

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

ARTUR CAMPOSO PEREIRA

**COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE BLINDAGEM
MULTICAMADA COM COMPÓSITOS DE POLIÉSTER
REFORÇADOS COM FIBRAS E TECIDO DE FIQUE**

**Rio de Janeiro
2019**

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

ARTUR CAMPOS PEREIRA

**COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE BLINDAGEM
MULTICAMADA COM COMPÓSITOS DE POLIÉSTER
REFORÇADOS COM FIBRAS E TECIDO DE FIQUE**

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Doutorado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciência dos Materiais. Orientador:

Prof. Sergio Neves Monteiro – Ph.D.

Rio de Janeiro
2019

© 2019

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, microfilmар 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).

Pereira, Artur Camposo

Comportamento balístico de blindagem multicamada com compósitos de poliéster reforçados com fibras e tecido de fique / Artur Camposo Pereira, orientado por Sergio Neves Monteiro – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2019.

97 f.

Tese (Doutorado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2019.


1. Curso de Ciência dos Materiais – teses e dissertações. 2. Compósitos. 2. Fibra. I. Monteiro, Sergio Neves. II. Título. III. Instituto Militar de Engenharia.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**ARTUR CAMPOSO PEREIRA****COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE BLINDAGEM
MULTICAMADA COM COMPÓSITOS DE POLIÉSTER
REFORÇADOS COM FIBRAS E TECIDO DE FIQUE**


Tese de doutorado apresentada ao Curso de Doutorado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências em Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Sergio Neves Monteiro – Ph.D. do IME


Aprovada em 03 de dezembro de 2019 pela seguinte Banca Examinadora:




Prof. Sergio Neves Monteiro – Ph.D. do IME – Presidente



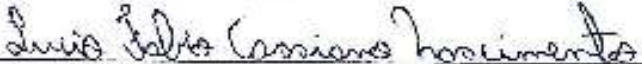
Prof. Afonso Rangel Garcez de Azevedo – D.Sc. da UFF



Prof. Fábio de Oliveira Braga - D.Sc. da UFF



Prof. André Ben-Hur da Silva Figueiredo – D.Sc. do IME



Prof. Maj Lucio Fabio Cassiano Nascimento – D.Sc. do IME

Rio de Janeiro
2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder confiança, coragem e persistência para superar os desafios e aprender com os erros.

À minha família, especialmente meus pais Nilson e Carminda, por estarem comigo nos bons e maus momentos, por serem pessoas maravilhosas que não medem esforços para me ajudar.

Ao meu orientador, professor, conselheiro e amigo Sergio Neves Monteiro, por todo o suporte que possibilitou a conclusão deste trabalho, pelos sábios conselhos motivacionais que foram muito além da área acadêmica.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais do IME, por serem excelentes profissionais que trabalham em benefício da educação brasileira.

Aos colegas e amigos pelas várias vezes que me ajudaram nos processos laboratoriais, repassando seus conhecimentos com paciência e atenção, e pelo auxílio durante os ensaios.

Aos demais colegas do IME pela ajuda e pelos bons momentos de convívio.

À CAPES, pelo suporte financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O sistema de blindagem multicamada (SBM) tem por objetivo absorver a energia cinética de um fragmento (projétil) e impossibilitar a penetração dos estilhaços, resultando em uma proteção pessoal satisfatória. Esta estrutura pode ser composta de três diferentes materiais, que são divididos em: camada frontal de material cerâmico, segunda camada, de laminados de tecidos ou fibras de alta resistência como aramida (Kevlar[®]), e a terceira camada de material dúctil (material metálico). A primeira camada possui o objetivo de reduzir a energia de impacto por meio da deformação, erosão e estilhaços do projétil. A segunda camada possui o objetivo de eliminar a energia de impacto por meio da absorção da energia cinética dos estilhaços oriundos do impacto do projétil. Já na terceira camada possui a função de captar a energia residual dos estilhaços por meio da deformação plástica. O atual trabalho propôs como segunda camada, em paralelo com o tecido de aramida, o compósito de matriz poliéster reforçado com fibras de fique (*Furcraea andina*), na configuração fibra ou tecido, diferenciando a fração volumétrica (10, 20 e 30%). Testes balísticos foram realizados com projétil de nível III, possuindo uma velocidade de impacto acima de 830 m/s. O sistema de blindagem multicamada constituído da segunda camada de compósito de matriz poliéster reforçado com fibras de fique, obteve a aceitação da norma NIJ 0101.04. Nessa aceitação prevalece o critério de obter um valor de indentação (trauma) que não ultrapasse 44 milímetros. Os resultados mostraram que todos os SBMs testados exibiram uma profundidade de trauma menor que 44mm. Dentre os materiais testados, o compósito com 20%vol. de fibra de fique exibiu menor profundidade de indentação que correspondeu a 27% de superioridade em relação ao laminado de aramida. Além disso, resultados de velocidade residual ($V_L=208\text{m/s}$) e do casamento de impedância ($2,26 \cdot 10^6 \text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) foram satisfatórios quando comparados com o tecido de aramida. Imagens geradas no MEV demonstraram a fratura frágil da matriz de poliéster, bem como a correlação das fibras de fique com os estilhaços do material cerâmico, desprendimento das fibras na matriz e os compósitos sendo delaminados. Tais mecanismos foram atuantes para reduzir a energia de impacto do projétil. O compósito de poliéster reforçado com fibra de fique proporciona uma redução dos custos dos materiais de blindagem em até quinze vezes o valor da blindagem com tecido de aramida.

Palavras-chaves: Blindagem Multicamada; Compósito; Fibra Natural; Fique.

ABSTRACT

The multilayer armor system (MAS) is designed to absorb the kinetic energy of a fragment (projectile) and prevent the penetration of shrapnel, resulting in satisfactory personal protection. This structure might be made up of three different materials, which are divided into: front layer of ceramic material, second layer, high strength fabric or fiber laminates such as aramid (Kevlar[®]), and the third layer of ductile material (material metallic). The first layer has the objective of reducing impact energy through deformation, erosion and capture shrapnel of the projectile. The second layer has the objective of eliminating the impact energy by absorbing the kinetic energy of the shrapnel from the impact of the projectile. The third layer has the function of capturing the residual energy of the shrapnel through plastic deformation. The present work proposed as a second layer, in parallel with the aramid fabric laminate, the fiber-reinforced polyester matrix composite reinforced with fique (*Furcraea Andina*), in the fiber or fabric configuration, with different the volume fraction (10, 20 and 30%). Ballistic tests were performed with a level III projectile having an impact velocity above 830m/s. The multilayer armor system consisting of the second layer of fique fiber reinforced polyester matrix composite satisfied the requirements of the US standard NIJ 0101.04. In this standard the criterion of obtaining the indentation value (trauma) not exceeding 44 millimeters prevails. The results showed that all SBMs tested exhibited a trauma depth of less than 44mm. Among the materials tested, the composite with 20% vol of fiber exhibited the lowest indentation depth that corresponded to 27% superiority to the aramid laminate. In addition, residual velocity ($V_L = 208\text{m/s}$) and impedance matching ($2.26.106\text{Kg}/(\text{m}^2.\text{s})$) results were satisfactory when compared to aramid laminate. SEM images showed the brittle fracture of the polyester matrix, the correlation of the fibers with the shrapnel of the ceramic material, the detachment of the fibers in the matrix and the composites being delaminated. Such mechanisms were active to reduce the impact energy of the projectile. The fiber-reinforced polyester composite provides a reduced cost of armor materials by up to fifteen times the value of an aramid armor.

