apresentado, mas principalmente, a diminuição da extensão máxima dos compósitos dopados. Estatisticamente, a dispersão dos resultado alcançaram um coeficiente de variação, aproximado, de 25% demonstrando a necessidade de um estudo mais aprofundado sobre esses compósitos. As imagens de MEV indicaram a presença de aglomerados de NF,

possivelmente, nanométricos tanto na matriz quanto em sua interface com a fibra. Por último, o compósito EJNF foi avaliado, superficialmente, quanto a sua condutividade elétrica com resultado suficiente de condução ao ponto de ativar um diodo emissor de luz.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Departamento de Ciência dos Materiais do IME, ao Laboratório de Ensaios Não Destrutivos, Corrosão e Soldagem da UFRJ e principalmente às agências de fomento, CAPES CNPq e Faperj.

REFERÊNCIAS

- 1 Rohen LA, Margem FM, Monteiro SN, Vieira CM, Madeira de Araujo B, Lima ES. Ballistic efficiency of an individual epoxy composite reinforced with sisal fibers in multilayered armor. *Materials Research*. 2015 Dec;18:55-62.
- 2 de Oliveira Braga F, Lopes PH, da Luz FS, Lima ÉP, Monteiro SN. Influence of the areal density of layers in the ballistic response of a multilayered armor system using box-behnken statistical design. *INTMS Annual Meeting & Exhibition 2018 Mar 11* (pp. 557-564). Springer, Cham.
- 3 Cruz RB, Junior L, Pereira E, Monteiro SN, Louro LH. Giant bamboo fiber reinforced epoxy composite in multilayered ballistic armor. *Materials Research*. 2015 Dec;18:70-5.
- 4 de Oliveira Braga F, Bolzan LT, da Luz FS, Lopes PH, Lima Jr ÉP, Monteiro SN. High energy ballistic and fracture comparison between multilayered armor systems using non-woven curaua fabric composites and aramid laminates. *Journal of Materials Research and Technology*. 2017 Oct 1;6(4):417-22.
- 5 Nascimento LF, Louro LH, Monteiro SN, Lima ÉP, da Luz FS. Mallow fiber-reinforced epoxy composites in multilayered armor for personal ballistic protection. *JOM*. 2017 Oct 1;69(10):2052-6.
- 6 Monteiro SN, de Oliveira Braga F, Lima EP, Louro LHL, Drelich JW. Promising curaua fiber-reinforced polyester composite for high-impact ballistic multilayered armor. *Polymer Engineering & Science*. 2017 Sep;57(9):947-54.
- 7 Luz FS, Monteiro SN, Lima ES, Júnior L, Pereira É. Ballistic application of coir fiber reinforced epoxy composite in multilayered armor. *Materials Research*. 2017;20:23-8.
- 8 de Oliveira Braga F, Milanezi TL, Monteiro SN, Louro LH, Gomes AV, Lima Jr ÉP. Ballistic comparison between epoxy-ramie and epoxy-aramid composites in Multilayered Armor Systems. *Journal of materials research and technology*. 2018 Oct 1;7(4):541-9.
- 9 Braga FD, Bolzan LT, Ramos FJ, Monteiro SN, Lima Jr ÉP, Silva LC. Ballistic efficiency of multilayered armor systems with sisal fiber polyester composites. *Materials Research*. 2017;20:767-74.
- 10 Luz FS, Junior L, Pereira E, Louro LH, Monteiro SN. Ballistic test of multilayered armor with intermediate epoxy composite reinforced with jute fabric. *Materials Research*. 2015 Dec;18:170-7.
- 11 Nascimento LF, Louro LH, Monteiro SN, Gomes AV, Marçal RL, Júnior L, Pereira É, Margem JI. Ballistic performance of mallow and jute natural fabrics reinforced epoxy composites in multilayered armor. *Materials Research*. 2017;20:399-403.
- 12 Monteiro S, Pereira A, Ferreira C, Pereira Júnior É, Weber R, Assis F. Performance of plain woven jute fabric-reinforced polyester matrix composite in multilayered ballistic system. *Polymers*. 2018;10(3):230.
- 13 de Assis FS, Pereira AC, da Costa Garcia Filho F, Lima Jr ÉP, Monteiro SN, Weber RP. Performance of jute non-woven mat reinforced polyester matrix composite in multilayered armor. *Journal of materials research and technology*. 2018 Oct 1;7(4):535-40.

- 14 ASTM D. 3878-02, Standard Terminology for Composite Materials. Annual book of ASTM standards.;15.
- 15 Chawla KK. Composite materials: science and engineering. Springer Science & Business Media; 2012 Sep 26.
- 16 Dannenberg EM. Bound rubber and carbon black reinforcement. Rubber chemistry and technology. 1986 Jul;59(3):512-24.
- 17 Studebaker ML. The chemistry of carbon black and reinforcement. Rubber Chemistry and Technology. 1957 Nov;30(5):1400-83.
- 18 Huang JC. Carbon black filled conducting polymers and polymer blends. Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute. 2002 Dec;21(4):299-313.
- 19 Medalia AI. Electrical conduction in carbon black composites. Rubber Chemistry and Technology. 1986 Jul;59(3):432-54.
- 20 Sumita M, Sakata K, Asai S, Miyasaka K, Nakagawa H. Dispersion of fillers and the electrical conductivity of polymer blends filled with carbon black. Polymer bulletin. 1991 Feb 1;25(2):265-71.
- 21 Schueler R, Petermann J, Schulte K, Wentzel HP. Agglomeration and electrical percolation behavior of carbon black dispersed in epoxy resin. Journal of Applied Polymer Science. 1997 Mar 28;63(13):1741-6.
- 22 ASTM International. ASTM D3039/D3039M-17 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. West Conshohocken, PA; ASTM International, 2017.
- 23 Gladman T. Precipitation hardening in metals. Materials science and technology. 1999 Jan 1;15(1):30-6.
- 24 Fang Q, Li L, Li J, Wu H, Huang Z, Liu B, Liu Y, Liaw PK. A statistical theory of probability-dependent precipitation strengthening in metals and alloys. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2019 Jan 1;122:177-89.
- 25 Öztürk HO, Kahraman Y. Effects of glass fiber reinforcement to tensile strength in epoxy matrix granular composite materials. Sakarya University Journal of Science. 2019 Oct 1;23(5):736-43.