

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

DANÚBIA BORDIM DE CARVALHO

**RESPOSTA AO IMPACTO BALÍSTICO DE TECIDO DE ARAMIDA
IMPREGNADO COM FLUIDO NÃO-NEWTONIANO PRODUZIDO
POR NANOPARTÍCULAS DE Fe_2O_3**

**Rio de Janeiro
2018**

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

DANÚBIA BORDIM DE CARVALHO

**RESPOSTA AO IMPACTO BALÍSTICO DE TECIDO DE ARAMIDA
IMPREGNADO COM FLUIDO NÃO-NEWTONIANO PRODUZIDO
POR NANOPARTÍCULAS DE Fe₂O₃**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Ciência dos Materiais.

Orientadores: Prof. André Ben-Hur da Silva Figueiredo – D.C
Prof. Ronaldo Sérgio De Biasi – Phd.

Rio de Janeiro
2018

c2018

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmar ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

623.51 Carvalho, Danúbia Bordim de

C331r

Resposta ao impacto balístico de tecido de aramida impregnado com fluido não-newtoniano produzido por nanopartículas de Fe₂O₃ / Danúbia Bordim de Carvalho; orientada por André Ben-Hur da Silva Figueiredo; Ronaldo Sérgio De Biasi – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2018.

60p.: il.

Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018.

1. Curso de Engenharia de Materiais – teses e dissertações. 2. Nanopartículas. 3. Ensaio balísticos. I. Figueiredo, André Ben-Hur da Silva. II. Biasi, Ronaldo Sérgio De. III. Instituto Militar de Engenharia.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

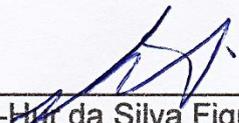
DANÚBIA BORDIM DE CARVALHO

**RESPOSTA AO IMPACTO BALÍSTICO DE TECIDO DE ARAMIDA
IMPREGNADO COM FLUIDO NÃO-NEWTONIANO PRODUZIDO POR
NANOPARTÍCULAS DE Fe₂O₃**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências dos Materiais

Orientadores: Prof. André Ben-Hur da Silva Figueiredo – D.C.
Prof. Ronaldo Sérgio De Biasi – Phd

Aprovada em 3 de Maio de 2018 pela seguinte Banca Examinadora:



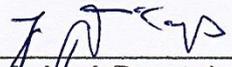
Prof. André Ben-Hur da Silva Figueiredo – D.C. – Presidente



Prof. Ronaldo Sérgio De Biasi – Phd (IME)



Prof. Alaelson Vieira Gomes – D.C (IME)



Prof. José Brant de Campos – D.C (UERJ)

Rio de Janeiro
2018

“Cada pessoa deve trabalhar para o seu aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo, participar da responsabilidade coletiva por toda a humanidade.”

Marie Curie

AGRADECIMENTOS

Um agradecimento muito especial aos meus pais, por todo apoio em cada decisão tomada, pelas palavras de incentivo que fizeram toda diferença nessa longa caminhada.

Ao meu irmão por todas as conversas que sempre me fizeram refletir, e que sempre soube me acalmar nos momentos em que achei que não iria conseguir.

À minha cunhada, por toda ajuda e ensinamento durante esses dois longos anos.

Um grande agradecimento ao Doutor André Ben-Hur da Silva Figueiredo, meu orientador, por toda a ajuda e apoio, pelas horas perdidas em sugestões, discussões e correções do trabalho, pela boa disposição e entusiasmo demonstrado ao longo de toda a duração do mestrado.

Ao meu co-orientador, professor Ronaldo Sergio de Biasi pelas observações pertinentes ao longo do trabalho.

Ao professor José Brant pelo auxílio com as análises de difração de raios-X.

Aos amigos dessa jornada de dois anos que me ajudaram e ensinaram muito, além de me acolherem nos momentos mais difíceis, Ana Paula, Letícia, Natália, Danilo, Tati, Ângelo, pois sem eles atingir meu objetivo seria muito mais difícil.

Aos amigos do Laboratório de Cerâmicos, Camila e Jheison, muito obrigada por toda ajuda.

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro durante todo o período de realização deste mestrado.

Agradeço à coordenação, aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais do IME e a todos os demais que, direta ou indiretamente, ajudaram a realizar esse trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	08
LISTA DE TAB	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	11
LISTA DE SIGLAS	12
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Escolha do Tema	15
1.2 Objetivo	16
1.3 Originalidade da Pesquisa.....	16
1.4 Organização do Trabalho	16
2 BLINDAGEM BALÍSTICA.....	17
2.1 Projétil	17
2.2 Provede	19
2.2.1 Provede de ar Comprimido	19
2.2.2 Armas de Fogo	19
2.3 Tecido Balístico	20
2.3.1 Aramidas	20
2.4 Fluido Espessante por cisalhamento (FEC)	21
2.5 Hematita e método de combustão.....	22
2.6 Polietilenoglicol (PEG).....	25
2.7 Aramidas impregnadas com FEC.....	25
2.8 Impacto Balístico	25
2.8.1 Profundidade de Penetração (DOP).....	26
2.8.2 Energia de Absorção (E_{ABS})	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 Síntese por combustão em solução	28
3.2 Caracterização por difração de raios X (DRX)	29
3.3 Produção de fluido não Newtoniano.....	30

3.4	Determinação da profundidade de penetração	31
3.5	Determinação de energia de absorção	33
3.6	Caracterização por Microscópio Eletrônico de Varredura	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	Difratograma e tamanho médio de partícula	36
4.2	Ensaio Balístico	38
4.3	Microscópio Eletrônico de Varredura (SEM)	46
5	CONCLUSÕES	53
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	54
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	55

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG 2.1	Partes integrantes da munição.....	18
FIG 2.2	Tipos de projéteis de chumbo	19
FIG 2.3	Tecido de aramida.....	21
FIG 2.4	Esquema das partículas formando hydroclusters sob cisalhamento	22
FIG 2.5	Célula cristalina da hematita	23
FIG 2.6	Esquema de formação de superestruturas de nanocristais de hematita.....	24
FIG 2.7	Representações do impacto balístico em um sistema de blindagem multicamada: (a) antes; (b) no decorrer e (c) após o impacto balístico.....	26
FIG 3.1	(a) Solução em aquecimento. (b) Solução em combustão.....	28
FIG 3.2	Pó formado a partir da maceração da cinza da combustão.....	29
FIG 3.3	Fluido não newtoniano impregnado na aramida.....	31
FIG 3.4	Provete de ar comprimido.....	32
FIG 3.5	Esquema do ensaio balístico, (a) conjunto de ar comprimido, (b) provete, (c) supressor de ruídos, (d) cronógrafo balístico, (e) alvo de MDF, (f) espaço de 5 m entre o supressor e o alvo, (g) distância de 10 cm entre o supressor e o cronógrafo.....	33
FIG 3.6	Esquema da penetração do projétil no alvo, (a) distância de penetração a partir da superfície do alvo até a ponta do projétil, (b) projétil, (c) MDF.....	33
FIG 3.7	Amostras antes do ensaio balístico.....	34
FIG 3.8	Microscópio eletrônico de varredura QUANTA FEG 250.....	35
FIG 4.1	Difratograma da nanocarga magnética.....	36
FIG 4.2	Imagem do MEV da hematita sintetizada.....	37

FIG 4.3	Imagem do MEV da hematita sintetizada.....	38
FIG 4.4	Amostra de 7% após o impacto balístico.....	39
FIG 4.5	Amostra de 11% após o impacto balístico.....	40
FIG 4.6	Amostra de 13% após o impacto balístico.....	41
FIG 4.7	Dependência do fator β na concentração de hematita.....	42
FIG 4.8	Dependência do fator β na concentração de hematita.....	43
FIG 4.9	Massa do compósito em concentração de hematita.....	45
FIG 4.10	Fator de mérito na concentração de hematita.....	45
FIG 4.11	Imagem do MEV da amostra A07 mostrando a distribuição de STF em fibra de aramida.....	46
FIG 4.12	Imagem do MEV da amostra A07 mostrando a distribuição de STF em fibra de aramida.....	47
FIG 4.13	Imagem do MEV da amostra A11 mostrando a distribuição de STF em fibra de aramida.....	48
FIG 4.14	Imagem do MEV da amostra A11 mostrando a retirada das fibras de aramida.....	49
FIG 4.15	Imagem do MEV da amostra A13 mostrando a distribuição de STF em fibra de aramida.....	50
FIG 4.16	Imagem do MEV da amostra A13 mostrando a retirada das fibras de aramida.....	51
FIG 4.17	Imagem do MEV da amostra A13 mostrando a impregnação do STF.....	52

LISTA DE TABELAS

TAB 2.1	Níveis de proteção balística.....	17
TAB 3.1	Condições de análise do ensaio de DRX da amostra.....	30
TAB 4.1	Média dos resultados dos testes balísticos das amostras.....	42
TAB 4.2	Média dos resultados da energia de absorção das amostras.....	43
TAB 4.3	Média dos resultados dos testes balísticos das amostras.....	44

LISTA DE ABREVIATURA E SIMBOLOS

$C_2H_5NO_2$	Glicina
DOP	“Depth of Penetration”
DRX	Difração de Raios-X
E_{abs}	Energia de Absorção
$Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$	Nitrato de Ferro
Fe_2O_3	Óxido de Ferro
FEC	Fluido Espessante por Cisalhamento
G/N	Razão glicina/nitrato
$HO-(CH_2CH_2O)_n-H$	Polietilenoglicol
ICSD	“Inorganic Cristal Structure Databese”
LR	Long Rifle
MDF	Medium Density Fiberboard
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MF	Fator de Mérito
PEG	Polietilenoglicol
PP	Profundidade de Penetração
STF	Shear Thickening Fluid
B	Constante do Obstáculo

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	“American Society for Testing and Materials”
CBPF	Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
IME	Instituto Militar de Engenharia
LEB	Laboratório de Ensaio Balísticos
CBC	Companhia Brasileira de Cartuchos

RESUMO

A aplicação de fluido espessante por cisalhamento (FEC) em tecidos de aramida melhora a resposta ao impacto balístico da blindagem, uma vez que a viscosidade do FEC aumenta drasticamente durante o impacto. Para a síntese de nanopartículas de Fe_2O_3 utilizou-se o método de combustão e caracterizou-se por difração de raios X (DRX). Os testes balísticos em tecido impregnado foram o de energia de absorção e profundidade de penetração do projétil em um anteparo de *medium density fiberboard* (MDF). Ambos os testes foram medidos pela velocidade subsônica usando um sistema de ar comprimido. Os resultados mostraram que o melhor desempenho foi obtido para o tecido de aramida impregnado com 7% em massa de hematita. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do tecido impregnado com 7%, 11% e 13% de hematita apresentaram impregnação de fibras, efeito de *pullout* e fratura.

ABSTRACT

The application of shear thickening fluid (STF) on aramid fabrics improves the response to ballistic impact by the soft composite as the viscosity of the former increases drastically during impact. For Fe_2O_3 nanoparticles synthesis were using the combustion method and characterized by X-ray diffraction (XRD). The ballistic tests on impregnated fabric were the depth of penetration of the projectile on a medium density fiberboard (MDF) bulkhead and absorption energy. Both tests has been measured by subsonic speed using a compressed air system. The results showed that best results were achieved for a impregnated fabric with 7% by mass of hematite. Scanning electron microscopy (SEM) images of the impregnated fabric with 7%, 11% and 13% hematite showed fiber impregnation, pullout effect and fracture.

1. INTRODUÇÃO

1.1 ESCOLHA DO TEMA

A luta pela sobrevivência gerou o interesse pelo desenvolvimento de armaduras como forma de vestuário de proteção. As armaduras corporais são caracterizadas como um revestimento defensivo utilizado para proteção de ataques físicos.

Com o avanço da tecnologia durante o século XX, houve a descoberta de materiais têxteis artificiais avançados, como o nylon, fibra de vidro e Kevlar, que permitiram o desenvolvimento de armaduras corporais em níveis de blindagem balística, com um peso consideravelmente reduzido (CAVALLARO, 2011).

As fibras à base de aramida, como Kevlar, Twaron, Technora, SVM, Armos, e Terlon são usadas mais frequentemente em armaduras corporais macias, em função de sua elevada resistência ao impacto e maior estabilidade do material. (HARIS, LEE, TAY, TAN, 2015).

Com o objetivo de aprimorar a maleabilidade e reduzir o peso da blindagem, pesquisadores buscam desenvolver as chamadas armaduras líquidas, alcançando a mesma eficiência que as armaduras contemporâneas. Tais materiais são produzidos a partir da impregnação de fibras poliméricas de alta resistência, com fluidos de espessamento por cisalhamento (FEC), os quais apresentam comportamento de fluido não-newtoniano, onde é observado um aumento na viscosidade como consequência do aumento da taxa de cisalhamento ou estresse aplicado (YILDIZ, 2013; DECKER *et al.*, 2007).

O FEC existe na forma líquida em condições normais de temperatura e pressão. Quando o tecido impregnado começa a ser impactado, o fluido de espessamento aumenta a força de *pullout* das fibras, aumentando a absorção de energia pelo tecido (SUN, XIONG, XU 2013).

Polímeros líquidos, como o polietilenoglicol (PEG), têm a habilidade de adsorver sobre a superfície de um material de enchimento. O PEG é um composto orgânico polar, sintético, não tóxico e solúvel em água, com peso molecular variando de 200 a 20.000 g/mol (YILDIZ, 2013).