Keywords: Multilayer Armor, Composites; Natural Fibers; Fique.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| LISTA DE ILUSTRAÇÃO..... | 10 |
| LISTA DE TABELAS | 13 |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS | 14 |
| | |
| 1. INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS | 18 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO | 20 |
| 1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO | 20 |
| 1.3.1 Objetivo Geral | 20 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos | 20 |
| | |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 22 |
| 2.1 BLINDAGEM BALÍSTICA | 22 |
| 2.2 SISTEMAS DE BLINDAGEM MULTICAMADA (SBM)..... | 24 |
| 2.3 CAMADA EXTERNA: MATERIAL CERÂMICO | 25 |
| 2.4 SEGUNDA CAMADA: MATERIAL COMPÓSITO | 26 |
| 2.4.1 Compósitos de Matriz Polimérica..... | 27 |
| 2.4.1.1 Matriz Poliéster | 28 |
| 2.4.2 Fibras De Aramida | 29 |
| 2.4.3 Fibras Naturais Lignocelulósicas (FNL) | 29 |
| 2.4.3.1 Fibras de Fique | 33 |
| 2.4.4 Geometria das Fibras Nos Tecidos | 35 |
| 2.5 CAMADA INTERNA: MATERIAL METÁLICO..... | 36 |
| 2.6 COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS MATERIAIS | 37 |
| 2.6.1 Interação e Reflexão de Ondas de Choque | 41 |
| 2.7 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL..... | 46 |

| | |
|---|-----------|
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 47 |
| 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS | 47 |
| 3.1.1 Alumina e Nióbia..... | 47 |
| 3.1.2 Ligante | 48 |
| 3.1.3 Fibra e Tecido de Figue | 48 |
| 3.1.4 Resina Poliéster | 49 |
| 3.1.5 Placa de Alumínio | 49 |
| 3.1.6 Tecido de Aramida..... | 50 |
| 3.2 FABRICAÇÃO DAS PASTILHAS CERÂMICAS | 51 |
| 3.2.1 Obtenção do Pó | 51 |
| 3.2.2 Prensagem | 51 |
| 3.2.3 Sinterização..... | 53 |
| 3.3 FABRICAÇÃO DOS COMPÓSITOS..... | 55 |
| 3.4 COLAGEM DAS CAMADAS | 56 |
| 3.5 ENSAIO BALÍSTICO..... | 57 |
| 5.5.1 Deformação na Plastilina | 57 |
| 3.5.2 Velocidade Residual | 59 |
| 3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA | 60 |
| | |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 61 |
| 4.1 ENSAIO BALÍSTICO SOBRE A PLASTILINA | 61 |
| 4.1.1 Desempenho Balístico da Primeira Camada: Pastilha Cerâmica .. | 61 |
| 4.1.2 Desempenho Balístico da Segunda Camada: Compósito Poliéster-Figue | 63 |
| 4.1.3 Desempenho Balístico na Configuração como inserto..... | 70 |
| 4.2 ENSAIO DE VELOCIDADE RESIDUAL..... | 72 |

| | |
|---|-----------|
| 4.3 INTERAÇÃO DAS ONDAS DE CHOQUE NAS BLINDAGENS MULTICAMADA..... | 76 |
| 4.4 ANÁLISE DAS MICROGRAFIAS OBTIDAS NO MEV..... | 79 |
| 4.4.1 Espectro de EDS..... | 82 |
| 4.5 CUSTO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA BLINDAGEM MULTICAMADA..... | 86 |
| | |
| 5. CONCLUSÕES | 88 |
| | |
| 6. SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS | 90 |
| | |
| 7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA..... | 91 |

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Verificação do desempenho balístico através da medida do trauma em um material de referência (plastilina). | 23 |
| Figura 2.2 Ilustração do mecanismo de absorção do impacto balístico realizado pela blindagem multicamada: (a) antes; (b) durante e (c) após o impacto balístico. | 25 |
| Figura 2.3 Estrutura química da aramida. | 29 |
| Figura 2.4 Estrutura química da celulose. | 30 |
| Figura 2.5 Estrutura química da Lignina..... | 30 |
| Figura 2.6 Microestrutura de uma FNL..... | 31 |
| Figura 2.7 MEV da superfície de FNL: a) sisal, b) bamboo, c) coco e d) piaçava. | 31 |
| Figura 2.8 O fique (<i>Furcraea andina</i>): (a) plantas cultivadas e (b) fibras extraídas sendo secadas..... | 34 |
| Figura 2.9 Inúmeras formas de obter fibras em tecido: (a) básico ou simples; (b) sarja; (c) cetim..... | 36 |
| Figura 2.10 Gráfico tensão (σ) vs. deformação (ϵ). | 38 |
| Figura 2.11 Apresentação de um modelo matemático no qual se propaga as ondas de choque: (a) Antes do choque; (b) Após um tempo t_1 ; (c) Após um tempo $t_2 > t_1$ | 39 |
| Figura 2.12 Sequência de etapas (a) que antecede, (b) exato momento e (c) procede o choque entre as regiões superficiais em análise. | 42 |
| Figura 2.13 Transmissão de onda de choque em uma região com valor de baixa impedância para outra região com valor de alta impedância. a) Gráfico de Pressão vs. Velocidade da partícula; b) Desenvolvimento da pressão nos materiais (A) e (B) ao percorrer do tempo. | 44 |
| Figura 2.14 Transmissão de onda de choque de uma região com valor de alta impedância para outra região com valor de baixa impedância. a) Gráfico de Pressão vs. Velocidade da partícula; b) Desenvolvimento da pressão nos materiais (A) e (B) ao percorrer do tempo. | 45 |
| Figura 3.1 Fibras de fique: (a) fibras separadas; (b) tecido com trama simples (entremeado ortogonal e alternado). | 48 |
| Figura 3.2 Placa de alumínio utilizada como camada interna da blindagem.... | 49 |
| Figura 3.3 Tecido de aramida Kevlar [®] S745 (fio K29). | 50 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.4 Moinho de bolas MARCONI MA500..... | 51 |
| Figura 3.5 Matriz utilizada na moldagem dos corpos cerâmicos..... | 52 |
| Figura 3.6 Prensa hidráulica semiautomática NOWAK, com capacidade para 30 toneladas..... | 52 |
| Figura 3.7 Forno INTI FE 1700, utilizado na sinterização das pastilhas cerâmicas..... | 53 |
| Figura 3.8 Matriz metálica utilizada na confecção das placas de compósito poliéster-fibra..... | 55 |
| Figura 3.9 Blindagem multicamada: (a) Diagrama esquemático: A é a camada cerâmica, B é o compósito, poliéster ou aramida e C é o alumínio; (b) corpo de prova final utilizado nos ensaios balísticos; (c) corpo de prova final com terceira camada de aramida..... | 56 |
| Figura 3.10 Munição calibre 7,62 mm x 51 mm M1..... | 57 |
| Figura 3.11 Equipamento utilizado no ensaio balístico: (a) Proвете calibre 7,62 mm com mira à laser; (b) Alvo posicionado na plastilina; (c) Radar doppler; (d) Esquema ilustrando o sistema com barreira óptica modelo B471 da HPI..... | 59 |
| Figura 3.12 Dispositivo de fixação das placas no ensaio de velocidade residual, utilizado para fixar um compósito reforçado com tecido de fique..... | 60 |
| Figura 3.13 MEV FEI Quanta FEG 250..... | 60 |
| Figura 4.1 SBM após o disparo da munição de calibre 7,62 x 51 mm. | 61 |
| Figura 4.2 Imagem microscópica da cerâmica fraturada em 5000X. | 62 |
| Figura 4.3 Blindagem multicamada utilizando como segunda camada compósito poliéster-fique: (a) fibra e (b) tecido. | 63 |
| Figura 4.4 Blindagem multicamadas com compósito reforçado com fibras de fique com 10%(a), 20%(b) e com 30%(c)..... | 64 |
| Figura 4.5 Blindagem multicamadas com compósito reforçado com tecido de fique com 10%(a), 20%(b) e com 30%(c)..... | 64 |
| Figura 4.6 Medição da profundidade de indentação causada na plastilina após o ensaio balístico..... | 65 |
| Figura 4.7 Gráficos de distribuição de Weibull para o SBM contendo como segunda camada o compósito de fibra de fique..... | 67 |
| Figura 4.8 Variação da indentação característica em função da fração volumétrica de fibra de fique na configuração de fibra alinhada..... | 68 |
| Figura 4.9 Variação da indentação característica em função da fração volumétrica de fibra de fique na configuração de tecido. | 69 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.10 Blindagem multicamada com terceira camada de aramida com fibra de fique (a) e com tecido de fique (b)..... | 72 |
| Figura 4.11 Ensaio de velocidade residual nos compósitos poliéster-fique. | 72 |
| Figura 4.12 Gráfico de valores testados do ensaio de velocidade residual do compósito poliéster-fique. | 73 |
| Figura 4.13 Gráfico pressão vs. velocidade de partícula para o SBM..... | 78 |
| Figura 4.14 Superfície de fratura de compósito de 20% fibra de fique coberta com fragmentos cerâmicos. | 80 |
| Figura 4.15 Superfície de fratura de compósito de 20% fibra de fique destacando a microfibrila (a) e do efeito Pullout e da ruptura da matriz e da fibra (b)..... | 81 |
| Figura 4.16 Imagem de MEV (a) e EDS dos elementos químicos presentes na imagem (b). | 82 |
| Figura 4.17 EDS que constitui o elemento de carbono (a), de oxigênio (b), de alumínio (c), de nióbio (d), de chumbo (e) e de cobre (f). | 85 |
| Figura 4.18 Imagem de MEV destacando a área de varredura (a) e espectro de EDS da determinada área (b)..... | 86 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 Níveis de proteção balística. | 22 |
| Tabela 2.2 Propriedades de algumas FNL em comparação com as fibras sintéticas. | 33 |
| Tabela 2.3 Caracterização macroestrutural e mecânica da fibra de fique..... | 35 |
| Tabela 3.1 Composição química da Alumina. | 47 |
| Tabela 3.2 Composição química da Nióbia. | 47 |
| Tabela 3.3 Propriedades mecânicas da liga de alumínio utilizada. | 50 |
| Tabela 3.4 Tipo e designação dos corpos de prova para os ensaios balísticos. | 58 |
| Tabela 4.1 Propriedades das cerâmicas sinterizadas. | 62 |
| Tabela 4.2 Resultados médios obtidos nos ensaios balísticos. | 66 |
| Tabela 4.3 Parâmetros de Weibull obtidos das indentações das blindagens multicamadas. | 66 |
| Tabela 4.4 Médias dos resultados obtidos nos ensaios balísticos. | 70 |
| Tabela 4.5 Resultados médios de indentação utilizando aramida e alumínio. . | 71 |
| Tabela 4.6 Resultados das velocidades médias de impacto e residual, energia absorvida e VL para cada componente do SBM | 74 |
| Tabela 4.7 Parâmetros de Weibull gerados das velocidades limite dos compósitos poliéster-fique..... | 75 |
| Tabela 4.8 Resultados dos parâmetros característicos de cada material e da velocidade da onda de choque..... | 77 |
| Tabela 4.9 Resultados da densidade, onda elástica do compósito poliéster-fique e o módulo de elasticidade. | 77 |
| Tabela 4.10 Valores da onda de choque, de velocidade de partícula e pressão nas interfaces de cada componente do SBM com sua natureza compressiva ou trativa. | 78 |
| Tabela 4.11 Resultados da Impedância de choque dos componentes do SBMs. | 79 |
| Tabela 4.12 Modelo de custo para diferentes compósitos. | 87 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - American Society for Testing of Materials

