

Resistência balística e propriedades de absorção de micro-ondas de um composto feito de tecido de aramida impregnado com polietilenoglicol e nanopartículas de hematita

Danúbia Bordim de Carvalho^{1*}

¹ Instituto Militar de Engenharia — Praça General Tibúrcio, 80, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil,
CEP 29.270-030

* dan.bordim@gmail.com

RESUMO: A resistência balística e a absorção de micro-ondas de um composto de tecido de aramida impregnado com polietilenoglicol e nanopartículas de hematita foram investigadas para diferentes concentrações de hematita entre 0 e 17% em peso. Foram identificados diferentes mecanismos de absorção de dano e de energia durante o impacto balístico: formação de cone na face posterior do alvo, falha de tração dos fios primários e deformação dos fios secundários. Em termos de absorção de energia, os melhores resultados foram obtidos com hematita a 7% em peso, enquanto a menor profundidade de penetração (DOP) foi observada em um composto com hematita a 9% em peso. Uma imagem de microscópio eletrônico de varredura (MEV) do compósito com 7% de hematita após o teste balístico mostrou que o principal mecanismo de absorção de energia foi a deformação dos fios secundários. A absorção de micro-ondas foi medida usando a técnica de guia de ondas na faixa de frequência de 8 a 12 GHz. Os resultados mostraram que a perda dielétrica ϵ''/ϵ' é máxima para uma concentração de 3% de hematita, enquanto a perda magnética μ''/μ' é máxima para uma concentração de 11% em peso de hematita. Um compromisso razoável entre a resistência balística e a absorção de micro-ondas parece ser um composto com 7% em peso de hematita.

PALAVRAS-CHAVE: Absorção de radar; blindagem balística; impacto balístico; fluido de espessamento por cisalhamento.

1. Introdução

Desde a antiguidade a humanidade tem buscado desenvolver artigos para proteção do corpo contra perigos e lesões. Peles de animais, fibras naturais e materiais metálicos como bronze, ferro e aço foram usados para esse fim ao longo da história. Durante o século XX, as fibras naturais deram lugar às sintéticas.

A armadura moderna é projetada para proteger contra projéteis, bem como contra perfurações e cortes causados por objetos pontiagudos. Elas geral-

ABSTRACT: The ballistic resistance and microwave absorption of a composite of aramid fabric impregnated with polyethylene glycol and hematite nanoparticles was investigated for different hematite concentrations between 0 and 17 wt%. Different damage and energy absorbing mechanisms during ballistic impact were identified: cone formation on the back face of the target, tensile failure of primary yarns and deformation of secondary yarns. In terms of energy absorption, the best results were achieved with 7 wt% hematite, while the smallest depth of penetration (DOP) was observed for a composite with 9 wt% hematite. A scanning electron microscope (SEM) image of the composite with 7% hematite after the ballistic test showed that the main energy absorption mechanism was deformation of secondary yarns. Microwave absorption was measured using the waveguide technique in the frequency range from 8 to 12 GHz. Results showed that the dielectric loss ϵ''/ϵ' is maximum for a concentration of 3% hematite, while the magnetic loss μ''/μ' is maximum for a concentration of 11 wt% hematite. A reasonable compromise between ballistic resistance and microwave absorption seems to be a composite with 7 wt% hematite.

KEYWORDS: Radar absorption; Ballistic shielding; Ballistic impact; Shear thickening fluid.

mente consistem em uma combinação de metal, cerâmica e tecidos. Os tecidos são compostos por fibras poliméricas de alta resistência que fornecem proteção adicional sem comprometer a mobilidade de soldados, policiais e de equipes de segurança[1,2]. Reforços avançados foram desenvolvidos para melhorar a flexibilidade e reduzir o peso desses tecidos, usando menos camadas e mantendo a mesma eficiência. Esses reforços são desenvolvidos impregnando os tecidos com fluidos não newtonianos cuja viscosidade aparente varia com o aumento da tensão[3-11].