Park *et. al* (2014), estudou as propriedades da absorção de energia de impacto do tecido de kevlar impregnado com FEC (partículas de sílica dispersas em polietilenoglicol). Os resultados indicaram que a impregnação do fluido na aramida resulta em um aumento da absorção de energia.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a resposta ao impacto balístico de tecido de aramida impregnado com fluido não-newtoniano. Os fluidos não newtonianos usados foram compostos de nanopartículas de Fe_2O_3 produzidas por combustão, em matriz de polietilenoglicol com peso molecular de 200 g/mol. Os ensaios balísticos realizados foram: a determinação da energia de absorção e a profundidade de penetração.

1.3 ORIGINALIDADE DA PESQUISA

O aspecto original da presente pesquisa está em estudar a produção de fluido não newtoniano com nanopartícula de Fe_2O_3 , verificando sua eficiência em blindagem balística.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No item 2 desta dissertação é apresentada uma revisão bibliográfica de blindagem balística. O item 3 apresenta os tipos de ensaio balístico aplicados nesse trabalho. Os materiais e métodos utilizados na presente pesquisa são descritos no item 4. Já no item 5, foram descritas as conclusões. No item 6 sugestões para trabalhos futuros e no item 7 estão listadas as referências bibliográficas.

2. BLINDAGEM BALÍSTICA

Para a norma brasileira ABNT NBR 15000 (2005), a blindagem balística é determinada como “anteparo de proteção com o objetivo de promover resistência à penetração de projéteis oriundos de armas de fogo”.

Na TAB 2.1 são fornecidos os diversos níveis de proteção de um sistema de blindagem em relação ao impacto, de acordo com o calibre, a massa e a velocidade do projétil.

TAB 2.1 Níveis de proteção balística.

Nível	Calibre	Massa (g)	Velocidade (m/s)
I	.22 LRHV	2,6 ± 0,1	320 ± 10
	.38 Special RN	10,2 ± 0,1	254 ± 15
	9 mm FMJ	8,0 ± 0,1	332 ± 12
IIA	.357 Magnum JSP	10,2 ± 0,1	381 ± 12
	9 mm FMJ	8,0 ± 0,1	358 ± 15
II	.357 Magnum JSP	10,2 ± 0,1	425 ± 15
	9 mm FMJ	8,0 ± 0,1	426 ± 15
IIIA	.44 Magnum SWC GC	15,6 ± 0,1	426 ± 15
III	7,62 x 51 FMJ	9,7 ± 0,1	838 ± 15
IV	.30 – 06 AP	10,8 ± 0,1	868 ± 15

(Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15000, 2005).

Segundo a norma NIJ-0101.06 (2008), é definida uma deformação máxima de 44 milímetros no painel balístico acessório e a medida dessa deformação deve ser feita em um material de referência fixado na parte posterior da blindagem, com o objetivo de representar a consistência do corpo humano.

2.1 PROJÉTIL

Um artefato balístico é formado por quatro elementos principais: o projétil (A), o invólucro (B), a escorva (C) e a carga (D), como pode ser observado na FIG 2.1.

As características fundamentais de um projétil são: alta densidade, de modo que adquira energia com facilidade; elevado ponto de fusão e deformabilidade, para que alcance os resultados pretendidos (SANTOS, 2016).

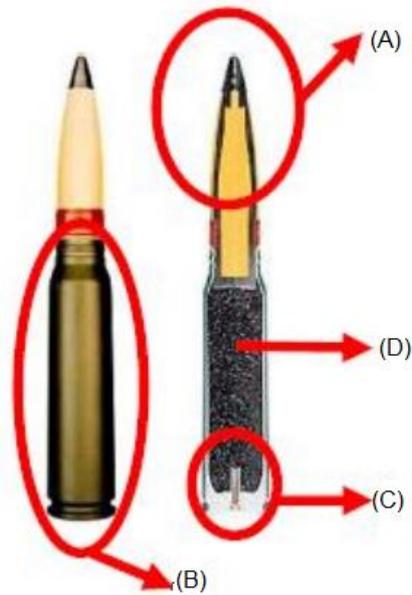


FIG 2.1 Partes integrantes da munição(SANTOS,2016)

Os projéteis são comumente fabricados em chumbo ou com algum material associado a este, formando uma liga, como o antimônio e estanho, com o objetivo de obter uma maior dureza, de acordo com o destino pretendido. Por possuir baixo ponto de fusão, o chumbo pode ser facilmente derretido e moldado em formas específicas (P NETO, 2012).

A FIG 2.2, mostra a produção atual da CBC (Companhia Brasileira de Cartuchos) dos projéteis de chumbo mais comuns, utilizados em revólveres.

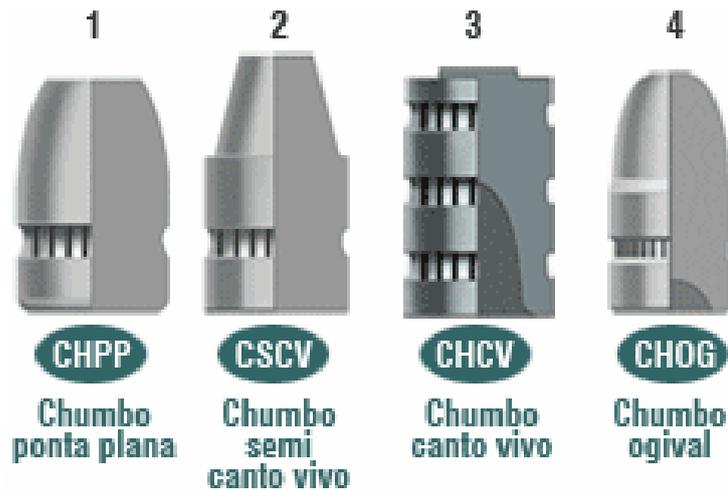


FIG 2.2 Tipos de projéteis de chumbo (P NETO, 2012)

2.2 PROVETE

2.2.1 PROVETE DE AR COMPRIMIDO

Um provete de ar comprimido é composto por um tubo oco com uma entrada de ar externo e uma saída para o ar pressurizado, em que o projétil é direcionado através de um único canal, onde os fluxos de ar se combinam impulsionando a munição pelo corpo da arma.

Em outras palavras, as pistolas de ar consistem basicamente em um tubo que possui uma extremidade ligada a uma fonte de ar comprimido e outra extremidade aberta, em que o ar é ejetado por uma válvula que controla a quantidade de ar que flui (MOCARSKI, 1973).

As armas de ar comprimido, como a .22 LR, utilizada no presente trabalho, não poluem o ar com queima de propelente, e geram um ruído muito menor que os das armas convencionais. Além de serem de mais fácil aquisição, possuem facilidade de obtenção de munição e preço acessível. Com isso, este tipo de dispositivo vem ganhando cada vez mais espaço no mercado (P NETO, 2009).

2.2.2 ARMAS DE FOGO

As armas de fogo, possuem um mecanismo de disparo, barril e gatilho. Um sistema de intertravamento, conectado à estrutura da arma, é fornecido para

ativar e desativar a sua execução. Tal estrutura ainda é composta por um modo de controle/comunicação associado a um módulo acionador, sendo este responsável por detectar a tentativa de operação do gatilho (BALLARD *et al*, 2015).

Diferentemente das armas de ar comprimido, com sistemas baseados em princípios físicos, as armas de fogo possuem mecanismo de funcionamento com base em princípios químicos, onde a combustão de um material inflamável leva à propulsão e ejeção do projétil.

2.3 TECIDO BALÍSTICO

2.3.1 ARAMIDAS

O tecido de aramida foi introduzido em 1971 como um material utilizado na fabricação de composto blindado. Após alguns anos, foram largamente utilizados em blindagens balísticas e como reforço para compósitos de elevado desempenho. Também conhecida como Kevlar®, nome designado pela empresa DuPont®, o material é feito de fibra sintética poli(parafenileno tereftalamida). De acordo com os dados da empresa, o tecido de aramida é cinco vezes mais resistente quando comparado com o mesmo peso em aço (CORDEBELLO, 2002).

Atualmente, têm-se estudado a introdução de materiais cerâmicos aplicados em coletes à prova de balas, pois foi verificado que o kevlar apresenta algumas falhas na sua capacidade de blindagem balística quando se trata de projéteis de calibres elevados (JUSTO 2005; YANG 1993). A FIG 2.3 ilustra um tecido de fibra de aramida.



FIG. 2.3 Tecido de aramida (LEE, *et al.*, 2003)

2.4 FLUIDO ESPESSANTE POR CISALHAMENTO (FEC)

O fluido de espessamento por cisalhamento apresenta comportamento de fluido não newtoniano. Frequentemente, é denominado como um fluido dilatante e caracterizado pelo aumento da viscosidade, com o aumento da tensão de cisalhamento.

O FEC tem sido usado, juntamente com tecidos balísticos de alta resistência, para melhorar as propriedades de blindagem balística, resistência à punhaladas e perfurações, com pouco ou nenhum aumento na espessura ou na rigidez dos tecidos (HARIS, LEE, TAY, TAN, 2015).

Simulações e experimentações mostraram que o fluido espessante por cisalhamento resulta na formação de hidroaglomerados, que são agregados de partículas que se formam como resultado da ação das forças de lubrificação hidrodinâmica entre elas durante o cisalhamento, como mostrado na FIG 2.4 (DING *et al.*, 2013)

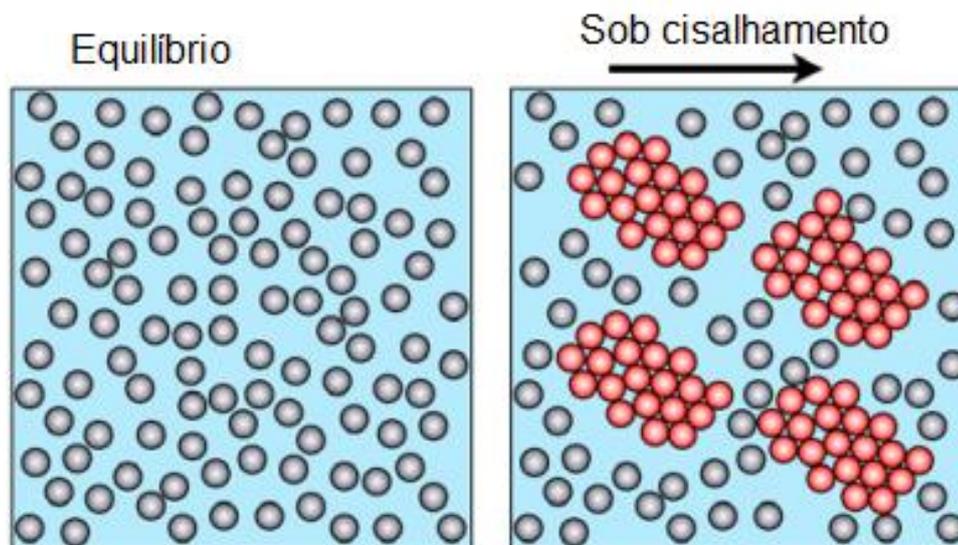


FIG 2.4 Esquema das partículas formando hidroaglomerados sob cisalhamento (DING *et al.*, 2013).

Embora o mecanismo de hidroaglomerados tenha se tornado aceito para o espessamento por cisalhamento e forneça ferramentas para prever seu início, ele não explica as ordens de magnitude de aumento na viscosidade durante o cisalhamento (BROWN *et al.*, 2010).

O desenvolvimento de novos fluidos de espessamento por cisalhamento coloidal (STFs) baseados em nanopartículas tem atraído cada vez mais atenção para seus desafios científicos. Pesquisas recentes indicaram que o espessamento de cisalhamento pode ser controlado alterando as propriedades de superfície das partículas, por exemplo: hidrofílico ou hidrofóbica, rugosidade e forma. As descobertas abrem possibilidades para novos designs de suspensões que podem combinar o cisalhamento de espessamento com o controle das propriedades da superfície da partícula, produzindo assim, STFs específicos para diferentes aplicações, e consequentemente ampliando a aplicabilidade dos STFs (DING *et al.*, 2013).

2.5 HEMATITA E O MÉTODO DE COMBUSTÃO

A hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), produzida no presente trabalho, com densidade igual a $5,24 \text{ g/cm}^3$, é considerada o óxido de ferro mais estável em condições

ambientais, sendo amplamente utilizado em catalisadores, pigmentos, sensores e para síntese de magnetita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) (JIANG JIA, *et al.*, 2005).

As nanopartículas de hematita tem atraído atenção, devido às suas propriedades multifuncionais: propriedades semicondutoras, de transição, antiferromagnética ou ferromagnética fraca (LUNA *et al.*, 2014).

As nanoestruturas de hematita são constantemente formadas de subunidades menores (cristais uniformes de alguns nanômetros em tamanho) por ligação orientada, de modo que eles se parecem com um único cristal (FANG *et al.*, 2009).

A $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ possui uma estrutura romboédrica, na qual os íons O^{2-} constituem um retículo hexagonal compacto, e 2/3 dos interstícios octaédricos são ocupados pelos íons Fe^{3+} (OLIVEIRA, 2003). A estrutura romboédrica é a mais comum para nanopartículas de hematita, com dimensões na ordem de dezenas de nanômetros (LUNA *et al.*, 2014).

Em outras palavras, os íons de oxigênio ocupam os sítios hexagonais, enquanto que os íons de ferro estão situados nos sítios octaédricos (CHIRITA, 2009). A FIG 2.5, demonstra esquematicamente a estrutura da hematita.