CAEx - Centro de Avaliações do Exército

EDS - Espectroscopia por dispersão de energia dos elétrons

IME - Instituto Militar de Engenharia

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura

NBR - Norma Brasileira

NIJ - National Institute of Justice

FNL - Fibra Natural Lignocelulósica

ISO - International Organization for Standardization

PEG - Polietileno Glicol

SBM - Sistema de Blindagem Multicamada

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

SÍMBOLOS

| | |
|------------------------|--|
| S | - Constante da equação de estado do material |
| ρ | - Densidade do material |
| ρ_{sup} | - Densidade superficial da blindagem |
| ρ_m | - Densidade da matriz |
| ρ_f | - Densidade da fibra |
| ρ_{cp} | - Densidade do compósito |
| E_L | - Energia absorvida |
| V_m | - Fração volumétrica da matriz |
| V_f | - Fração volumétrica das fibras |
| V | - Volume específico |
| $d\sigma/d\varepsilon$ | - Inclinação da curva tensão versus deformação |
| E | - Módulo de elasticidade |
| E_m | - Módulo de elasticidade da matriz |
| E_f | - Módulo de elasticidade da fibra |
| E_c | - Módulo de elasticidade do compósito |
| L | - Comprimento da fibra |

| | |
|------------------|--|
| d | - Diâmetro da fibra |
| β | - Módulo de Weibull |
| R^2 | - Ajuste da curva de Weibull |
| θ | - Unidade característica de Weibull |
| P | - Pressão |
| σ | - Tensão |
| σ_T | - Tensão de ruptura |
| σ_e | - Tensão limite de escoamento |
| ε | - Deformação |
| $(\Delta L/L_0)$ | - Ductilidade do material |
| U_s | - Velocidade da onda de choque |
| C_o | - Velocidade da onda elástica |
| V_{50} | - Velocidade limite - 50% de probabilidade de perfuração |
| V_L | - Velocidade limite |
| V_s | - Velocidade de impacto |
| U_p | - Velocidade de partícula |

| | |
|-----------|---------------------------------|
| C | - Velocidade do som no material |
| V_r | - Velocidade residual |
| m | - Massa |
| m_p | - Massa de poliéster |
| m_f | - Massa de fíque |
| m_{end} | - Massa de endurecedor |
| t | - Tempo |
| th | - Espessura |
| Z | - Impedância de Choque |

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O Número de homicídios oriundos de armas de fogo no Brasil gera uma grande preocupação nacional. Os registros do Subsistema de Informação sobre Mortalidade permitem verificar que, de 1990 e 2012, morreram mais de 880 mil pessoas vítimas de disparo de algum tipo de arma de fogo. Esse enorme crescimento das mortes por armas de fogo na população total, foi alavancado, de forma quase exclusiva, pelos homicídios (WAISELFISZ, 2015).

A crescente violência, juntamente com as melhorias atuais de tecnologia de combate, gera um desafio aos centros de pesquisa no setor de blindagem balística para inovar no desenvolvimento de materiais avançados, levando à realização de projetos de pesquisa que sejam utilizados na sociedade (SILVA *et al.*, 2014; TABIEI & NILAKANTAN, 2008; WANG *et al.*, 2014).

Os sistemas de blindagem multicamada (SBM) são utilizados para eventos balísticos classificados como nível III de proteção. Esse nível de proteção (entre diversos níveis) representa calibre 7.62x51, massa de 9,7g e com velocidade de 838m/s. Através da união de diferentes materiais, este sistema proporciona uma efetiva proteção pessoal de baixo peso. Além de absorver a energia cinética do projétil, este sistema impede a penetração de fragmentos (SILVA *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2016). A blindagem multicamada comumente utilizada é constituída por uma placa frontal cerâmica, seguida de camadas de fibras sintéticas de poliaramida (Kevlar®).