A escolha de nanopartículas magnéticas para a produção de um fluido não newtoniano pode adicionar a propriedade de material absorvente de radar (RAM) ao tecido. Esses materiais são atenuadores eficientes da radiação eletromagnética em comprimentos de onda usados por radares, reduzindo a seção transversal do radar de soldados, automóveis, navios de guerra e aeronaves militares. Teber et al.[12] usaram materiais magnéticos de Ni-Co em compósitos poliméricos como absorvedores de micro-ondas na banda X (8-12 GHz).

O objetivo deste trabalho foi estudar o reforço de armadura e o comportamento de absorção de radar[12-17] de um fluido não newtoniano à base de hematita. Para isso, foram produzidas misturas de nanopartículas de hematita com polietileno glicol 200 (PEG-200) com diferentes concentrações de hematita. Essas misturas foram usadas para impregnar o tecido de aramida; a resistência balística e as propriedades de absorção de micro-ondas do compósito foram avaliadas para diferentes concentrações de hematita. Além disso, foram investigados os mecanismos de absorção de danos e energia durante o impacto balístico.

2. Materiais e métodos

2.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho foram nitrato férrico (Sigma-Aldrich, 98%), glicina (Sigma-Aldrich, 98,5%), 200 g/mol de PEG (Honeywell Riedel-de Haën), etanol absoluto (Quimex, 93%), tecido aramida de 0,28 mm de espessura com densidade de 210 g/m² [HY Networks (Shanghai)] e MDF de 1 polegada de espessura (Arauco do Brasil).

2.2 Preparação da amostra

As nanopartículas de hematita foram sintetizadas pelo método de combustão com razão glicina/nitrato de 0,5[18,19]. Misturas de PEG-200 com hematita 0%, 3%, 5%, 7%, 9%, 11%, 13%, 15% e 17% foram sonicadas por 30 min, diluídas em 40 mL de etanol, sonicadas novamente por 30 minutos e utilizadas para im-

pregnar dois pedaços quadrados de tecido de aramida com área de 49 cm² em um vidro de relógio de 150 mm de diâmetro. Essas peças foram prensadas por 10 min a 3 ton/cm². A prensagem das amostras reduz a massa sem diminuir a resistência balística, pois apenas o fluido não impregnado é removido. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 79 °C por 24 h.

2.3 Métodos Experimentais

A hematita foi caracterizada por difração de raios X usando um difratômetro Expert Pro Panalitical com radiação K α (1,5418 Å) e o software TOPAS baseado no método de Rietveld.

Para os testes balísticos, foi utilizado um rifle de ar comprimido Gunpower SSS com supressor de ruído Padrão Armas. O projétil era de chumbo de calibre 22 com uma massa estimada de 3,3 g. A velocidade inicial foi medida usando um cronógrafo balístico Air Chrony MK3 com precisão de 0,15 m/s e a velocidade residual foi medida usando um cronógrafo balístico ProChrono Pal com precisão de 0,31 m/s.

Após os testes balísticos, foram obtidas imagens de amostras com hematita a 7% em um FEI Quanta FEG 250 SEM.

A caracterização eletromagnética dos compósitos foi realizada por meio de medidas de refletividade/absorção utilizando a técnica de guia de onda na banda X do espectro eletromagnético (8 a 12 GHz). Este dispositivo foi acoplado a um analisador de rede KEYSIGHT PNA-L (modelo N5232A) com um gerador de frequência (300 kHz-20 GHz). O material de referência utilizado para avaliar a eficiência de absorção dos compósitos foi uma placa de alumínio, a qual reflete 100% da radiação incidente.

2.4 Massa relativa M_c

A massa relativa M_c foi calculada usando a Eq. 1 para expressar a quantidade relativa de impregnação de aramida pelo fluido[11]:

$$M_c = (Massa\ do\ compósito - Massa\ de\ aramida) / Massa\ de\ aramida. \quad (1)$$