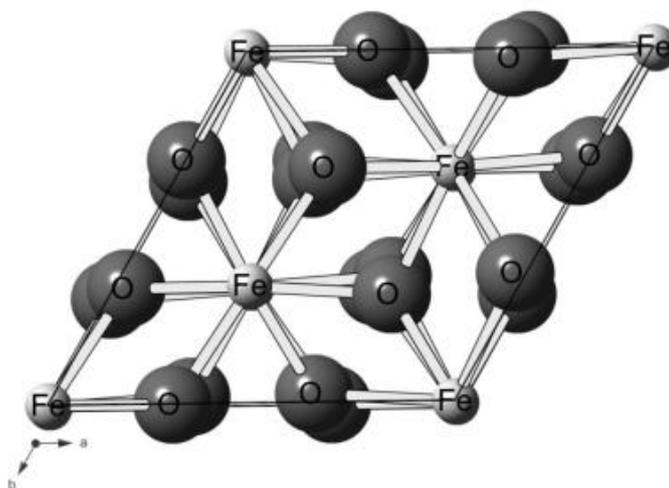


FIG. 2.5 Célula cristalina da hematita (OLIVEIRA *et al.*, 2013).

De acordo com Luna *et al.* (2014), as nanopartículas de hematita sofrem um mecanismo de formação de superestruturas tridimensionais quando estão em suspensão líquida. Este fato ocorre devido aos inúmeros processos de conformação, ilustrados na FIG 2.6.

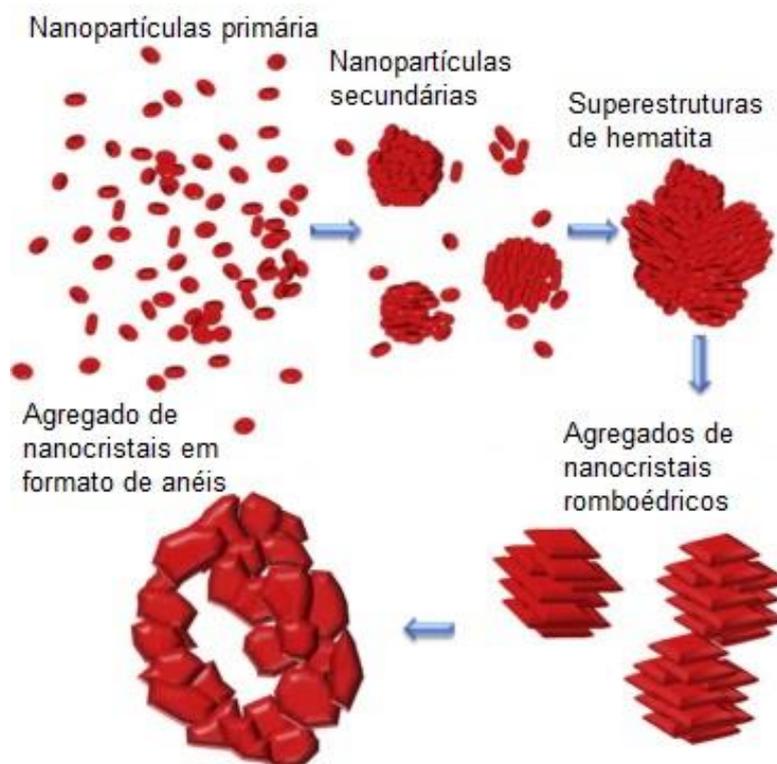


FIG. 2.6 Esquema de formação de superestruturas de nanocristais de hematita (Adaptado de Luna *et al.*, 2014).

As nanopartículas de hematita são produzidas pelo processo de nucleação e crescimento, no qual os nanocristais se formam em partículas secundárias agregando-se de forma espontânea em superestruturas complexas.

Quando as nanopartículas se agregam, ocorre uma redução da energia superficial, devido à inexistência das interfaces entre os nanocristais. Desse modo, o estado de agregação transforma-se no mais estável quando as nanopartículas encontram-se em solução (LUNA *et al.*, 2014).

Diversos métodos são encontrados na literatura para a obtenção de nanopartículas. O método de combustão, escolhido para aplicação no presente trabalho, foi inserido na literatura, para acelerar o processo de síntese de materiais mais complexos. Este processo é conhecido por ser de baixo custo e formar pós nanoestruturados de alta pureza (YAN *et. al.*, 1999).

Este método tem por finalidade misturar agentes precursores em água deionizada, usando como fonte de combustível um agente redutor, como glicina ($C_2H_5NO_2$) (MELO, 2014).

2.6 POLIETILENOGLICOL (PEG)

O polietilenoglicol, de fórmula molecular $\text{HO}-(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n-\text{H}$, possui disponibilidade em diversos pesos moleculares, os quais podem variar de 200g/mol a dezenas de milhares g/mol. Sendo higroscópico e solúvel em água na temperatura ambiente, se apresenta em estado líquido, é incolor e viscoso, quando seu peso molecular é menor que 600g/mol e se apresenta em estado sólido e coloração branca, quando com pesos moleculares maiores ou iguais a 800g/mol (CHEN *et. al.*, 2005).

2.7 ARAMIDAS IMPREGNADAS COM FEC

Segundo LEE *et al.*(2003), a resistência à penetração balística do tecido de aramida é reforçada pela impregnação do tecido com um fluido de espessamento de cisalhamento coloidal (STF).

O tecido de Kevlar impregnado com FEC fornece uma proteção quase instantânea, sendo mais fino e flexível. O aperfeiçoamento do desempenho ocasionado pelo STF pode ser atribuído ao aumento no esforço para conduzir o deslocamento ao seu estado rígido (PARK *et al.*,2012).

Estudos mostraram que a impregnação do STF fornece significativa melhoria na absorção de energia com material mais leve e menor custo de fabricação (HARRIS *et al.*,2015)

2.8 IMPACTO BALÍSTICO

De um modo geral, o impacto balístico consiste no choque à elevada velocidade de um projétil em oposição a um alvo, ocasionando altas taxas de deformação em ambos. No decorrer do impacto, ocorre a transferência de energia cinética do projétil para o alvo, potencializando a absorção dessa energia (PASQUALI *et al.* 2015; MOURA *et al.* 2011).

A eficácia da blindagem em tecidos depende de inúmeros fatores, como: as propriedades dos materiais que compõem os tecidos, a geometria do projétil, a fricção entre os fios do tecido e entre tecido-projétil. O atrito entre os fios e o

tecido-projétil, possui um papel relevante no desempenho balístico do tecido (TAN; TAY; TEO, 2005).

Na FIG 2.7 podem ser observados os estágios do impacto balístico em um sistema de blindagem multicamada.

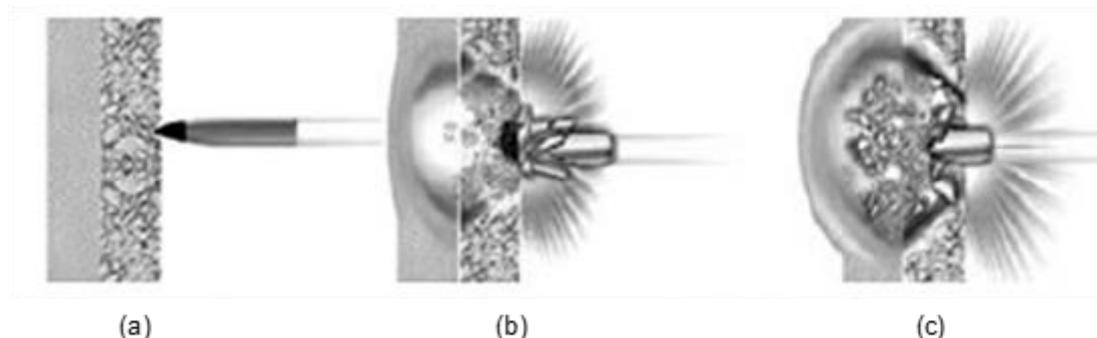


FIG. 2.7 Representações do impacto balístico em um sistema de blindagem multicamada: (a) antes; (b) no decorrer e (c) após o impacto balístico (DA SILVA, *et al.*, 2014).

2.8.1 PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO (DOP)

A medida da profundidade de penetração (DOP) define a eficácia de um projétil, dependendo da sua natureza e da velocidade do choque. Esta técnica permite a avaliação do desempenho balístico, independente da especificação da blindagem (AZEVEDO e ARAGÃO, 2010; MOYNIHAN *et al.*, 2000).

O ensaio de profundidade de penetração ocorre pela fixação da blindagem sobre um material de apoio dúctil, o qual será posteriormente impactado por um projétil. Assim, a profundidade de alcance do projétil pode ser medida (MIL-STD-376, 1993; ROSENBERG, 1988, HAZELL, 2010).

Portanto, há duas ocorrências a serem exploradas: a colisão do projétil no objeto de apoio e a colisão do projétil na blindagem fixada no objeto de apoio. No presente trabalho, somente a primeira ocorrência foi avaliada, sendo o MDF usado como o material de apoio.

2.8.2 ENERGIA DE ABSORÇÃO (E_{ABS})

De acordo com Lee *et al.* (2001), os fios dentro de uma armadura projetada para blindagem balística são menos propensos a deslizar um sobre o outro e sobre o projétil quando o atrito entre os fios e entre tecido-projétil é aumentado.

Dessa forma, o projétil é forçado a fraturar os fios, ao invés de afastá-los, para atravessar o tecido, ocasionando uma maior absorção de energia.

O cálculo da energia de absorção teve como objetivo verificar o compósito que apresentou a maior absorção de energia cinética, através da determinação da velocidade do projétil em cada disparo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 SÍNTESE POR COMBUSTÃO EM SOLUÇÃO

No presente trabalho, a hematita foi produzida pelo método de reação por combustão, utilizando a glicina como combustível, em uma razão molar glicina/nitrato (G/N) de 0,5.

Os reagentes utilizados foram: $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ com 98% de pureza e a glicina, $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$ com 98,5% de pureza, ambos da marca Sigma Aldrich.

O nitrato e a glicina foram pesados, misturados e diluídos em água deionizada em um béquer de 100ml. Utilizou-se 10 ml de água deionizada que tem como finalidade promover a diluição dos reagentes para homogeneizar a mistura.

A mistura foi colocada em uma placa de aquecimento da marca Ika Ret CT S32, onde a água foi evaporada a 100°C e após a secagem, ocorreu uma ignição instantânea, exotérmica e autossustentável, causando uma queima no material por completo. A FIG. 3.1 a seguir ilustra a solução sendo aquecida (a) e a combustão da solução (b).



FIG 3.1 (a) Solução em aquecimento. (b) Solução em combustão.

A combustão do material formou uma espuma que se tornou pó após a maceração manual, com auxílio de gral e pistilo, como pode ser observado na

FIG 3.2. O pó obtido na síntese foi caracterizado por DRX e utilizado na preparação do compósito, que posteriormente foi aplicado na fibra de aramida, usada nos ensaios balísticos.



FIG 3.2 Pó formado a partir da maceração da cinza da combustão.

3.2 CARACTERIZAÇÃO POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

A difração de raios X proporcionou a identificação da fase cristalina existente no material e permitiu a determinação do tamanho médio dos cristalitos das nanopartículas, comprovando a presença da fase hematita.

O difratograma foi obtido a partir do detector linear de 128 canais (XCELERATOR) X'PERT PRO da PANalytical do Laboratório de Cristalografia e Difração de Raios X do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). A TAB 3.1, descreve as condições que foram utilizadas na análise para a geração do difratograma da amostra sintetizada.

O refinamento do resultado foi feito pelo método Rietveld no software TOPAS-Academic versão 4.1. Esse método utiliza parâmetros essenciais no refinamento, em que as informações são retiradas de fichas cristalográficas, obtidas no banco de dados ICSD (Inorganic Crystal Structure Database).

TAB. 3.1 Condições de análise do ensaio de DRX da amostra

Parâmetros	Valores
Radiação	Cu ($\lambda = 1,5406\text{Å}$)
Voltagem do tubo	40 Kv
Corrente do tubo	40 Ma
Soller slit	0,04 rad
Mask	10mm
Monocromador	Grafite
Divergence slit	1/2°
Anti-scatter slit	1°
Step size	0,05°
Time per step	150 s
Scan range	10° - 90°

3.3 PRODUÇÃO DO FLUIDO NÃO NEWTONIANO

Os materiais utilizados para a preparação do fluido foram: PEG 200, com 98% de pureza, da marca Aldrich, álcool etílico com 98% de pureza da marca Sigma Aldrich e tecido de aramida com espessura de 0,28mm e massa específica de 210 g/m².

Foram produzidas oito misturas de Fe₂O₃ e PEG 200 com densidade de 1,24g/cm³, nas proporções em massa de Fe₂O₃ de 3%, 5%, 7%, 9%, 11%, 13%, 15% e 17%. As misturas foram submetidas a ultrassom de 50 W e 40 kHz por 30 minutos, a fim de reduzir os tamanhos de partículas. Cada mistura foi diluída em 20 mL de etanol, para uma melhor homogeneização. Das soluções resultantes foram retirados 15ml, com o auxílio de uma pipeta, e depositados sobre quadrados de 7 cm² de aramida, dentro de em placas de petri, procedendo assim com a impregnação do tecido com o fluido fabricado. Por fim, as amostras foram secas à temperatura ambiente por 24 h.

A FIG 3.3, mostra o fluido impregnado no tecido de aramida.



FIG 3.3 Fluido não newtoniano impregnado na aramida.

3.4 DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO

A profundidade de penetração (PP) para projéteis ogivais é definida por:

$$PP = \frac{P}{a^2} \times N_1 \times \log(1 + b \times v^2) \quad (4.1)$$

Em que, P é o peso do projétil, a é o calibre, N_1 é o parâmetro característico do alvo, b é a constante do alvo e v a velocidade de impacto.