O material cerâmico, utilizado como primeira camada, apresenta alta resistência à compressão, alta dureza e baixa resistência à tração. Possui o objetivo de eliminar uma grande parte da energia de impacto por meio da deformação, erosão e fragmentação do projétil (MEDVEDOVSKI, 2010; MONTEIRO *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2016). Na segunda camada, normalmente, são usados materiais sintéticos: Kevlar® (fibras de aramida) ou Dyneema® (polietileno de ultra alto peso molecular) que tenham um baixo peso específico e alta resistência à tração (MONTEIRO *et al.*, 2011; CALLISTER JR

& RETHWISCH, 2014). Estes materiais apresentam, por meio da absorção da energia cinética, um significativo papel em reduzir a energia de impacto dos fragmentos que são oriundos do impacto do projétil com o material cerâmico. Entretanto, um material adicional (terceira camada) serve com objetivo de impedir a perfuração da blindagem pelo projétil e absorver a energia cinética residual por deformação plástica. Esse terceiro material pode ser outra camada do material sintético ou um metal que apresenta ductilidade e tenacidade (WANG *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2014; BRAGA *et al.*, 2017). Resultados mais relevantes e atuais de compósitos reforçados com fibras naturais lignocelulósicas apresentaram ótimos parâmetros de proteção balística em SBM. Esses valores são comparados aos dos tecidos de fibras sintéticas, mas proporcionam um custo reduzido e redução de peso (ARAÚJO, 2015; CRUZ, 2015; SILVA, 2014; BRAGA, 2017; LUZ, 2015).

As fibras naturais se destacam em comparação com as fibras sintéticas no que se refere a biodegradabilidade, baixa densidade, caráter não tóxico, baixa abrasividade nas máquinas que fabricam os compósitos, boas propriedades mecânicas e custo reduzido. Listando essas informações, elas se tornam vantajosas no desenvolvimento e utilização de materiais de engenharia (MONTEIRO *et al.*, 2011).

Os sistemas de blindagem multicamada (SBMs) comumente testados já atuam por si só como nível III de proteção balística, atendendo ao critério da de indentação estabelecida pela norma NIJ 0101.04, 2000. Entretanto, é possível transformar um colete de nível III-A para nível III colocando em seu interior insertos de placas balísticas (LUZ, 2018).

Portanto, o SBM contendo como segunda camada um compósito polimérico reforçado com fibra lignocelulósica, tem por objetivo implementar a proteção individual, utilizando materiais de baixo peso e de custo reduzido; contribuindo ainda para um desenvolvimento sustentável.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O Exército Brasileiro junto com o Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia (IME) dedica recursos e realiza trabalhos de desenvolvimento de materiais avançados com intuito de serem aplicados em blindagem balística. Os SBMs, utilizando como segunda camada os compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas apresentaram desempenhos balísticos satisfatórios, atendendo a critérios normativos, aliados ao baixo custo e baixo peso. Este trabalho dedica esforços para transformar esta blindagem multicamada de caráter científico em um produto tecnológico, podendo ser utilizada em coletes balísticos. Este trabalho visa também contribuir no estudo de utilização das fibras naturais de fique em SBM, utilizando a configuração de fibras ou tecido, através da fabricação de compósitos à base de resina poliéster.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.3.1 Objetivo Geral

Investigar o aperfeiçoamento balístico de um SBM que tenha o compósito de matriz poliéster reforçado com fibras de fique como segunda camada. As fibras de fique serão adicionadas na matriz em duas configurações distintas: fibra e tecido, nas frações de 10, 20 e 30% em volume. Os resultados serão comparados com aqueles obtidos para o de tecido laminado de aramida com mesma espessura.

1.3.2 Objetivos Específicos

- 1) Analisar se os SBMs, utilizando como segunda camada os compósitos poliéster-fique, atenderiam as especificações da norma internacional NIJ 0101.04 (2000), quanto a profundidade de indentação.
- 2) Avaliar a eficiência da segunda camada de poliéster com fibra de fique no impacto balístico em comparação com o tecido de aramida.

- 3) Investigar os mecanismos de captura dos fragmentos da segunda camada do compósito de fique.
- 4) Realizar uma análise da fratura dos compósitos de fique.
- 5) Associar a performance balística com a impedância de choque dos materiais testados.
- 6) Para configuração de fibra de fique, avaliar o desempenho balístico da velocidade limite e da indentação nos compósitos.
- 7) Avaliar o desempenho balístico tanto relativamente à velocidade limite quanto à indentação nos compósitos configuração de tecido de fique.
- 8) Realizar uma análise de custo do SBM com fibras de fique comparando com tecido de aramida.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BLINDAGEM BALÍSTICA

A blindagem balística é definida como uma proteção com o objetivo de gerar resistência contra a tentativa de um projétil perfurar um determinado corpo, sendo esse projétil oriundo de uma arma de fogo (ABNT NBR 15000, 2005).

As forças armadas brasileira acatam normas nacionais e internacionais, no que se refere a estimativa do desempenho de uma proteção balística (ABNT NBR 15000, 2005, NIJ 0101.04, 2000). Essas normas especificam blindagem em vários níveis: relacionando o calibre, a massa e velocidade do projétil. A Tabela 2.1 exibe os níveis de proteção perante ao sistema de blindagem.

Tabela 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 |
| IIA | 9mm FMJ | 8,0 ± 0,1 | 332 ± 12 |
| | .357 Magnum JSP | 10,2 ± 0,1 | 381 ± 12 |
| II | 9mm FMJ | 8,0 ± 0,1 | 358 ± 15 |
| | .357 Magnum JSP | 10,2 ± 0,1 | 425 ± 15 |
| IIIA | 9mm FMJ | 8,0 ± 0,1 | 426 ± 15 |
| | .44 Magnum SWC GC | 15,6 ± 0,1 | 426 ± 15 |
| III | 7.62x 51 FMJ | 9,7 ± 0,1 | 838 ± 15 |
| IV | .30 – 06 AP | 10,8 ± 0,1 | 868 ± 15 |

Segundo a norma NIJ, a eficiência dessa blindagem é medida em relação à deformação (indentação) ocasionada no material de referência, tendo em vista

o valor limite de 44 mm. Caso seja ultrapassado este valor, é considerado um trauma letal para o indivíduo. A norma NIJ 0101.04 (2000) considera como um material de referência a plastilina, que é um testemunho de argila (*clay witness*) semelhante a densidade de um corpo humano. Na Figura 2.1 é exibida uma amostra de blindagem sobre a plastilina, antes e após o impacto do projétil.

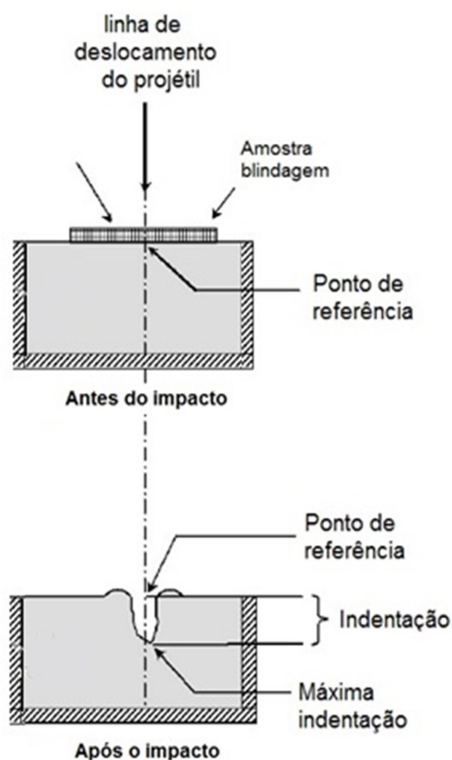


Figura 2.1 Verificação do desempenho balístico através da medida do trauma em um material de referência (plastilina).