2.5 Energia de absorção (E_{Abs})

Nos testes de absorção de energia, o rifle de ar comprimido foi posicionado a 5 m de distância do alvo, que consistia em uma amostra quadrada presa a uma estrutura circular de MDF fixada por um torno de bancada e alinhada perpendicularmente ao rifle. Um cronógrafo balístico foi colocado a 10 cm de distância da saída do supressor de ruído e outro cronógrafo balístico foi colocado 10 cm atrás do compósito para determinar a velocidade residual do projétil. A energia de absorção foi estimada usando a equação

$$E_{\text{Abs}} = M_p (v^2 - v_r^2)/2 \quad (2)$$

em que M_p é a massa do projétil, v é a velocidade de impacto e v_r é a velocidade residual[20]. Pasquali et al.[21] mostrou que a energia é absorvida por um alvo de tecido fino devido a seis mecanismos de absorção/dissipação: formação de cone na face traseira do alvo ; falha de tração de fios primários ; deformação de fios secundários ; obstrução por cisalhamento ; início e crescimento da delaminação; e rachaduras na matriz[22,23].

2.6 Profundidade de penetração (DOP)

Nos testes de DOP , o rifle de ar foi posicionado a 5 m de distância do alvo, que consistia em uma amostra quadrada presa com fita adesiva a uma placa de MDF e alinhada perpendicularmente ao rifle[24–29]. Um supressor de ruído foi usado para aumentar a estabilidade do projétil na saída do rifle de ar, reduzindo a turbulência causado pelo escapamento. As placas de MDF foram usadas como anteparas porque o MDF é um material homogêneo, plano e denso, sem o grão da madeira maciça. O cronógrafo balístico foi colocado a 10 cm de distância da saída do supressor de ruído. Quando a distância entre a arma de ar comprimido e o alvo é pequena, como neste caso, a velocidade de impacto pode ser substituída pela velocidade de saída[30].

2.7 Fator de mérito

Uma vez que, no ensaio balístico, as amostras são finas e homogêneas, a desaceleração do projétil a

pode ser assumida como constante. Aplicando a segunda lei de Newton

$$a = - F/M_p \quad (3)$$

quando F é a força no projétil, a equação de Torricelli pode ser escrita na forma

$$v^2 - v_r^2 = 2 (F/M_p) d \quad (4)$$

em que d é a distância percorrida pelo projétil. Substituindo a Eq. 2 na Eq. 4 e dividindo pela massa relativa M_c temos

$$E_{\text{Abs}}/(M_c d) = F / M_c \quad (5)$$

Um fator de mérito FM foi definido como a razão mostrada na Eq. 5 com $DOP = d$:

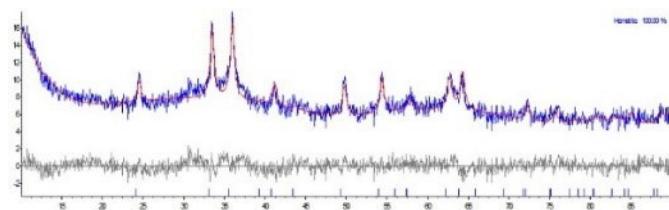
$$FM = E_{\text{Abs}} / M_c DOP \quad (6)$$

3. Resultados e discussão

3.1 Difração de raios X

A Figura 1 mostra o padrão de difração de raios X das nanopartículas. O difratograma mostrou 100% de hematita, com tamanho de cristalito de 20 nm e GOF (bondade do ajuste) de 1,29.

Figura 1 - Difratograma de raios X das nanopartículas.



3.2 Testes balísticos

Os testes balísticos consistiram em medir a energia absorvida pelo compósito e a profundidade de pene-

tração (*DOP*) de um projétil em um anteparo de MDF (placa de fibra de média densidade).

Todos os tiros penetraram completamente na amostra. Um tiro foi disparado em cada experimento e cinco experimentos foram realizados para cada composição.