Considerando que seja definido como parâmetro β a parcela:

$$\frac{P}{a^2} \times N_1 = \beta \quad (4.2)$$

então,

$$PP = \beta \times \log(1 + b \times v^2) \quad (4.3)$$

Logo,

$$\beta = \frac{PP}{\log(1 + b \times v^2)} \quad (4.4)$$

De acordo com a TAB de constante do obstáculo, foi adotado que $b = 2 \times 10^{-5}$, pois o material do alvo utilizado foi o MDF.

Nos ensaios balísticos foi utilizado um provete de ar comprimido calibre 22 da marca *Gunpower* modelo SSS, com cilindro de 200 bar e capacidade de 0,5 L, de acordo com a FIG 3.4. Como munição, foi utilizado projétil de chumbo ogival com massa média de 3,2g.



FIG 3.4 Provete de ar comprimido.

O provete de ar comprimido foi colocado a 5m de distância do alvo, como mostra o esquema da FIG 3.5. Como anteparo para fixação do alvo foram utilizadas placas de MDF, por se tratar um material homogêneo, plano e denso, não apresentando nós como nas placas de madeira maciça.

Utilizou-se um supressor de ruídos, com o objetivo de ampliar a estabilidade do projétil na saída do provete. A velocidade inicial do projétil foi calculada com o auxílio de um cronógrafo posicionado a 10 cm da extremidade do supressor (FIGUEIREDO *et al.*, 2017).

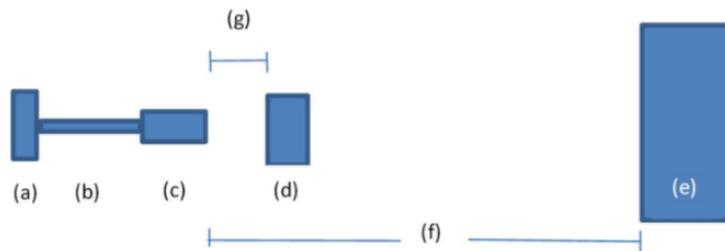


FIG 3.5 Esquema do ensaio balístico, (a) conjunto de ar comprimido, (b) provete, (c) supressor de ruídos, (d) cronógrafo balístico, (e) alvo de MDF, (f) espaço de 5 m entre o supressor e o alvo, (g) distância de 10 cm entre o supressor e o cronógrafo (FIGUEIREDO *et al.*, 2017).

A FIG 3.6 demonstra a profundidade de penetração após os disparos.

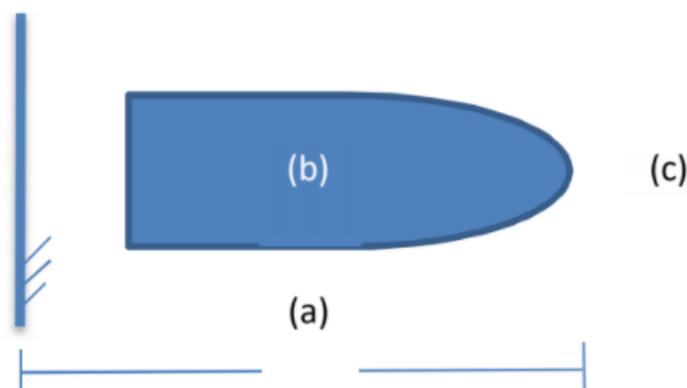


FIG 3.6 Esquema da penetração do projétil no alvo, (a) distância de penetração a partir da superfície do alvo até a ponta do projétil, (b) projétil, (c) MDF (FIGUEIREDO *et al.*, 2017).

3.5 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA DE ABSORÇÃO

Para determinar a velocidade de boca foi usado o cronógrafo balístico da marca Air Chrony modelo MK3, no Laboratório de Ensaio Balísticos (LEB) do IME, o qual foi posicionado a 10cm do supressor de ruídos. O cronógrafo do modelo ProChrono fornecido pela Competition Electronic, por sua vez, foi usado na medição de velocidade residual, sendo posicionado após o anteparo

contendo as amostras. As medições por ele realizadas se deram por princípio fotoelétrico e a velocidade do projétil foi lida diretamente do painel digital, após cada disparo. Para a determinação da energia de absorção, os compósitos foram dispostos conforme demonstrado na FIG 3.7.



FIG 3.7 Amostras antes do ensaio balístico.

3.6 CARACTERIZAÇÃO POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

O Microscópio eletrônico é um instrumento de trabalho utilizado por pesquisadores em inúmeras áreas, que engloba diversos métodos, possibilitando caracterizar o material morfológicamente, a composição química e a determinação do arranjo atômico de metais, polímeros, cerâmicos, e inclusive de espécies biológicas.

A Microscopia Eletrônica de Varredura é utilizada para caracterizar materiais metálicos e semicondutores, com a finalidade de observar a morfologia, disposição das fases, inclusões e trincas, discordâncias e maclas, espessura e profundidade de camadas superficiais (AMANO, 2004).

Para a análise das amostras do presente trabalho, foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura da marca FEI, modelo QUANTA FEG 250,

do Instituto Militar de Engenharia. A FIG 3.8, ilustra o microscópio eletrônico utilizado nas análises.



FIG 3.8 Microscópio eletrônico de varredura QUANTA FEG 250.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 DIFRATOGRAMA E IMAGEM DA AMOSTRA DE HEMATITA

O difratograma demonstrado a seguir foi refinado pelo software TOPAS-Academic versão 4.1, em que foi utilizado o método de Rietveld, de modo que compare um ajuste matemático, aplicando dados teóricos e dados experimentais. Os dados experimentais estão representados pela linha em azul, e os de ajuste pela linha em vermelho, e a diferença entre ambas é exibida pela linha cinza. O modelo teórico se baseia em fichas cristalográficas, utilizando fichas do banco de dados ICSD. Portanto, foi possível determinar a fase presente e o tamanho do cristalito.

A amostra de Fe_2O_3 apresentou 100% de fase hematita, com o difratograma ajustado de forma satisfatória com GOF (*Goodness Of Fit*) de 1,29 e com tamanho de cristalito de 20nm, como mostrado na FIG 4.1.

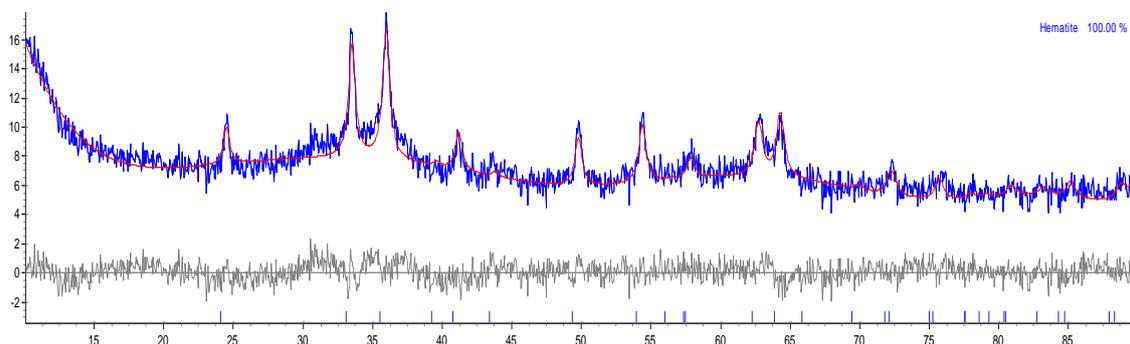


FIG 4.1 Difratograma da nanocarga magnética.

A partir da análise do difratograma, observa-se a presença dos picos referentes à fase cristalina da hematita em $24,14^\circ$, $33,16^\circ$, $35,62^\circ$, $40,86^\circ$, $49,46^\circ$, $54,07^\circ$, $57,45^\circ$, $62,43^\circ$ e $64,00^\circ$, comprovando a síntese de hematita (SILVA,2015).

A FIG 4.2 mostra a morfologia da amostra de hematita, em que pode ser observado aglomerados de partículas em um arcabouço poroso. A FIG 4.3, evidencia a presença de porosidade interaglomerado, o que pode estar relacionado à liberação de gases durante a síntese de combustão.