Além do método de profundidade na indentação de plastilina gerada pelo impacto de um projétil, há métodos que buscam obter comprovação do desempenho balístico por probabilidade. Estes são idealizados na possível perfuração ou não do projétil sobre o alvo, determinando assim a velocidade limite (V_L). O método mais significativo é o limite balístico (V_{50}) que representa a velocidade em que a probabilidade do projétil perfurar a blindagem é de 50% (ZUKAS *et al*, 1982).

O cálculo a V_{50} , para o caso de projétil de alta velocidade (maior que 800m/s), é difícil de obter pois necessitaria de pelo menos três impactos que

não perfurassem o alvo (WANG et al., 2014). Assim, o objetivo seria calcular o limite balístico através da média dos impactos. Com isso, outra possibilidade seria aferir a velocidade limite (V_L) através da energia absorvida pelo alvo perfurado por um projétil.

Morye et al (2000) determina a V_L como a máxima velocidade em que o alvo absorve a energia cinética do projétil, sem que ocorra a perfuração. Na EQ. 2.1 é apresentada a energia absorvida (E_{Abs}) como a diferença entre os quadrados da velocidade de impacto do projétil (V_s) e a velocidade residual (V_R) multiplicada pela massa (M) do projétil.

$$E_{Abs} = \frac{M(V_0^2 - V_R^2)}{2} \quad \text{EQ. 2.1}$$

Caso a blindagem absorva toda a energia cinética do projétil, o limite balístico será estimado pela EQ. 2.2.

$$V_L = \sqrt{\frac{2E_{abs}}{M}} \quad \text{EQ. 2.2}$$

2.2 SISTEMAS DE BLINDAGEM MULTICAMADA (SBM)

SBMs tem como objetivo não só dissipar a energia do projétil, mas também bloquear ao máximo a presença de estilhaços. Uma combinação de diferentes materiais com propriedades distintas é utilizada, tendo como objetivo absorver a energia do projétil e impedir a penetração de fragmentos.

Normalmente, esse sistema é composto por uma camada frontal de cerâmica com capacidade de deformar e fragmentar o projétil (MEDVEDOVSKI, 2010). Grande parte da energia cinética do material é dissipada através dessa fragmentação dinâmica do projétil. Além disso, ela promove uma melhor distribuição da pressão de impacto sobre a segunda camada (SILVA *et al.*, 2014). Esta fragmentação envolve etapas de nucleação, crescimento e coalescimento das trincas (LOURO; MEYERS, 1989). Na Figura 2.2 são mostradas as etapas do impacto balístico de um sistema multicamada.

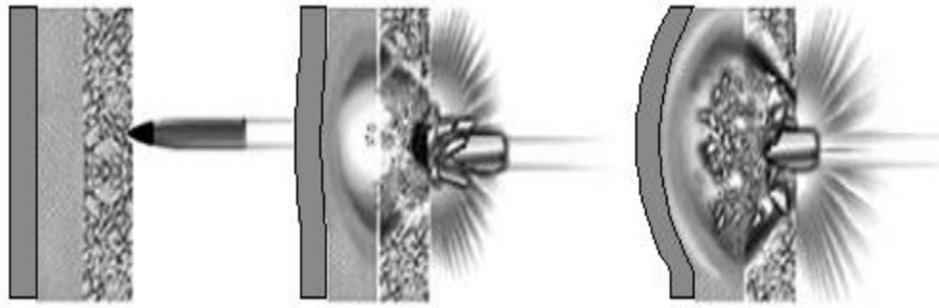


Figura 2.2 Ilustração do mecanismo de absorção do impacto balístico realizado pela blindagem multicamada: (a) antes; (b) durante e (c) após o impacto balístico.

A segunda camada (material polimérico ou compósito) absorve a energia residual dos fragmentos do projétil e da própria cerâmica, além de transformar a energia cinética em deformação plástica. Os materiais poliméricos mais utilizados são as poliamidas, aramidas e polietilenos. Quando é utilizado um material compósito, em geral utiliza-se matriz polimérica reforçada com fibras (NORONHA e MELO, 2010). Neste trabalho será usado um compósito de matriz poliéster reforçado com fibras ou tecido de fique.

O SBM ainda pode incluir uma terceira camada, por exemplo, um metal dúctil que restringe ainda mais a penetração do projétil e dos fragmentos (MONTEIRO *et al.*, 2014). Neste estudo será usado uma placa de alumínio 5052 H34.

Assim como em trabalhos anteriores (ARAÚJO, 2015; CRUZ, 2015; LUZ, 2014; SILVA, 2014; BRAGA, 2017) optou-se pela seguinte configuração: camada externa composta de material cerâmico (alumina dopada com nióbia), segunda camada composta de material compósito de matriz polimérica, matriz poliéster, reforçada com fibra natural lignocelulósica de fique ou seu tecido e camada interna composta de uma placa de alumínio.

2.3 CAMADA EXTERNA: MATERIAL CERÂMICO

Os materiais cerâmicos são aplicados em sistemas de proteção balística devido suas desejáveis características como a elevada resistência à compressão e baixa densidade (LOURO, LINDFORS e MEYERS, 1988). Além

disso, quando aplicados principalmente como camada externa, os materiais cerâmicos são ótimos em absorver a energia cinética do projétil e em dissipá-la na produção de superfícies de fratura (GOMES, 2004).

De caráter geral, materiais cerâmicos são constituídos por elementos metálicos e não metálicos ligados quimicamente e possuem como propriedades mecânicas: elevada rigidez, elevada dureza, elevada resistência ao calor, alta resistência mecânica a compressão, baixa condutibilidade térmica e elétrica, são frágeis e pouco resistentes ao impacto (CALLISTER & RETHWISCH, 2014).

Diferentes materiais cerâmicos vêm sendo utilizados em blindagem balística, como exemplos, os carbetos (carbeto silício e carbeto de boro), os óxidos (alumina - Al_2O_3) e os nitretos (nitreto de silício - Si_3N_4). A alumina tem sido largamente utilizada em proteção balística por apresentar melhor relação custo-benefício em comparação as outras cerâmicas citadas acima. Possui boas propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e dureza elevadas) e viabilidade comercial (SILVA *et al.*, 2014).

Quando se adiciona o óxido de nióbio (nióbia - Nb_2O_5) na alumina, o processo de sinterização da alumina ocorre em temperatura mais baixa e em tempo reduzido. A nióbia promove no processo de sinterização da alumina um crescimento dos grãos na microestrutural final e gera uma 2ª fase nos contornos, aumentando sua densificação. Isso resulta em uma microestrutura mais grosseira, revelando uma tendência de destruição da ponta do projétil, dificultando sua penetração. Além disto, a precipitação nos contornos resulta em fratura intergranular que absorve mais energia. (GOMES, 2004).

2.4 SEGUNDA CAMADA: MATERIAL COMPÓSITO

A engenharia busca fazer combinações cada vez mais exigentes dos materiais visando a otimização de propriedades. Estas propriedades não são atingidas por materiais monolíticos, como as ligas metálicas, cerâmicas e polímeros convencionais. Assim, diversos seguimentos industriais necessitam de materiais mais leves e de maior desempenho. Esses materiais devem ser

fortes, rígidos, e apresentarem resistência à abrasão e ao impacto, além de possuírem elevada resistência à corrosão (CALLISTER & RETHWISCH, 2014).

Os materiais compósitos vêm exatamente no sentido de atender a estas necessidades e podem ser definidos como uma combinação de materiais quimicamente distintos, separados por uma interface bem definida, de forma que as propriedades do conjunto sejam melhores que dos componentes individuais (CALLISTER & RETHWISCH, 2014).