A Tabela 1 mostra a massa relativa do compósito (M_c), a energia de absorção (E_{Abs}), a profundidade de

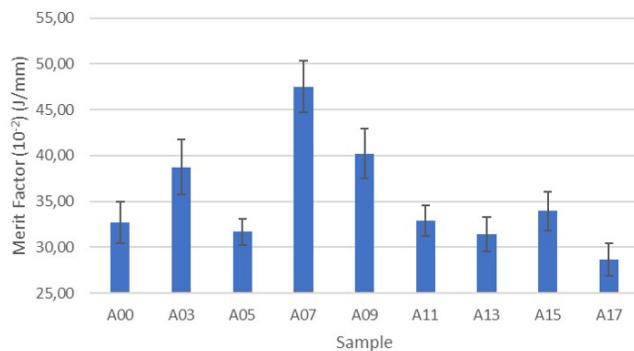
penetração (*DOP*) e o fator mérito (*FM*) para todas as composições. A energia absorvida é máxima para as amostras com 7% de hematita, enquanto a *DOP* é mínima para amostras com 9% de hematita. Isso é atribuído ao fato de que o uso do anteparo altera o comportamento mecânico do tecido de aramida, favorecendo a quebra das fibras primárias, o que se torna um importante mecanismo de absorção de energia.

Tabela 1 - Resultados médios dos ensaios balísticos.

COMPÓSITO	M_c	E_{Abs} (J)	DOP (milímetro)	FM (10⁻²) (J/mm)
A00	0.58 ± 0.07	5.70 ± 0.75	29.85 ± 0.35	32.72 ± 2.26
A03	0.62 ± 0.07	6.66 ± 0.91	27.75 ± 0.39	38.71 ± 3.00
A05	0.64 ± 0.06	6.69 ± 0.40	33.00 ± 0.43	31.68 ± 1.40
A07	0.57 ± 0.07	7.74 ± 0.58	28.58 ± 0.55	47.51 ± 2.78
A09	0.56 ± 0.06	6.01 ± 0.76	26.70 ± 0.40	40.20 ± 2.71
A11	0.53 ± 0.07	5.21 ± 0.37	29.92 ± 0.27	32.85 ± 1.67
A13	0.61 ± 0.06	6.51 ± 0.66	33.93 ± 0.55	31.45 ± 1.87
A15	0.58 ± 0.06	5.51 ± 0.54	27.97 ± 0.57	33.96 ± 2.12
A17	0.68 ± 0.09	6.14 ± 0.55	31.52 ± 0.50	28.65 ± 1.78

A Figura 2 mostra a dependência do fator de mérito da concentração de hematita. Os valores de *FM* foram calculados usando a Eq. 2 com os valores de E_{Abs} , *DOP* e M_c da Tabela 1. A amostra com maior valor de *FM* foi a de hematita a 7% (A07).

Figura 2 - Dependência do fator de mérito da concentração de hematita.



A Figura 3 mostra uma amostra com hematita a 7% após o teste de absorção de energia. Pode-se ver fios primários e secundários deformados devido à

deformação prolongada em toda a amostra, sugerindo uma força de arrancamento moderada.

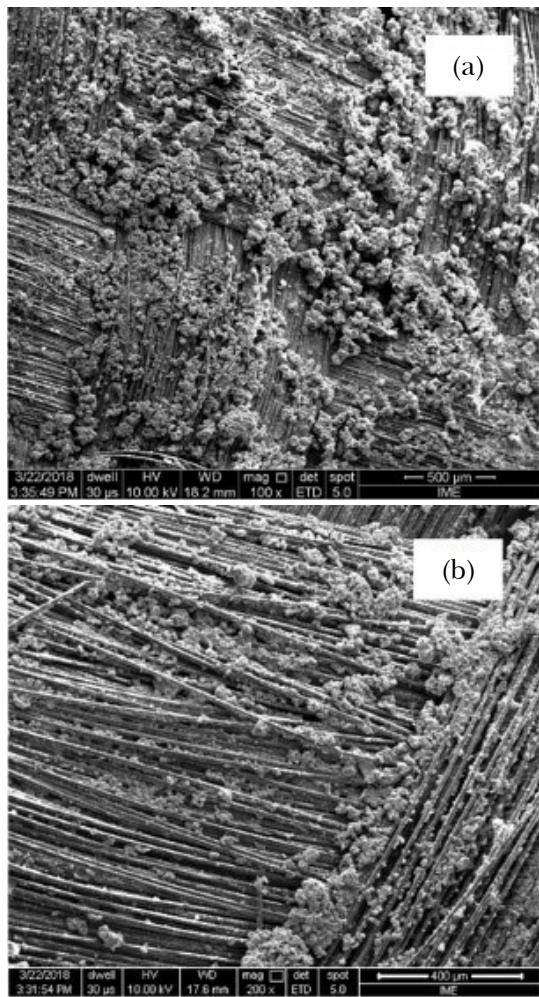
Figura 3 - Amostra com hematita a 7% após o teste de absorção de energia.