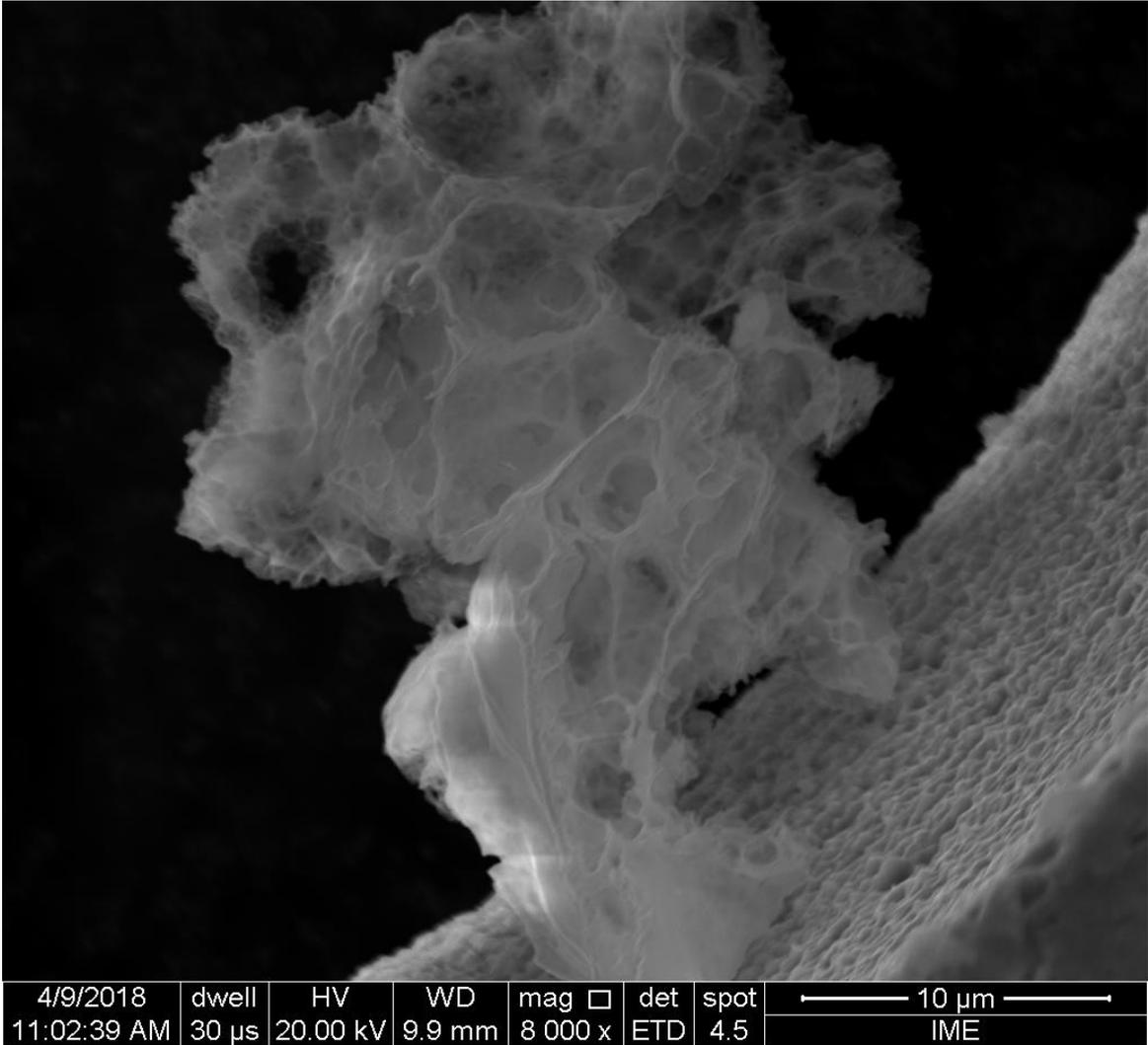


FIG 4.2 Imagem do MEV da hematita sintetizada

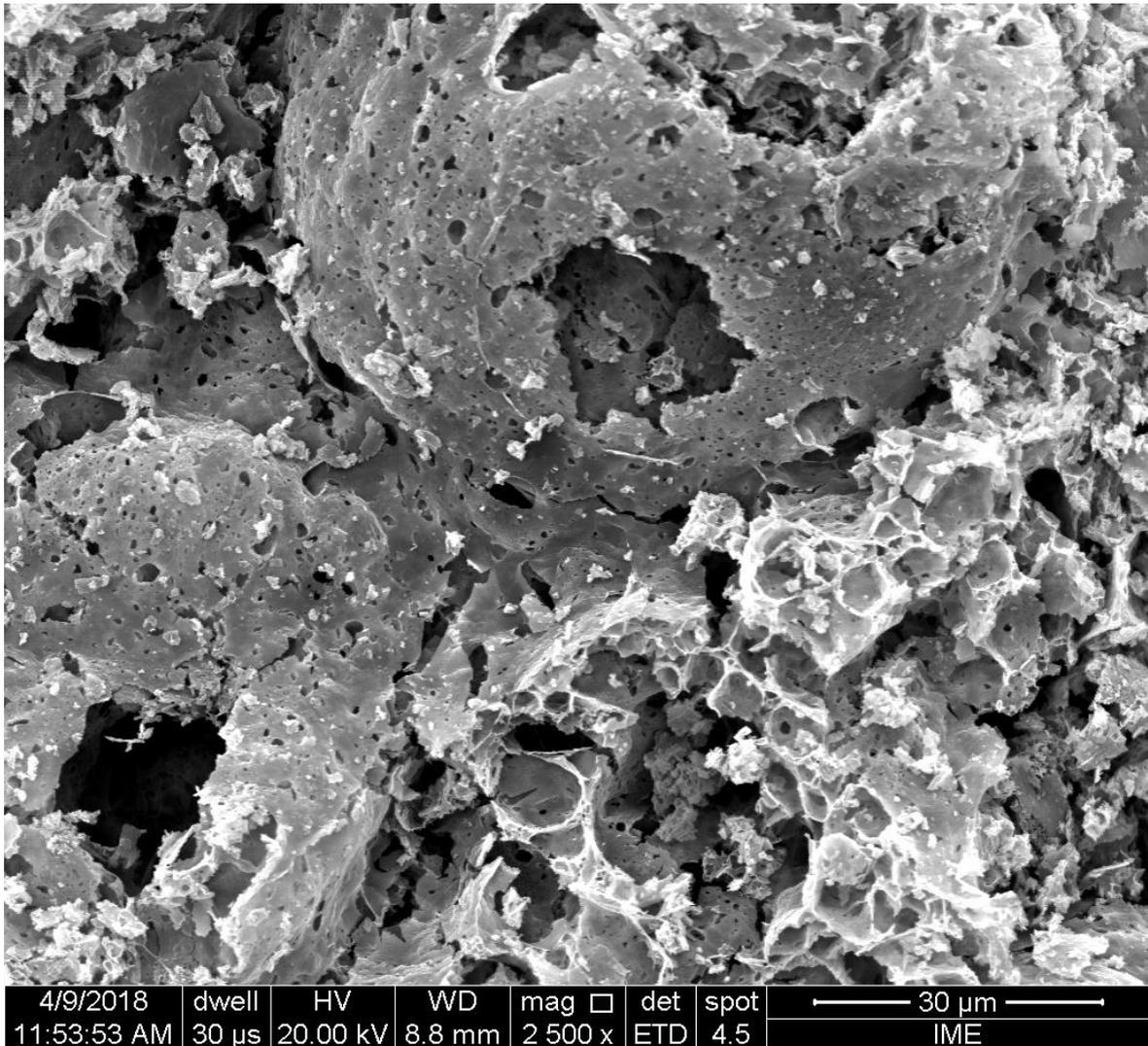


FIG 4.3 Imagem do MEV da hematita sintetizada

4.2 ENSAIOS BALÍSTICOS

Todos os disparos atravessaram a amostra. Foi realizado um disparo em cada réplica e foram utilizadas cinco réplicas para cada composição. Os resultados são mostrados na FIG 4.4 para uma amostra de 7%, FIG. 4.5 para 11% e FIG 4.6 para 13%. Na FIG. 4.4 é possível observar os fios primários da trama e os fios secundários devido à tensão estendida em toda a amostra, sugerindo uma moderada força de *pullout*.



FIG 4.4 Amostra de 7% após o impacto balístico

A amostra 11% é exibida na FIG 4.5. É possível verificar a ação dos fios primários da trama, com fratura dúctil e pequena região de ação dos fios secundários. Isso sugere a força máxima de *pullout* nos fios devido à ação do STF. O mesmo acontece para a amostra de 13%, ilustrada na FIG 4.6.



FIG 4.5 Amostra de 11% após o impacto balístico.



FIG 4.6 Amostra de 13% após o impacto balístico

A TAB 4.1 mostra a massa do projétil (M_p), velocidade média de impacto (v), profundidade de penetração (DOP) e β , o fator para cada composição. O WS é o alvo puro, sem aramida, A00 é a aramida não impregnada e A03 é a aramida impregnada com FEC na concentração em massa de 3% de Fe_2O_3 , e assim sucessivamente.

TAB 4.1 Média dos resultados dos testes balísticos das amostras.

COMPÓSITO	M_p (g)	V (m/s)	DOP (mm)	β (mm)
WS	3,22 ± 0,04	259,31 ± 1,05	34,05 ± 1,02	85,79 ± 1,72
A00	3,23 ± 0,05	263,51 ± 1,19	29,93 ± 0,88	78,93 ± 1,31
A03	3,24 ± 0,05	261,31 ± 1,76	28,07 ± 1,27	74,47 ± 1,77
A05	3,24 ± 0,04	262,28 ± 1,60	31,05 ± 1,62	81,78 ± 2,50
A07	3,23 ± 0,06	257,57 ± 0,89	26,58 ± 0,92	72,38 ± 1,42
A09	3,23 ± 0,06	260,99 ± 1,13	28,87 ± 0,92	77,20 ± 1,36
A11	3,24 ± 0,07	256,62 ± 1,43	33,22 ± 1,18	90,93 ± 1,88
A13	3,24 ± 0,09	258,32 ± 1,73	28,43 ± 0,53	77,35 ± 0,96
A15	3,24 ± 0,07	256,11 ± 1,68	30,42 ± 0,98	83,40 ± 1,29
A17	3,24 ± 0,06	250,15 ± 1,61	28,77 ± 1,52	80,69 ± 2,36

FIG 4.7 mostra a dependência do fator β na concentração de hematita nos compósitos. A amostra A07 apresentou um menor fator β

Observa-se também que a amostra A11 é pior que a amostra WS. Isto é devido à combinação de dois efeitos durante o impacto: a ação de uma força de arrancamento intensa, quebrando os fios primários da teia por fratura dúctil e lubrificação da superfície do projétil pelo STF.

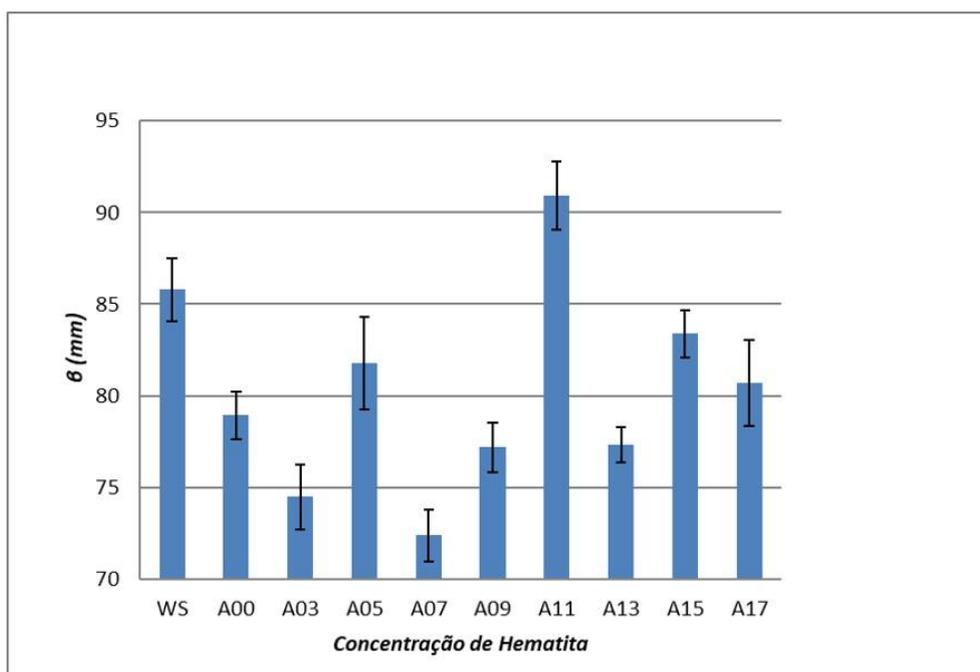


FIG 4.7 Dependência do fator β na concentração de hematita.

A TAB 4.2, mostra a massa do projétil (M_p), a velocidade média de impacto (v), velocidade residual média (v_r) e a energia de absorção (E_{abs}).

TAB 4.2 Média dos resultados da energia de absorção das amostras.

COMPÓSITO	M_p (g)	V (m/s)	V_r (m/s)	E_{abs} (J)
WS	3,24 ± 0,05	260,80 ± 2,40	255,08 ± 2,39	4,79 ± 0,44
A00	3,24 ± 0,09	265,05 ± 1,97	258,37 ± 1,93	5,68 ± 0,72
A03	3,25 ± 0,06	259,89 ± 1,94	234,70 ± 2,07	4,68 ± 0,45
A05	3,23 ± 0,04	260,51 ± 1,87	253,39 ± 1,81	5,93 ± 0,67
A07	3,23 ± 0,05	261,12 ± 1,93	251,87 ± 1,85	7,74 ± 0,62
A09	3,24 ± 0,07	252,83 ± 1,79	244,65 ± 1,73	6,63 ± 0,54
A11	3,23 ± 0,03	252,72 ± 1,52	244,96 ± 1,67	6,19 ± 0,65
A13	3,24 ± 0,07	249,12 ± 1,77	240,69 ± 1,69	6,72 ± 0,81
A15	3,23 ± 0,07	248,32 ± 1,93	240,90 ± 1,89	5,88 ± 0,46
A17	3,23 ± 0,06	244,46 ± 1,92	236,22 ± 1,84	6,44 ± 0,61

A FIG 4.8, mostra a energia de absorção em relação a concentração de hematita nos respectivos compósitos. Pode ser observado que a amostra A07, apresentou a maior energia de absorção.

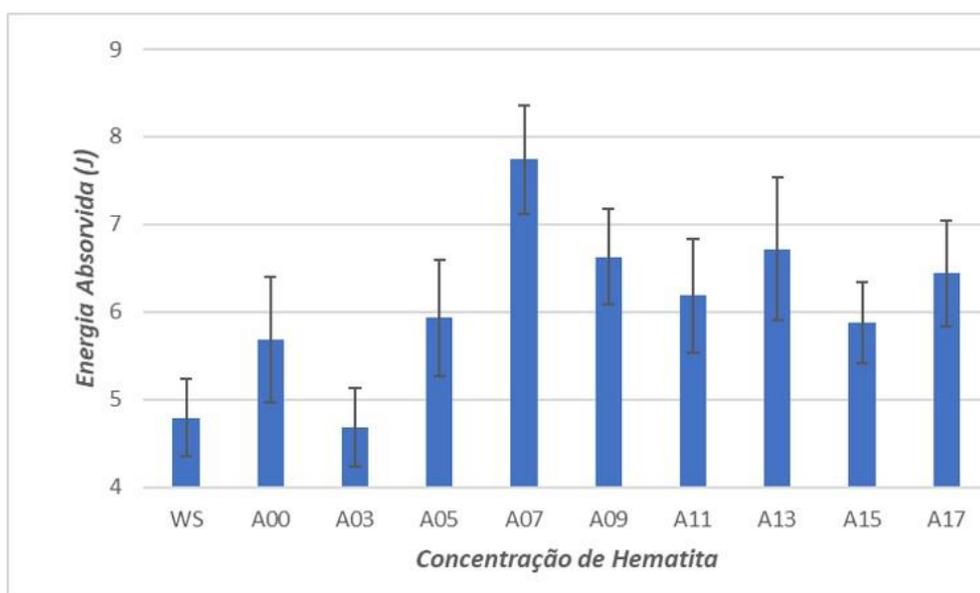


FIG 4.8 Energia absorvida na concentração de hematita.

Foi desenvolvida uma formulação do fator de mérito que consiste na seguinte equação (Eq.4.1):

$$F_M = \frac{E_{abs}}{M_C \cdot \beta} \quad (4.1)$$

Observa-se que a equação acima relaciona a energia de absorção, a massa do compósito e o fator β , com o objetivo de verificar o desempenho balístico do compósito, haja vista que a energia de absorção é dividida pelos parâmetros físicos dos compósitos, ou seja, quanto maior o valor do fator de mérito, melhor o desempenho do compósito balístico.

A TAB 4.3, mostra a massa do compósito (M_c), energia de absorção (E_{abs}), fator β e o fator de mérito (MF).

TAB 4.3 Média dos resultados dos testes balísticos das amostras.

COMPOSITE	M_c (g)	E_{abs} (J)	β (mm)	MF (10^{-2}) (J/g mm)
WS	-	4,79 ± 0,44	85,79 ± 1,72	-
A00NP	1,22 ± 0,24	5,68 ± 0,72	78,93 ± 1,31	5,90 ± 0,51
A03NP	1,27 ± 0,22	4,68 ± 0,45	74,47 ± 1,77	4,95 ± 0,50
A05NP	1,04 ± 0,12	5,93 ± 0,67	81,78 ± 2,50	6,97 ± 0,23
A07NP	1,29 ± 0,17	7,72 ± 0,62	72,38 ± 1,42	8,27 ± 0,59
A09NP	1,35 ± 0,25	6,63 ± 0,54	77,20 ± 1,36	6,36 ± 0,77
A11NP	1,83 ± 0,15	6,19 ± 0,65	90,93 ± 1,88	3,72 ± 0,01
A13NP	1,37 ± 0,30	6,72 ± 0,81	77,35 ± 0,96	6,34 ± 0,70
A15NP	1,25 ± 0,12	5,88 ± 0,46	83,40 ± 1,29	5,64 ± 0,19
A17NP	1,96 ± 0,26	6,44 ± 0,61	80,69 ± 2,36	4,07 ± 0,27

A FIG 4.9 mostra a massa dos compósitos em relação à concentração de hematita antes dos disparos.