Na segunda camada da blindagem multicamada de um SBM, tanto materiais compósitos como camadas de tecido de alto desempenho balístico podem ser utilizados, onde ambos são mais leves que o material utilizado na primeira camada (material cerâmico). Esta camada tem o objetivo de impedir a passagem de fragmentos do projétil e da cerâmica fraturada, ou seja, absorver mais uma parcela de energia proveniente do ensaio balístico (WANG *et al.*, 2014).

Com isso, neste trabalho será aplicado como segunda camada o compósito poliéster-lique sendo aplicado na forma de fibra ou tecido.

2.4.1 Compósitos de Matriz Polimérica

Os materiais compósitos com matriz polimérica consistem em uma resina polimérica incorporada com algum material de reforço. Esses materiais são utilizados na maior diversidade de aplicações dos compósitos como consequência de suas propriedades à temperatura ambiente, facilidade de fabricação e do custo. Além de combinarem boa resistência mecânica com boa ductilidade e leveza (CALLISTER & RETHWISCH, 2014).

As matrizes poliméricas em compósitos poliméricos reforçados por fibras são utilizadas para proteger, alinhar e estabilizar as fibras, bem como para assegurar a transferência de tensão da matriz para uma fibra e desta para outra. Em geral, tanto a rigidez quanto a resistência da matriz são inferiores as das fibras reforçadoras (LACH, 1998).

Em termos de matrizes de compósitos, as resinas podem ser termorrígidas, como poliéster e a epóxi, ou termoplásticas como poliestireno. A principal diferença entre elas está no seu comportamento a altas temperaturas. Os termoplásticos são polímeros capazes de serem moldadas várias vezes devido ao fato deles se tornarem fluidos sob a ação da temperatura e depois se solidificarem quando esta diminui (CANTWELL & MORTON, 1991).

As resinas termorrígidas são mais usadas na confecção de compósitos com fibras contínuas por apresentarem maiores vantagens em relação aos termoplásticos, tais como estabilidade térmica, rigidez, estabilidade dimensional e resistência à deformação sob carregamento. Podem ser solidificadas à temperatura ambiente por ação de catalizadores, que agem como endurecedores (CALLISTER & RETHWISCH, 2014).

2.4.1.1 Matriz Poliéster

O poliéster constitui uma família de polímeros de alto peso molecular, resultantes da condensação de ácidos carboxílicos com glicóis, classificando-se como resinas saturadas ou insaturadas, dependendo especificamente dos tipos de ácidos utilizados, que irão caracterizar o tipo de ligação entre os átomos de carbono da cadeia molecular (EMBRAPOL, 2015). São utilizados como resinas para laminação, moldagem e recobrimentos, bem como para fabricação de fibras, filmes, borrachas e plastificantes (BRYDSON, 1999).

O processo de cura do poliéster ocorre em duas etapas. Na primeira etapa, a resina líquida transforma-se em um material gelatinoso, etapa designada como “ponto de gel”. A segunda fase conduz ao endurecimento final, através de um processo exotérmico. A velocidade de reação depende de vários fatores, tais como reatividade da resina, teor de endurecedor e de acelerador e as condições ambientais (MOURA *et al.*, 2011).

As resinas de poliéster insaturado dividem-se em três grandes grupos: ortoftálicas, de aplicação geral; isoftálicas, de melhor resistência mecânica e térmica, normalmente aplicadas em meios levemente agressivos; e as

bisfenólicas, usadas em meios particularmente agressivos, sobretudo com características ácidas (MOURA *et al.*, 2011).

2.4.2 Fibras De Aramida

Atualmente, as blindagens balísticas utilizam materiais como laminados de poliamida aromática ou aramida, também conhecida por seus nomes comerciais Kevlar[®], Twaron[®] ou Technora[®], dependendo do fabricante. Devido ao alto grau de ordenamento das suas cadeias moleculares, a aramida apresenta excelentes propriedades, tais como: alta resistência mecânica, baixa deformação até a fratura, alto módulo de elasticidade, alta tenacidade, larga faixa de temperatura de uso, resistência ao calor, excelente estabilidade dimensional, dentre outras características (CALLISTER & RETHWISCH, 2014; WANG *et al.*, 2014). Na Figura 2.3 é mostrada a estrutura química da Aramida.

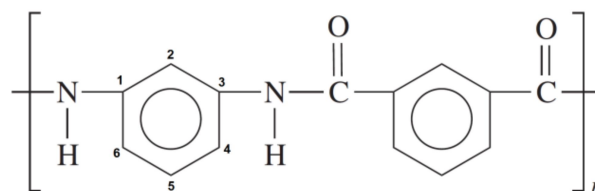


Figura 2.3 Estrutura química da aramida.

A aramida como segunda camada em blindagens multicamada na presente tese terá como objetivo a comparação com os compósitos reforçados com fibras ou tecido de fique.

2.4.3 Fibras Naturais Lignocelulósicas (FNL)

As FNLs apresentam uma ótima alternativa perante os materiais sintéticos em inúmeras áreas da indústria. Elas possuem um baixo valor de mercado, sua massa específica é baixa e é oriunda de recursos renováveis e biodegradável. A indústria de automóveis já está utilizando diversas FNLs, como fibras de coco (JOHN e THOMAS, 2008).

Destacando as fibras naturais das sintéticas, elas podem ser organizadas conforme a origem de produção. As FNLs são fibras de origem vegetal e podem ser obtidas no interior do vegetal. Além dessas fibras vegetais, destacam-se as fibras de origem animal e mineral.

A fibra é oriunda de um complexo de tecidos naturais constituídos de inúmeras células (BLEDZKI e GASSAN, 1999; MONTEIRO et al., 2011). Isto compõem uma estrutura química que é responsável em obter as características físicas de uma fibra natural. Elas são estabelecidas basicamente de fibrila e de celulose semicristalina incorporadas em uma matriz de hemicelulose e lignina (JOHN et al., 2008). Essas estruturas químicas são exibidas na Figura 2.4 e na FIG 2.5.

A formação de ligações de pontes de hidrogênio junto com a hemicelulose e as fibrilas resultam em uma rede tridimensional. Essa rede não apresenta uma estrutura homogênea, que está exemplificada na Figura 2.6. Analisando microscopicamente algumas das fibras naturais, verifica-se diferenças superficiais, visto na Figura 2.7 (MONTEIRO et al., 2011).

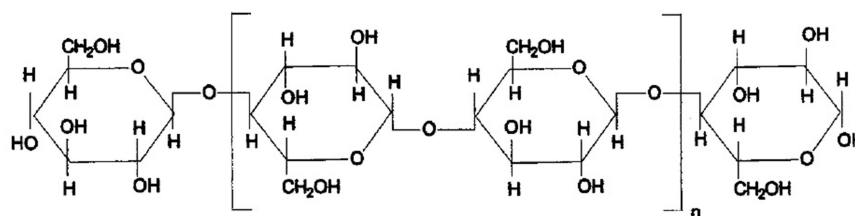


Figura 2.4 Estrutura química da celulose.

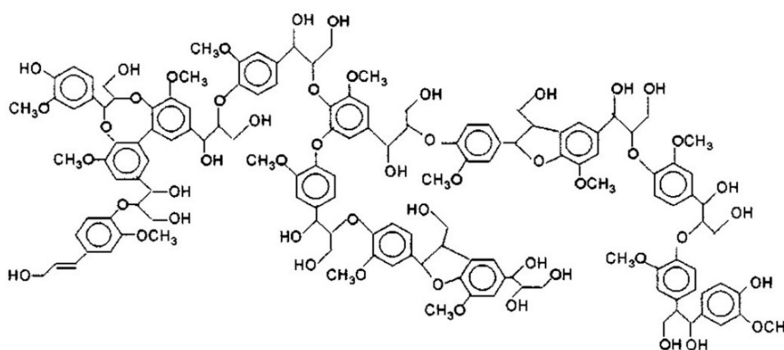


Figura 2.5 Estrutura química da Lignina.