3.5 Imagens de microscópio eletrônico de varredura (MEV) de uma amostra A07

A Figura 4 mostra imagens de MEV de uma amostra com hematita a 7% (A07) antes e depois do teste balístico. Antes do ensaio balístico (a), há um excesso de carga que não impregna os fios de aramida e, portanto, não contribui significativamente para a resistência balística; e após o teste balístico (b), quase não há excesso de carga, exceto no canto inferior direito da imagem, onde se pode ver um agrupamento provavelmente devido ao impacto[26]. As regiões de impacto, que não são mostradas, estão na direção do canto superior esquerdo das imagens.

Figura 4 - Imagem MEV de amostras com hematita a 7% (a) antes e (b) após o impacto.



3.4 Medidas de refletividade/absorção

Conforme mostrado na Figura 5, a perda dielétrica ϵ''/ϵ' é máxima e a perda de refletividade é mínima para uma concentração de 3% de hematita. De acordo com Huo et al.[31], isso se deve ao fato de que, para concentrações de hematita maiores que 3%, a profundidade da pele torna-se muito pequena devido ao aumento da condutividade e a maior parte da onda eletromagnética é refletida. Conforme mostrado na Figura 6, a perda magnética μ''/μ' é máxima para hematita 11% em peso na faixa de frequência de 8,2 a 11,6 GHz, mas esse efeito não é suficiente para compensar a perda de reflexão causada pelo aumento da condutividade, mostrada na Figura 5 (a). É por isso que, de acordo com a Figura 5 (b), não apresenta o melhor desempenho em termos de refletividade.

Figura 5 - (a) Perda dielétrica e (b) perda de refletividade para aramida pura e aramida impregnada com um fluido de espessamento por cisalhamento (STF) com 3%, 7%, 11% e 17% de hematita.

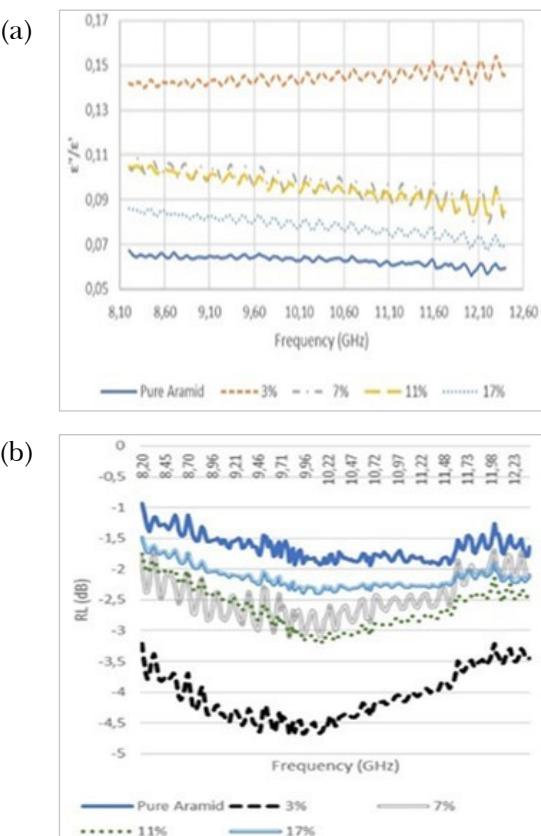
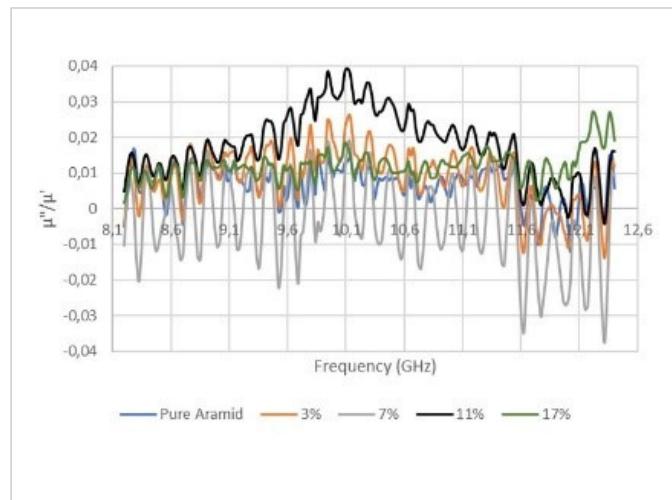