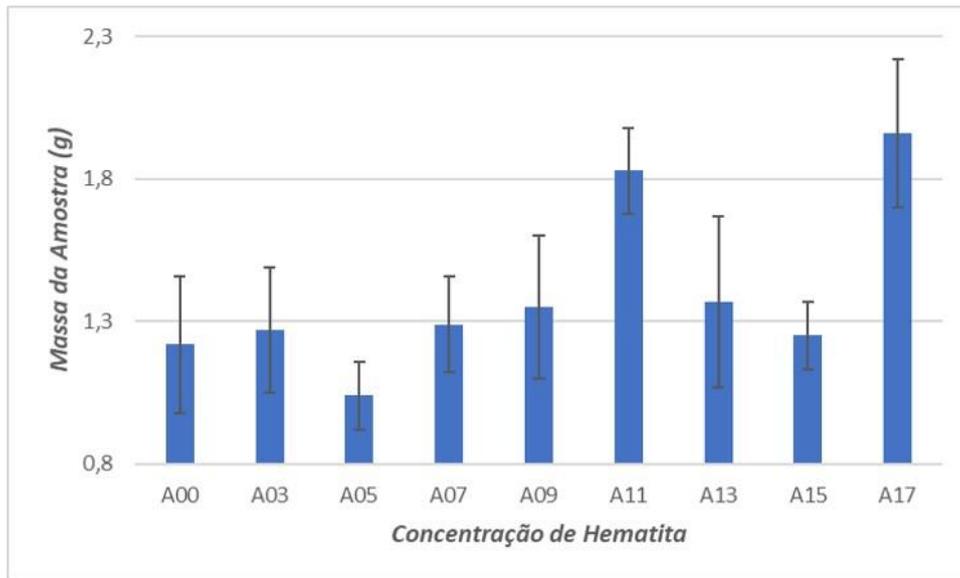


FIG 4.9. Massa do compósito em concentração de hematita.

A FIG 4.10 mostra o fator de mérito (MF) para cada concentração de hematita. Os dados foram obtidos usando a Eq 5.1, com os valores de E_{abs} , β e M_c fornecidos na TAB 5.3. É possível observar, a tendência da concentração A07 ser a mais eficiente, com moderada tenacidade à fratura de STF.

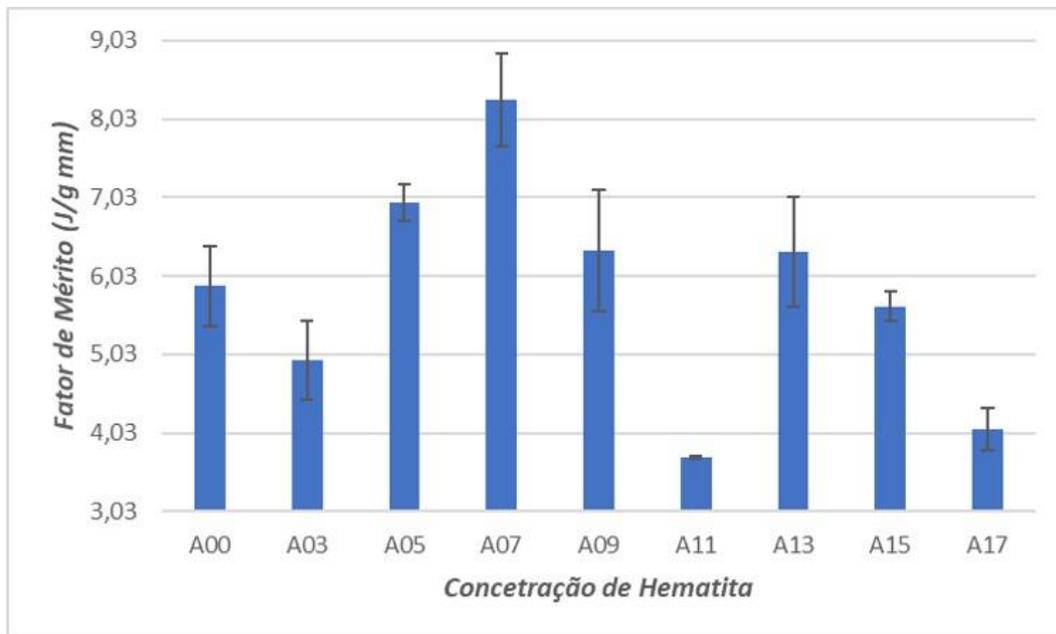


FIG 4.10 Fator de mérito na concentração de hematita.

4.3 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV)

Apresenta-se a seguir as micrografias das amostras A07, A11 e A13 realizadas no microscópio eletrônico de varredura, após o impacto balístico.

A FIG 4.11 apresenta imagens do MEV da amostra A07 numa região mais próxima do ponto do impacto do projétil, mostrando excesso de massa STF sobre as fibras de aramida, e na FIG 4.12, o MEV da mesma amostra numa região mais distante do ponto do impacto, com uma distribuição homogênea do STF nos fios. Pode ser observada também a presença de aglomerados, possivelmente formados após o impacto. Tal observação permite evidenciar a formação de hidroaglomerados.

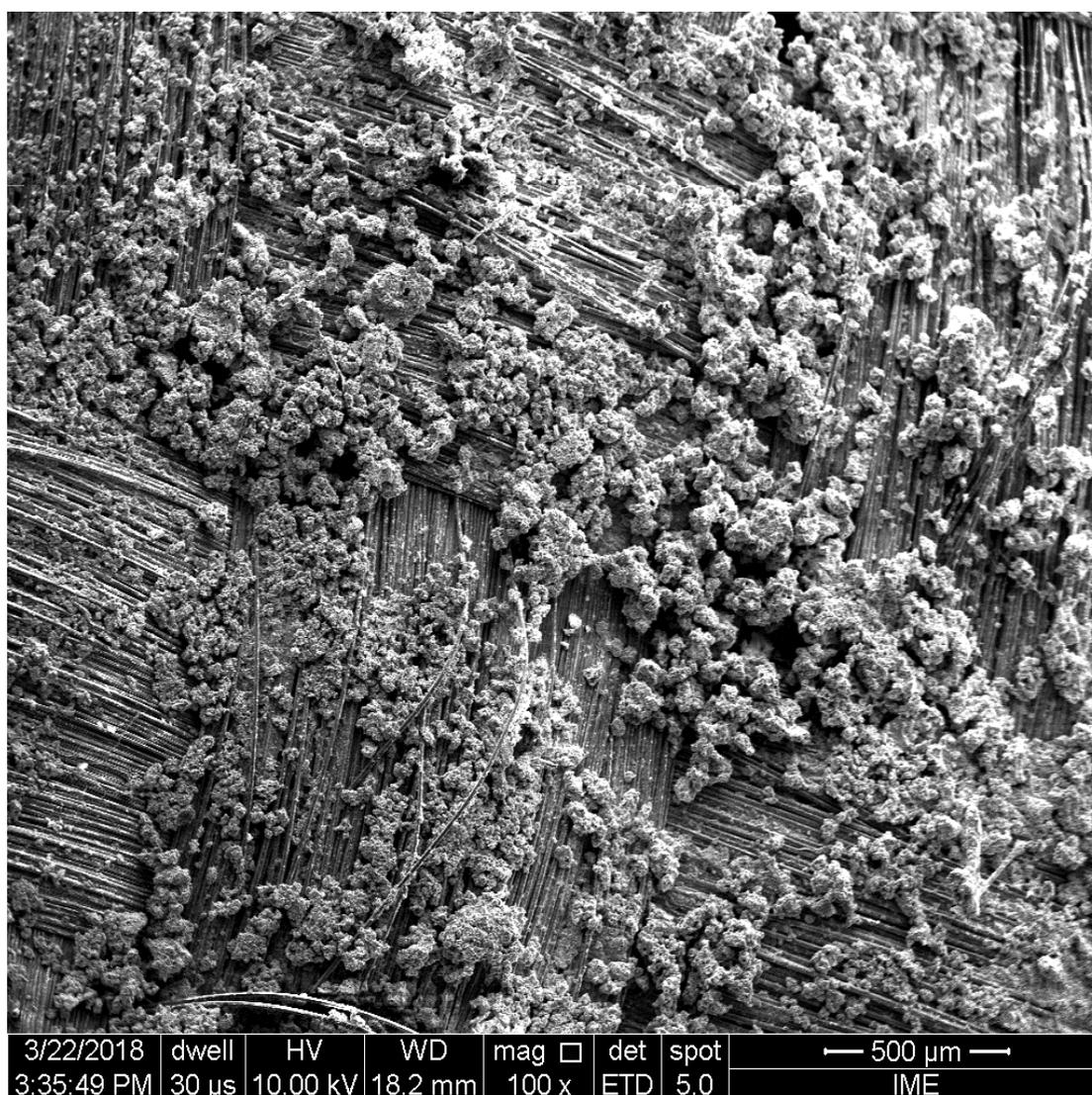


FIG 4.11: Imagem do MEV da amostra A07 mostrando a distribuição de STF em fibra de aramida.



FIG 4.12: Imagem do MEV da amostra A07 mostrando a distribuição de STF em fibra de aramida.

Na FIG 4.13 da amostra A11 pode ser observado o STF homogêneo com distribuição de excesso de massa no tecido; e na FIG 4.14, referente à mesma amostra, o *pullout* das fibras de aramida que contribui para aumentar a tenacidade. É possível observar também na FIG 4.15, da amostra A13, a distribuição do excesso de massa no tecido de aramida e na FIG 4.16, referente à mesma amostra, o *pullout* dos fios da fibra de aramida.

Na FIG 4.17, observa-se de forma mais detalhada a qualidade da distribuição do fluido no processo de impregnação da amostra A13. Na mesma imagem também é possível observar a formação de hidroaglomerados.

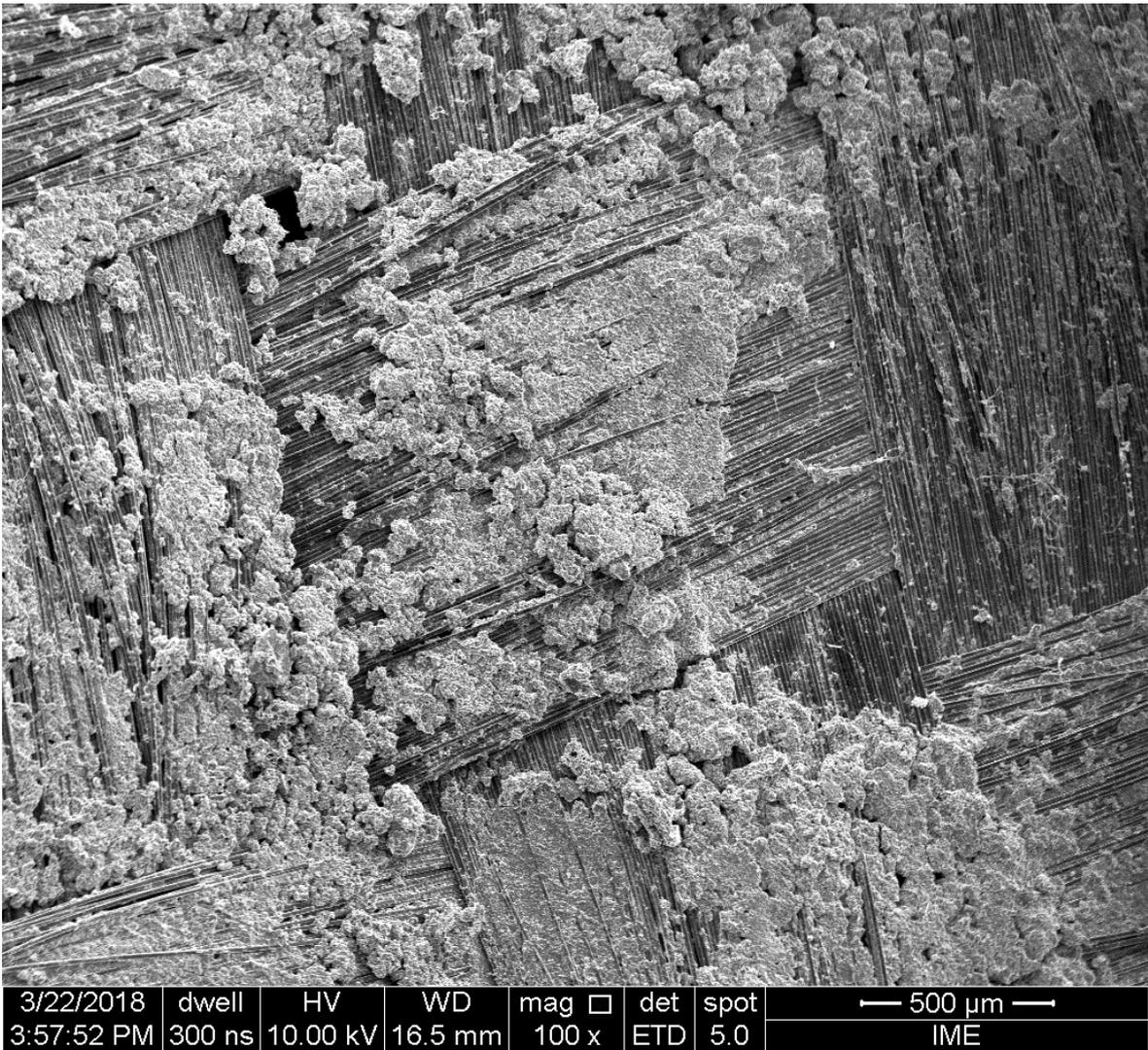


FIG 4.13: Imagem do MEV da amostra A11 mostrando a distribuição de STF em fibra de aramida.