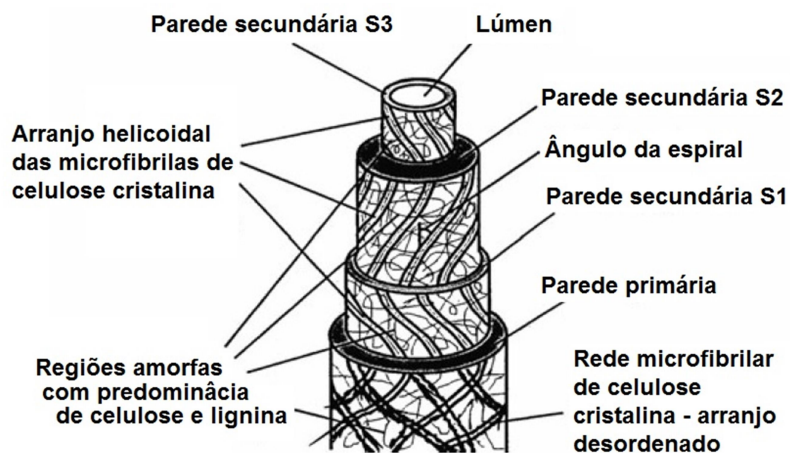


Figura 2.6 Microestrutura de uma FNL.

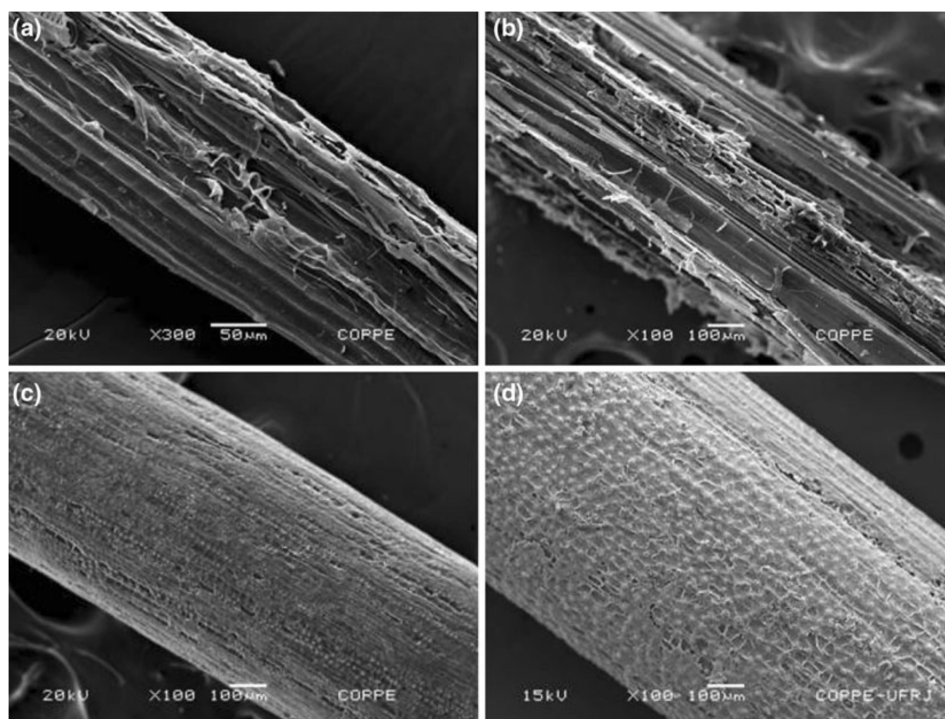


Figura 2.7 MEV da superfície de FNL: a) sisal, b) bambu, c) coco e d) piaçava.

Na Figura 2.6, destaca-se a fibra com paredes primárias, secundárias, em uma geometria complexa. As três camadas da parede secundária apresentam as microfibrilas que ficam estruturadas de maneira helicoidal. A configuração das microfibrilas resulta em um ângulo helicoidal (microfibrilar) em relação ao eixo da fibra e à direção das microfibrilas (JOHN e THOMAS, 2008;

EICHHORN et al., 2001). Esse ângulo microfibrilar e a razão de celulose e lignina/hemicelulose é diferente para cada tipo de fibra natural. Com isso, esses parâmetros caracterizam as propriedades mecânicas das FNLs.

A presença de lignina garante rigidez nas plantas. Além disso, ela é um constituinte amorfo, hidrofóbico, e com elevado grau de polimerização, que compreende compostos aromáticos e alifáticos, podendo ser dissolvida em soluções alcalinas. Entretanto, a hemicelulose é de caráter hidrofílico e constituída por polissacarídeos com fácil hidrolisação em ácidos, podendo permanecer ligados na celulose, mesmo após a eliminação da lignina (BLEDZKI e GASSAN, 1999; MONTEIRO et al., 2011).

As fibras naturais, devido sua microestrutura heterogênea, apresentam uma desvantagem perante a fibras sintéticas de que suas propriedades não são constantes. As fibras naturais podem variar suas características devido ao tempo de vida, ao seu tamanho e diâmetro bem como às condições que são armazenadas. Com isso, uma fibra de mesma família pode resultar em propriedades distintas (MOHANTY et al., 2000).

Outro ponto sobre a desvantagem da FNL em comparação com a sintética é na afinidade com a água. As FNLs são de caráter hidrofílico e apresentam elevada afinidade com a umidade, em função do grupo hidroxila na sua estrutura (SAHED et al., 1999).

A adesão de uma fibra natural (característica hidrofílica) em uma matriz polimérica (característica hidrofóbica) não é bem sucedida quando existe a presença de água. Quando se tem a eliminação da água, embora facilite a adesão, geram-se poros e/ou vazios que prejudicam as propriedades mecânicas das fibras. Para que possa melhorar a adesão fibra/matriz, pode-se realizar tratamentos químicos (BLEDZKI e GASSAN., 1999; MOHANTY et al., 2000; MONTEIRO et al., 2011).

Além de melhorar a interação da fibra com a matriz, um tratamento químico contribui também para criar uma superfície rugosa. Tal procedimento proporciona melhoria na adesão fibra/matriz. Entretanto, há casos que esse tratamento químico prejudica a fibra, resultando em um compósito com propriedades inferiores (MONTEIRO et al., 2011; KALIA et al., 2011). O método

de tratamento alcalino se destaca quando se busca modificar a superfície da fibra. Este método elimina impurezas (graxas, ceras entre outros), melhorando a interação entre fibra/matriz, e resultando em melhores propriedades finais. Na presente tese não foram realizados tratamentos químicos que modificam o material.

Vale ressaltar as inúmeras vantagens que as FNLs apresentam. Sua produção é de baixo valor comercial, possuem baixa densidade, não são rígidas e não são abrasivas. As FNLs se destacam em ações socio ambientais, já que são oriundas de recursos renováveis, são biodegradáveis e uma fonte de renda complementar de regiões de baixo desenvolvimento (MONTEIRO et al., 2011).

Na blindagem balística, busca-se a fabricação de compósitos de matriz polimérica com fibras ou tecidos naturais, que possuam boas propriedades mecânicas. Com isso, a utilização de um SBMs demonstra eficiência em testes balísticos (FARUK et al., 2012; MONTEIRO et al., 2011; THAKUR et al.; 2014). Na Tabela 2.2 são exibidas as propriedades mecânicas de algumas FNLs, em relação a algumas fibras sintéticas.