Figura 6 - Perda magnética para aramida pura e aramida impregnada com um SFT com 3%, 7%, 11% e 17% de hematita.



Referências

- [1] CAVALLARO, P.V., Armadura macia: uma visão geral dos materiais, fabricação, teste e dinâmica de impacto balístico, 1º de agosto de 2011, Relatório Técnico NUWC-NPT 12.057
- [2] EGRES, R. G. Jr., LEE, Y.S., KIRKWOOD, J. E., KIRKWOOD, K. M., WETZEL E. D., WAGNER N.J. *Liquid armor: Protective fabrics utilizing shear thickening fluids*. In: IFAI INT. CONF. ON SAFETY AND PROTECTIVE FABRICS, 4. 2004, Pittsburgh. Conferência [...]. Pittsburgh, 2004.
- [3] EGRES, R.G. Jr., HALBACH, C.J., DECKER, M.J., WETZEL E.D., WAGNER N.J., Stab performance of shear thickening fluid (STF)-fabric composites for body armor applications, Proceeding of SAMPE 2005: New Horizons for Materials and Processing Technologies. Long Beach, CA., 2005.
- [4] BARNES, H. A., HUTTON, J.F., WALTERS, K., An introduction to rheology, Rheology Series 3, Elsevier, 1989.
- [5] MARANZANO, B.J., WAGNER, N.J., The effects of interparticle interactions and particle size on reversible shear thickening: Hard-sphere colloidal dispersions, *J. Chem. Phys.*, v. 114, p. 10514, 2001.
- [6] BRADY, J.F., The rheological behavior of concentrated colloidal dispersions, *J. Chem. Phys.*, v.99, p. 567, 1993.
- [7] KRISHNAMURTHY, L., WAGNER, N.J., Shear thickening in polymer stabilized colloidal dispersions, *J. Rheol.*, v. 49, p. 1347, 2005.
- [8] MARANZANO, B.J., NORMAN, J.W., The effects of particles size on reversible shear thickening of concentrated colloidal dispersions: Hard-sphere colloidal dispersions, *J. Rheol.*, v. 45, p. 1205, 2001.
- [9] GALINDO-ROSALES, F.J., RUBIO-HERNÁNDEZ, F.J., SEVILLA, A., An apparent viscosity function for shear thickening fluids, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, v. 166, p. 321, 2011.
- [10] SUN, L. -L., XIONG, D. -S., XU, C.-Y., Application of shear thickening fluid in ultra high molecular weight polyethylene fabric, *J. Appl. Polym. Sci.*, v. 129, p. 1922, 2013.
- [11] MAJUMDAR, A., BUTOLA, B. S., SRIVASTAVA, A., Development of soft composite materials with improved impact resistance using Kevlar fabric and nano silica based shear thickening, *Mater. Des.*, v. 54, p. 295, 2014.
- [12] TEBER, A., UNVER, I., KAVAS, H., AKTAS, B., BANSAL, R., Knitted radar absorbing materials (RAM) based on nickel-cobalt magnetic materials, *J. Mag. Mag. Mat.*, v. 406, p. 228, 2016.
- [13] WU, Q.-M., RUAN, J.-M., HUANG, B.-Y., ZHOU, Z.C., ZOU J.-P., Rheological behavior of fumed silica suspension in polyethylene glycol, *J. Cent. South Univ. Technol.*, v. 13, p. 1, 2006.
- [14] GÜRCEN, S., LI, W., KUSHAN, M.C., The rheology of shear thickening fluids with various ceramic particle additives, *Mater. Des.*, v. 104, p. 312, 2016.
- [15] DECKER, M.J., HALBACH, C.J., NAM, C.H., WAGNER, N.J., WETZEL, E.D., Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-treated fabrics, *Comp. Sci. Tech.*, v. 67, p. 565, 2007.