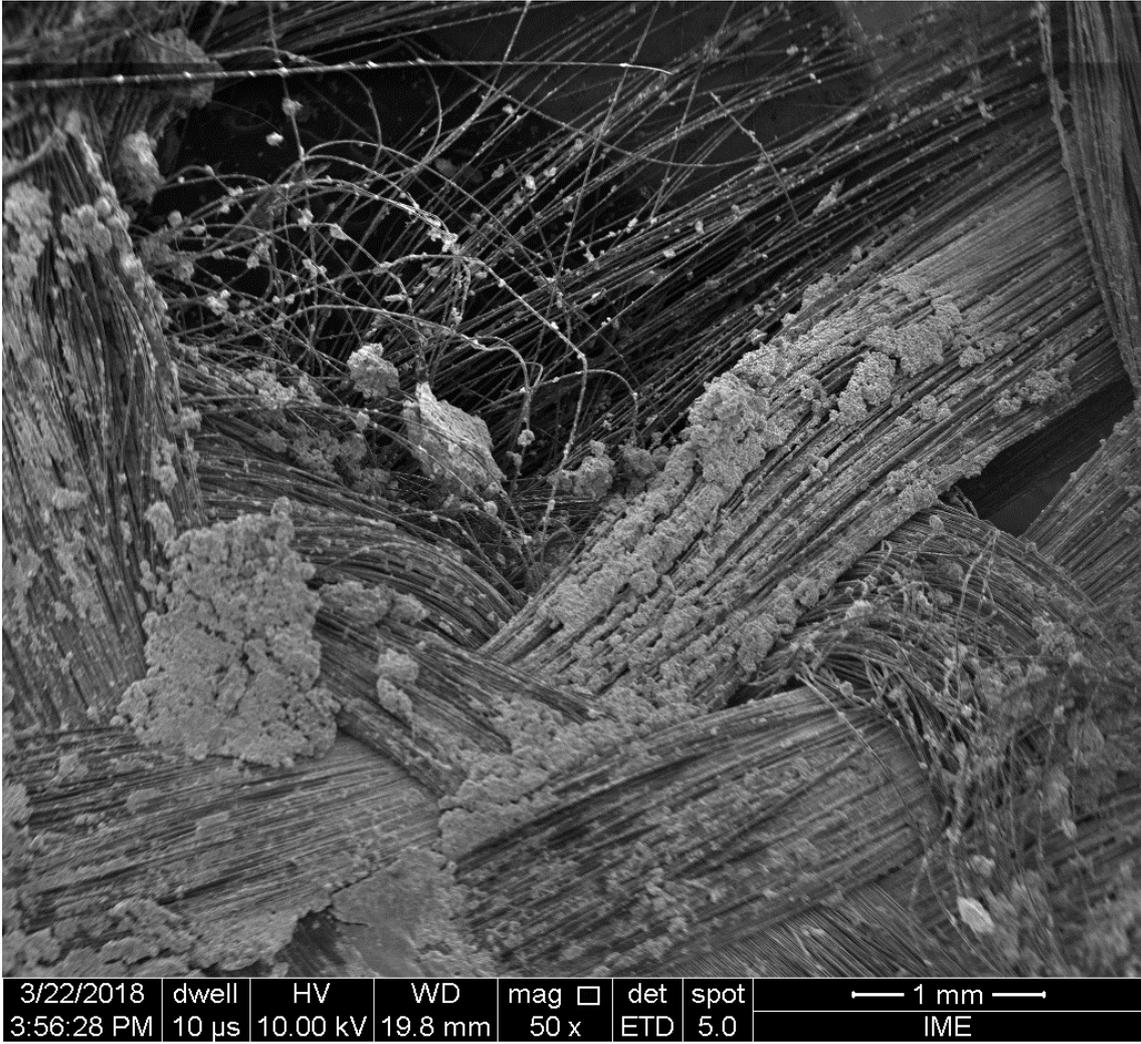


FIG 4.14 Imagem do MEV da amostra A11 mostrando a retirada das fibras de aramida.

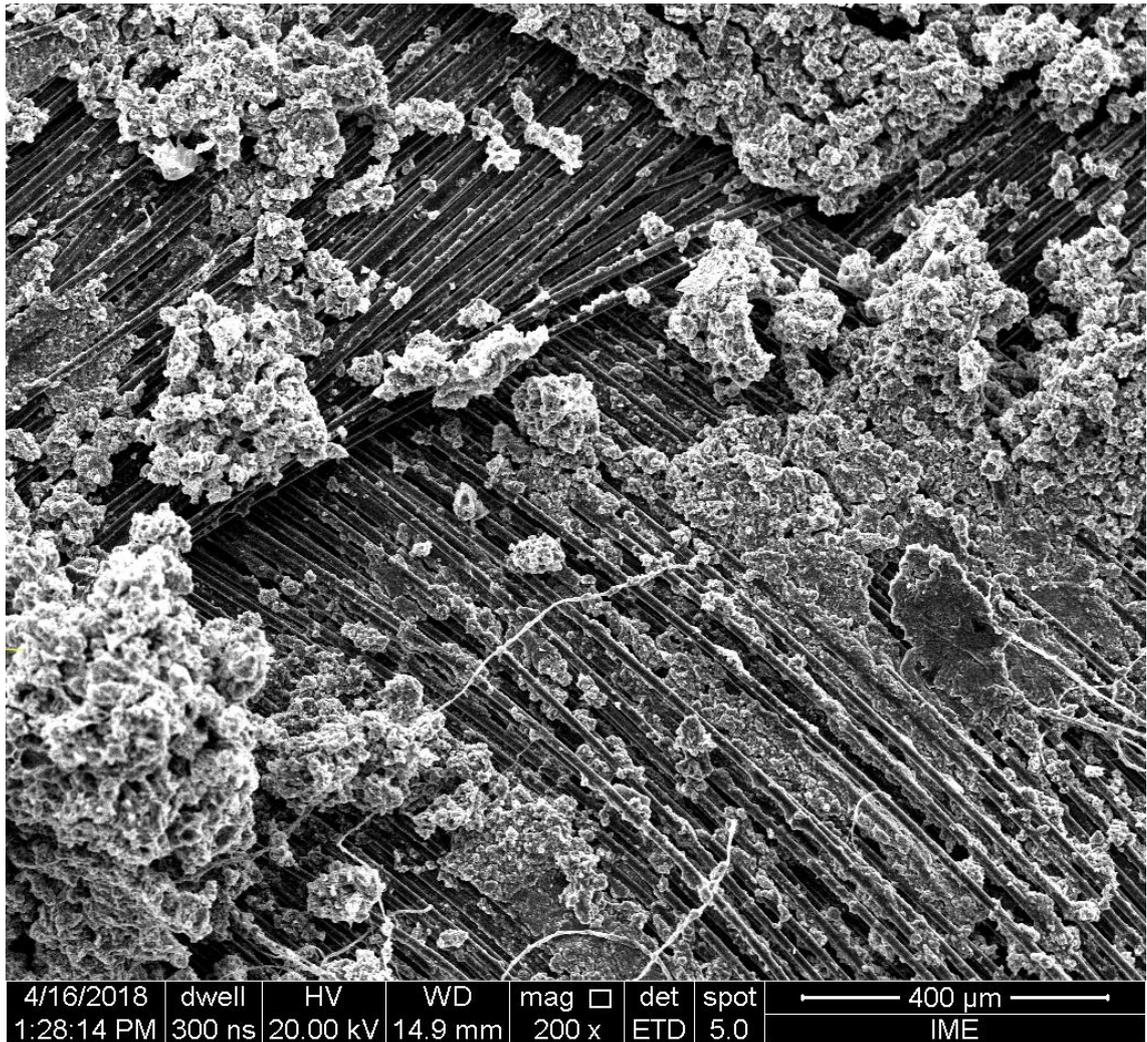


FIG 4.15 Imagem do MEV da amostra A13 mostrando a distribuição de STF em fibra de aramida.

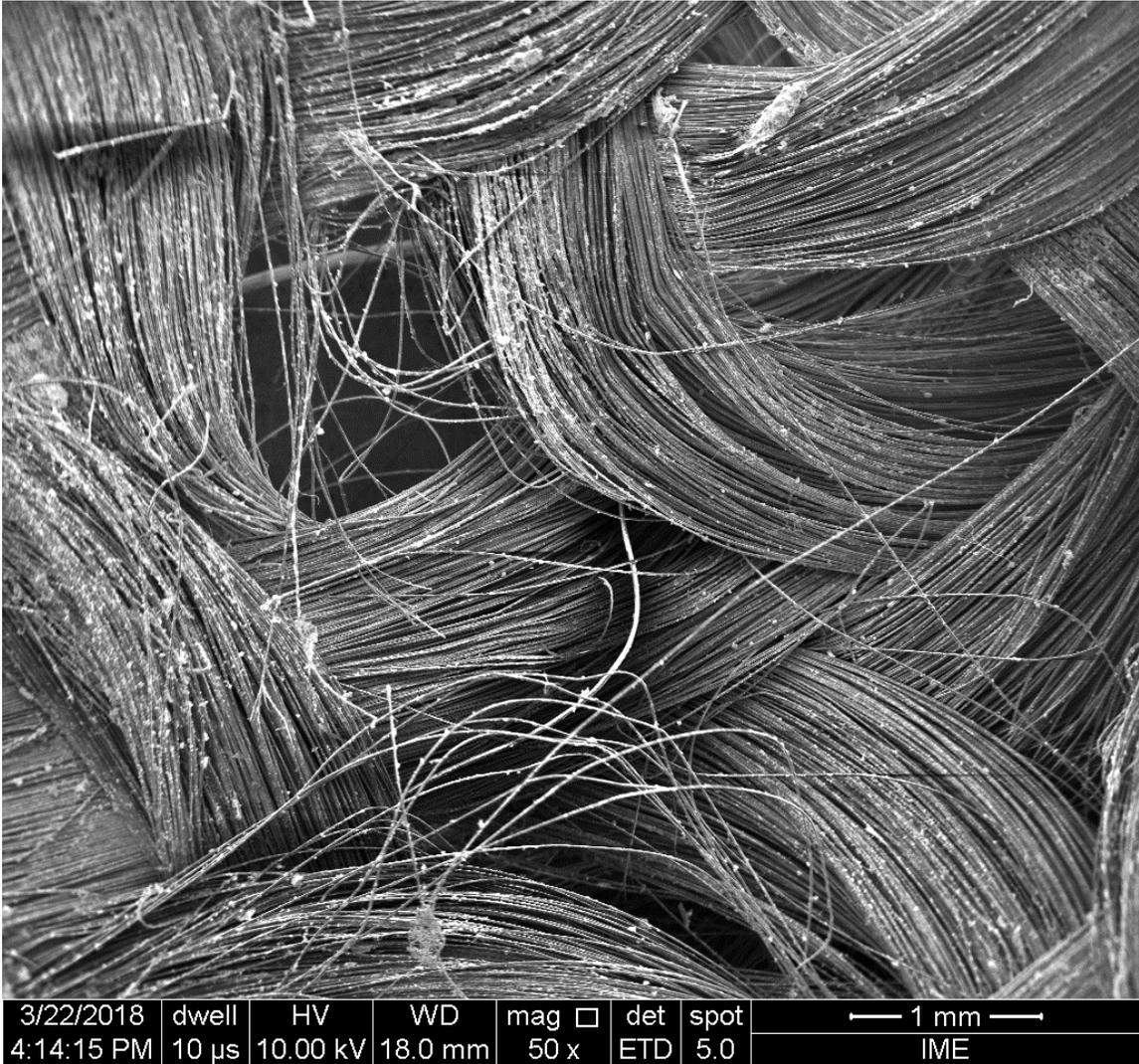


FIG 4.16 Imagem do MEV da amostra A13 mostrando a retirada das fibras de aramida.

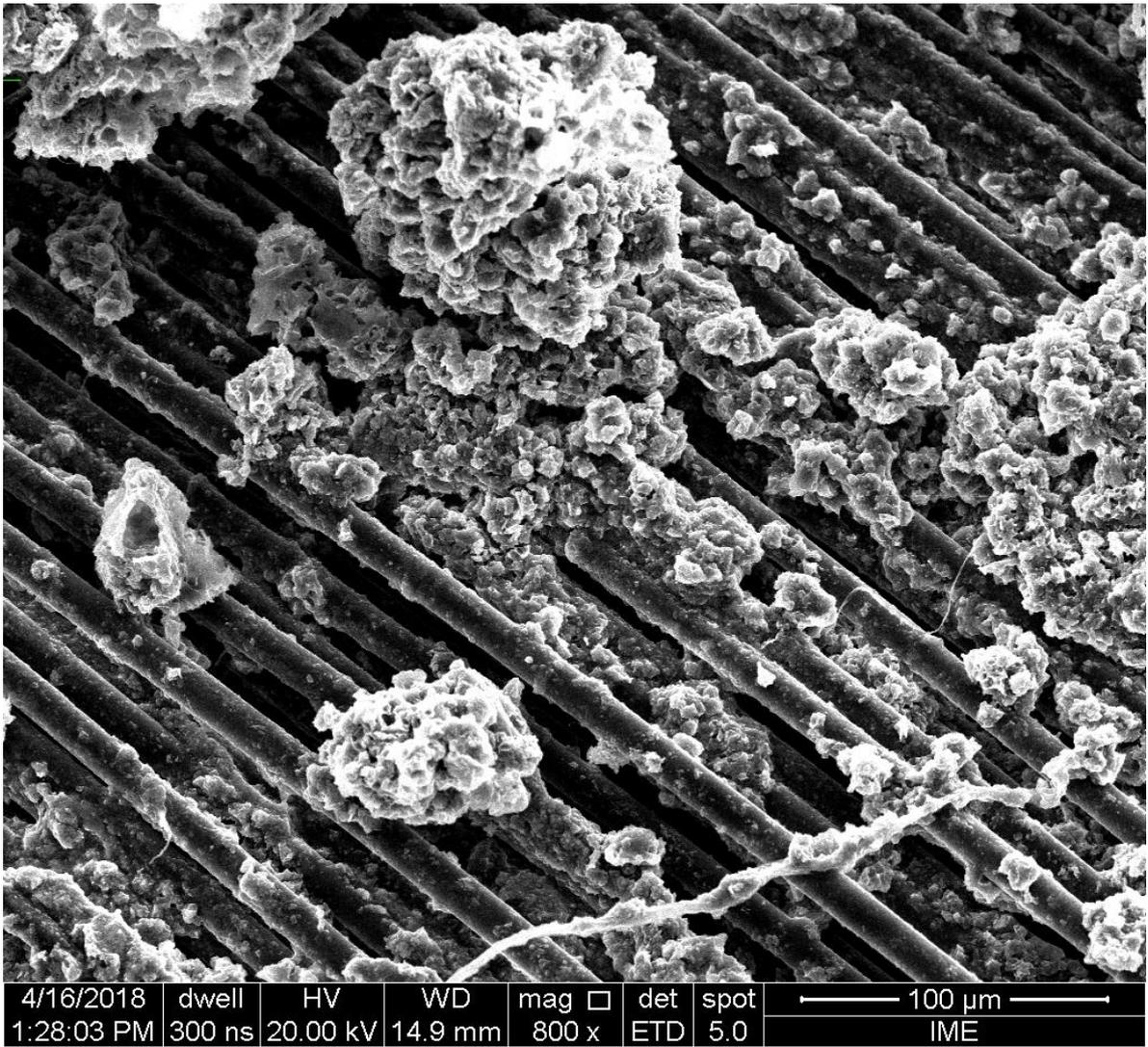


FIG 4.17 Imagem do MEV da amostra A13 mostrando a impregnação do STF

5. CONCLUSÕES

A amostra A07, foi a que apresentou melhor desempenho entre todas as amostras e, portanto, essa composição é considerada a melhor para proteção balística. Este compósito apresenta menor massa, maior energia de absorção e moderada profundidade de penetração. Além disso, a FIG 4.12 mostra uma distribuição mais homogênea do STF impregnado, o que indica que esta homogeneidade favorece o desempenho da blindagem estudada neste trabalho.

6. SUGESTÕES PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS

Como sugestões para as futuras pesquisas, dando continuidade ao trabalho, os seguintes tópicos são considerados relevantes:

- Utilizar mais de uma camada de aramida para os testes balísticos.
- Utilizar diferentes nanocargas e matrizes poliméricas, bem como fibras naturais.
- Utilizar outro tipo de material de apoio, como por exemplo, a plastilina, para a determinação da profundidade de penetração.
- Realizar a caracterização da nanocarga utilizada, no Microscópio Eletrônico de Transmissão, a fim de verificar o tamanho da partícula.
- Realizar a reologia dos fluidos, para validar a produção de fluido não-newtoniano.
- Aprofundar o estudo sobre fluidos não-newtonianos com relação a blindagem balística.
- Verificar o desempenho da blindagem deste estudo para munição de maior poder de penetração, como a munição de 9 mm e do fuzil 7.62 mm.
- Buscar um material amorfo de alta viscosidade para se manter em uso.
- Confinamento entre camadas de aramidas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 15000. **Blindagens para impactos balísticos - classificação e critérios de avaliação**, 2005.
- AMANO, Y. J. **Inroduccion a la Microscopia Eletronica: Principios - Aplicaciones**. Guayaquil: Instituto Nacional de Higiene y Medicina Tropiactal Leopoldo Izquieta Perez, 2004. 165 p.
- AZEVEDO, General Gilberto; ARAGÃO, Coronel José Carlos T. **Apontamentos sobre balística**. Rio de Janeiro ., 2010.
- ARELARO, A. D., **Síntese e caracterização de nanopartículas magnéticas de ferritas**. Universidade de São Paulo. Instituto de Física.
- BALLARD *et al.* **Weapon Control System** US Pat. 2015/004.0453 A1 Feb. 12, 2015
- BROWN, E. *et al.*, 2010. **Generality of shear thickening in dense suspensions**. *Nature Mater.* 9, 220–224.
- CARDOSO, L. H. G.. **Nanopartículas Magnéticas De Ferritas Mistas De Cobalto E Zinco**. 2011. 109 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2011.
- CARVALHO, D. G.. **Propriedades Magnéticas De Nanopartículas De Ferritas Mistas De Manganês E Zinco**. 2015. 85 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015.
- CARVALHO, D. G. **Nanopartículas De $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ Sintetizadas Pelo Método De Solgel/Combustão**. 2012. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.
- CAVALLARO, P.V., **Soft body armor: an overview of materials, manufacturing, testing, and ballistic impact dynamics**, 1 august 2011, NUWC-NPT Technical Report 12,057.
- CHEN, J. *et al.* **Polyethylene glycol and solutions of polyethylene glycol as Green reaction media**. *Green Chemistry*, [s.l.], v. 7, n. 2, p.1-19, 2005. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/b413546f>.
- CORDEBELLO, F.S. **Polímeros do future: Tendências e oportunidades. Polímeros: Ciência e tecnologia**. Associação Brasileira de Polímeros, V.12, n.4, p. 4-25, Out.-Dez.2002.

- DA SILVA, M.V.; STAINER, D.; AL-QURESHI, H.A.; HOTZA, D. **Blindagens Cerâmicas para Aplicações Balísticas: Uma Revisão**. *Cerâmica*, Vol. 60, p. 323-331. 2014.
- 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. Scs. Tech.*, v. 67, p. 565-578, 2007.
- DING, Jie *et al.* Review on shear thickening fluids and applications. **Australian Institute For Innovative Materials**, Austrália, p.1-15, 2013.
- EGRES JR., R.G., DECKER, M.J., HALBACH, C.J., LEE, Y.S., KIRKWOOD, J.E., KIRKWOOD, WAGNER, N.J., WETZEL, E.D., **Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-kevlar composites for body armor applications**, *Proceedings of the 24th Army Conference*. Orlando, FL. Nov.29-Dec.2, 2004.
- EGRES JR., R.G., 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**, To appear in *Proceedings of SAMPLE 2005: New Horizons for Materials and Processing Technologies*. Long Beach, CA. 1-5 May 2005.
- EGRES JR., R.G., LEE, Y.S., KIRKWOOD, J.E., KIRKWOOD, K.M., WETZEL, E.D., WAGNER, N.J., **“Liquid armor”: Protective fabrics utilizing shear thickening fluids**, To appear at **IFAI 4th Int. Conf. on Safety and Protective Fabrics, October 26-27, 2004. Pittsburgh, PA.**
- ELIAS, H. G.; **An introduction to polymer science**, 1a ed., Verlog Chemie: Weinheim, 1997.
- FIGUEIREDO, A. B.S. *et al.* **Resposta A Impacto Balístico De Tecido De Aramida Impregnado Com Um Fluido Não-Newtoniano**. *Anais do Congresso Anual da Abm*, Rio de Janeiro, p.1-8, out. 2017. Editora Blucher. <http://dx.doi.org/10.5151/1516-392x-30446>.
- FLEET, M. E.. The structure of magnetite: defect structure II. **Acta Crystallographica Section B Structural Crystallography And Crystal Chemistry**, [s.l.], v. 38, n. 6, p.1718-1723, 15 jun. 1982. International Union of Crystallography (IUCr). <http://dx.doi.org/10.1107/s056774088200702x>.
- HAZELL, P. J. **Measuring the strength of brittle materials by Depth Of Penetration testing**. *Institute of Materials, Minerals and Mining*, 08, v. 109, pp 1217–1225, 2010.
- JUSTO, Jorge Manuel Costa Da Fonseca. **Estudo do comportamento ao impacto de alta velocidade de estruturas em materiais compósitos**. Porto, 1996.

- JUSTO, Jorge Manuel Costa Da Fonseca. **Estudo do comportamento ao impacto de alta velocidade de estruturas em materiais compósitos**. Editado por António Torres Marques. Porto, 2005.
- LEE, B. L. *et al.* Penetration Failure Mechanisms of Armor-Grade Fiber Composites under Impact. **Journal Of Composite Materials**, [s.l.], v. 35, n. 18, p.1605-1633, set. 2001. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1106/yrbh-jgt9-u6pt-l555>.
- 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. Mat. Scs., v. 38, p. 2825-2833, 2003.
- LUNA, C., BARRIGA-CASTRO, E. D., MENDOZA-RESÉNDEZ **The effects of aging time on the size, morphology, oriented attachment and magnetic behavior of hematite nanocrystals synthesized by forced hydrolysis of FeIII solutions**. Acta Materialia, v. 66, p. 405-413, 2014.
- MARANZANO, B.J., WAGNER, N.J., **The effects of interparticle interactions and particle size on reversible shear thickening: Hard-sphere colloidal dispersions**, j. J. Rheology, v. 45, p. 1205, 2001..
- MATHEW, D. S.; JUANG, R.. **An overview of the structure and magnetism of spinel ferrite nanoparticles and their synthesis in microemulsions**. Chemical Engineering Journal, v. 129, n. 1-3, p.51-65, maio 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2006.11.001>.
- MEDVEDOVSKI, E. **Ballistic Performance of Armour Ceramics: Influence of Design and Structure**. Part 1. Ceramics International. Vol. 36, p. 2103-2115. 2010
- MELO, G. B.M.. **Remoção De Manchas De Óleo Em Meio Aquoso Utilizando Nanopartículas Magnéticas Dispersas Em Matriz De Parafina**. 2014. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.
- MIL-STD-376 **Ballistic Performance Ranking of Ceramic Armor Plates against High Density Penetrators**, Department of Defense, United States of America, 1993.
- MOCARSKI, Zenon R. ,**Air Gun**. US. Pat. 3,743,186. 3 jul,1973.19p.
- MOURA, Marcelo Francisco de Sousa Ferreira de, Alfredo Manuel Balacó de Morais e António Gonçalves de Magalhães. 2011. **Materiais compósitos materiais, fabrico e comportamento mecânico**. Vol. 2ª ed. Porto: Publindústria, Edições Técnicas.
- NIJ Standards-0101.06.**Ballistic Resistance of Body Armor**.U.S. Department of Justice/Office of Justice Programs - National Institute of Justice. 2008.

- OLIVEIRA, L. C. A., FABRIS, J. D., PEREIRA, M. C., **Óxidos de ferro e suas aplicações em processos catalíticos: uma revisão**. Química Nova, v. 36, n. 1, p. 123-130, 2013. PADILHA, A. F., *Materiais de Engenharia*, 1997.
- P NETO, Carlos F. **Armas On-Line: Cartuchos, Pólvoras e Projéteis – Noções Básicas**. 2012. Disponível em: <<https://armasonline.org>>. Acesso em: 22 abr. 2018.
- P NETO, Carlos F. **Armas On-Line: O Tiro com Armas de Ar Comprimido – (Rev. 1)**. 2009. Disponível em: <<https://armasonline.org>>. Acesso em: 22 abr. 2018.
- PARK, Y. *et al.* **Empirical study of the high velocity impact energy absorption characteristics of shear thickening fluid (STF) impregnated Kevlar fabric**. International Journal Of Impact Engineering, Republic Of Korea, v.72, p.67-74, out. 2014. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.05.007>> Acesso em: 22 abr. 2018.
- PASQUALI, Michele, Consuelo Terra e Paolo Gaudenzi. 2015. **"Analytical modelling of highvelocity impacts on thin woven fabric composite targets"**. **Composite structures**. no. 131:951-965. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822315005425>.
- ROSENBERG, Z., YESHURUN Y., BLESS, S. J., OKAJIMA, K. **A new definition of ballistic efficiency of brittle materials based on the use of thick backing plates**, in Impact loading and dynamic behavior of materials based on the use of thick backing materials, (ed. CHIEM, C. Y. *et al.*), DGM Informationsgesellschaft mbH, Oberursel, pp. 491-498, 1988
- SANTOS, José Almeno da Silva. **Métodos de Análise de Impactos Balísticos**. 2016. 53 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2016.
- SILVA FILHO, L. C. P., GARCEZ, M. R. **Compósitos de Engenharia de Matriz Polimérica**. In: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON. (Org.). *Materiais de Construção Civil*. 01 ed. São Paulo - SP: Arte Interativa, v. 02, p. 1423-1464, 2007.
- 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. 1922-1928, 2013.
- SPINACÉ, Márcia Aparecida da Silva; PAOLI, Marco Aurelio de. **A Tecnologia da Reciclagem de Polímeros**. Química Nova, Campinas, v. 28, n. 01, p.1-8, 2005.
- TAN, V.b.c.; TAY, T.e.; TEO, W.k.. Strengthening fabric armour with silica colloidal suspensions. **International Journal Of Solids And Structures**, [s.l.], v. 42, n. 5-6, p.1561-1576, mar. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.08.013>.

- VERWEY, E.j.w.; HAAYMAN, P.w.. **Electronic conductivity and transition point of magnetite (“Fe₃O₄”)**. Physica, [s.l.], v. 8, n. 9, p.979-987, nov. 1941. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0031-8914\(41\)80005-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0031-8914(41)80005-6).
- WANG, L.; KANESALINGAM, S.; NAYAK, R.; PADHYE, R. **Recent trends in Ballistic Protection. Textiles and Light Industrial Science and Technology (TLIST)**, Vol. 3. P. 37-47. 2014.
- YANG, H. H. 1993. Kevlar aramid fiber. John Wiley & sons Ltd.
- YILDIZ, S.. **Synthesis and Rheological Behavior of Shear Thickening Fluids(STFs) For Liquid Armor Applications**. 2013. 2 p. A Thesis Submitted to the Graduate School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Materials Science and Engineering .
- ZHANG S., DONG D., SUI Y., LIU Z., WANG H., QIAN Z., SU W., **Preparation of core shell particles consisting of cobalt ferrite and silica by sol-gel process**. J. Alloys Compd., v. 415, p. 257, 2006.