4. Conclusão

Os compósitos com 7% de hematita apresentaram o melhor comportamento balístico, enquanto os compósitos com 3% em peso e 11% de hematita apresentaram as melhores propriedades de absorção de micro-ondas em termos de perda dielétrica e magnética, respectivamente. Um meio-termo razoável entre resistência balística e absorção de micro-ondas parece ser o uso de tecido de aramida impregnado com 7% em peso de hematita.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro.

- [16] EGRES, R.G., DECKER, M.J., HALBACH, C.J., LEE, Y.S., KIRKWOOD, J.E., KIRKWOOD, K.M., WAGNER, N.J. Stab resistance of shear thickening fluid(STF) Kevlar composites for body armor applications, Proceeding of the 24th Army Science Conference, Orlando, FL, 2004.
- [17] DING, J., TRACEY, P.J., LI, W., PENG, G., WHITTEN, P.G. Review on shear thickening fluids and applications, *Textiles and Light Industrial Science and Technology*, v. 2, p. 161, 2013.
- [18] DE BIASI, R.S., FIGUEIREDO, A.B.S., FERNANDES, A.A.R., LARICA, C., Synthesis of cobalto ferrite nanoparticles using combustion waves, *Solid State Commun.*, v. 144, p. 15, 2007.
- [19] CAO, Z., QIN, M., JIA, B., GU, Y., CHEN, P., VOLINSKY, A.A., QU, X., One pot solution combustion synthesis of highly mesoporous hematite for photocatalysis, *Ceram. Int.*, v. 41, p. 2806, 2015.
- [20] LEE, Y.S., WETZEL, E.D., WAGNER, N.J., The ballistic impact characteristics of Kevlar woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid, *J. Mater. Sci.*, v. 38, p. 2825, 2003.
- [21] PASQUALI, M., TERRA, C., GAUDENZI, P., Analytical modelling of high-velocity impacts on thin woven fabric composite targets, *Compos. Struct.*, v. 131, p. 951, 2015.
- [22] NAIK, N.K., SHIRIRAO, P., Composite structures under ballistic impact, *Compos. Struct.*, vol. 66, p. 579, 2004.
- [23] NAIK, N.K., SHIRIRAO, P., REDDY, B.C.K., Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation, *Int. J. Impact Eng.*, vol. 32, p. 1521, 2006.
- [24] ALMUSALLAM, T.H., SIDDIQUI, N.A., IQBAL, R.A., ABBAS, H., Response of hybrid-fiber reinforced concrete slabs to hard projectile impact, *Int. J. Impact Eng.*, v. 58, p. 17, 2013.
- [25] WANG, J., CALLINAN, R., Residual strengths of composite structures subjected to ballistic impact, *Compos. Struct.*, v. 117, p. 423, 2014.
- [26] JORDAN, J.B., NAITO, C.J., Calculating fragment impact velocity from penetration data, *Int. J. Impact Eng.*, v. 37, p. 530, 2010.
- [27] BACKMAN, M.E., GOLDSMITH, W., The mechanics of penetration of projectiles into targets, *Int. J. Eng. Sci.*, v. 16, p. 1, 1978.
- [28] CARLUCCI, D.E.; JACOBSON, S.S. Ballistics: theory and design of guns and ammunition. Boca Raton [Florida]: CRC, 2008. 496 p. ISBN 1420066180.
- [29] ANDERSON JR., C.E., Analytical models for penetration mechanics: A Review, *Int. J. Impact Eng.*, v. 108, p. 3, 2017.
- [30] VILLANUEVA, G.R.; CANTWELL, W.J. The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures, *Comp. Sci. Tec.*, v. 64, p. 35-54, 2004.
- [31] HUO J., WANG L., YU H., Polymeric nanocomposites for electromagnetic wave absorption, *J. Mater. Sci.*, v. 44, p. 3917, 2009.