Tabela 2.2 Propriedades de algumas FNL em comparação com as fibras sintéticas.

| FNL | Densidade ρ (g/cm³) | Resistência à tração σ (MPa) | Módulo de Young (GPa) | Máx. σ/ρ (MPa.cm³/g) |
|------------|---|---|----------------------------------|---|
| Bambu | 1,03-1,21 | 106-204 | - | 493 |
| Banana | 0,67-1,50 | 700-800 | 27-32 | 1194 |
| Linho | 1,30-1,50 | 344-1035 | 26-28 | 496 |
| Rami | 1,5 | 400-1620 | 61-128 | 1080 |
| Sisal | 1,26-1,50 | 287-913 | 9-28 | 725 |
| Vidro E | 2,50-2,58 | 2000-3450 | 70-73 | 1380 |
| Carbono | 1,78-1,81 | 2500-6350 | 230-400 | 3567 |
| Aramida | 1,44 | 3000-4100 | 63-131 | 2847 |

2.4.3.1 Fibras de Fique

O fique (*Furcraea andina*), ilustrado na Figura 2.8a, pertence à divisão das Angiospermas, classe das Monocotiledôneas, ordem Liliiflorae e família Agavaceae (MEDINA, 1959). Originária da Colômbia, sua produção se expandiu para o Equador, Costa Rica, Antilhas e Brasil (GAÑÁN, 2002).

Desde o início do séc. XX, o fique tem ocupado um importante lugar nos setores agrícola e do agronegócio colombianos. Sua relevância na economia foi tão grande que lhe foi concedido o título de "Fibra Nacional". No início dos anos 1960, com o surgimento de produtos substitutos sintéticos, a fibra nacional foi gradativamente relegada a um segundo plano. Entretanto, o fique tanto como fibra ou tecido, continuou a ser o motor do desenvolvimento econômico das comunidades rurais e tem por característica fazer parte da cultura e costumes dos indígenas e comunidades camponesas na Colômbia (CASTELLANOS et al., 2009)

As fibras extraídas das folhas duras do arbusto de fique, Figura 2.8b, também são conhecidos em algumas regiões da Colômbia como *Cabuya*. A extração é realizada por técnica mecânica e, para reforço de compósito de polímero, a fibra fique pode ser usada sem tratamento ou tratada quimicamente de acordo com o tipo de matriz utilizada (GAÑÁN, 2003).



Figura 2.8 O fique (*Furcraea andina*): (a) plantas cultivadas e (b) fibras extraídas sendo secadas.

Poucos estudos mostram o potencial de reforço da fibra de fique

abordando a possibilidade de substituição das fibras sintéticas como reforço de compósitos. Na Tabela 2.3 são mostrados resultados das características mecânicas da fibra de fique (ALTOÉ, 2016).

Tabela 2.3 Caracterização macroestrutural e mecânica da fibra de fique.

| Diâmetro equivalente (mm) | Densidade ρ (g/cm³) | Resistência à tração σ (MPa) | Módulo de Young (GPa) |
|----------------------------------|---|---|------------------------------|
| 0,09 – 0,30 | 0,42 – 1,28 | 80 – 220 | 2,22 – 5,66 |

A planta de fique possui um tronco que pode atingir 30 cm de diâmetro com folhas que variam de 0,5 a 2 m de comprimento e 8 a 14 cm de largura, com bordas lisas, dentadas ou serrilhadas. Essa planta possui vida que varia de 12 a 20 anos e em alguns casos especiais de 60 a 70 anos. A densidade da fibra de fique apresenta grande variação de forma geral. A densidade média é de 0,68 g/cm³, valor que é relativamente baixo se comparado a outras fibras sintéticas como a fibra de vidro 2,4 g/cm³ (ALTOÉ, 2016).

2.4.4 Geometria das Fibras Nos Tecidos

Durante a Segunda Guerra Mundial, a blindagem balística utilizou os tecidos de fibras de natureza polimérica (EL MOGAHZY, 2009). Logo, houve um aprimoramento de tal tecnologia com os últimos anos na ciência. Os tecidos podem resistir de forma parcial a força que o projétil faz para penetrar, quando acontece o impacto (ALVES *et al.*, 2004; WANG *et al.*, 2014).

Nos últimos anos, tecidos de fibras naturais são testados para constituírem um SBM de qualidade, baixo custo e peso (ARAÚJO, 2015; BRAGA, 2015; CRUZ, 2015; LUZ, 2014; SILVA, 2014; WAMBUA *et al.*, 2007).

As tecnologias que resultam das fibras na fabricação de possível blindagem balística de alto desempenho vêm da fiação e tecelagem. Os fios são entrelaçados de forma de urdume e de trama para gerar os tecidos. As características do tecido são destacadas no empilhamento mecânico das fibras (JOHN & THOMAS, 2008). As configurações mais significantes são exibidas na Figura 2.9.

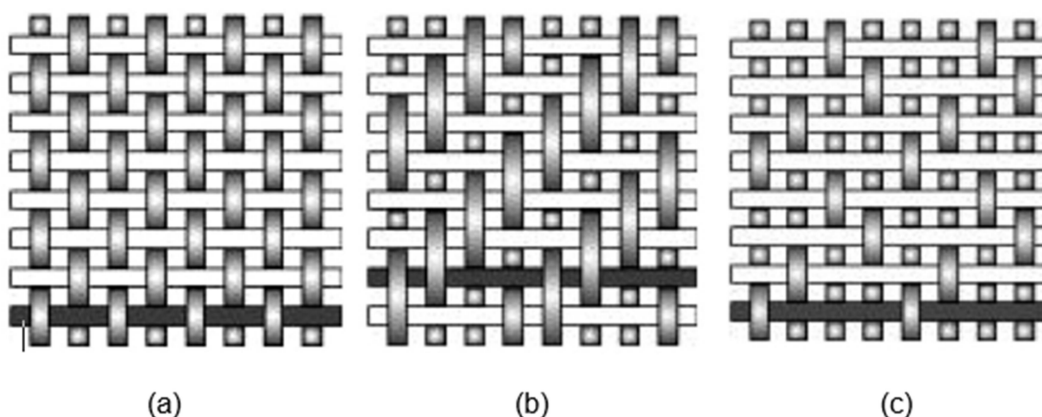


Figura 2.9 Inúmeras formas de obter fibras em tecido: (a) básico ou simples; (b) sarja; (c) cetim.

Na configuração de tecido simples, o fio de urdume é passado de direção superior e inferior do fio de trama, que garante valores simétricos e regulares com pouca presença de poros. Na configuração do tipo sarja, dois fios de urdume são passados de direção superior e inferior de um ou mais fios de trama, resultando visualmente na forma diagonal. A configuração do tecido de cetim, é basicamente uma modificação do tecido de sarja.

Pesquisas demonstram que as propriedades balísticas são afetadas de acordo com a configuração escolhida do tecido. Perante todas as configurações dos tecidos, o arranjo do tecido simples resulta em melhor custo/benefício. Entretanto, visando as propriedades balísticas, este tecido gera carregamento de flexão, resultando na diminuição de qualidade (TABIEI & NILAKANTAN, 2008; WANG *et al.*, 2014).

Para o trabalho em destaque, utilizou-se a configuração de tecido de trama simples, exemplificado na Figura 2.9a.

2.5 CAMADA INTERNA: MATERIAL METÁLICO

O material metálico de característica dúctil e deformável foi selecionado para ser a terceira camada do SBM. Sua função, por meio de mecanismos de deformação, é absorver a energia cinética residual (WANG *et al.*, 2014; WILKINS, 1978).

2.6 COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS MATERIAIS

Os carregamentos que os corpos estão sujeitos, através de cargas que podem variar com grande velocidade, resultam em uma significativa diferença quando comparados em situações estáticas ou quase estáticas (MEYERS, 1994).

O processo dinâmico é definido como uma aplicação com alta velocidade de forças externas em um corpo. Já, o processo estático ou quase estático é quando a taxa de variação da força aplicada em um corpo é relativamente baixa. Entretanto, as tensões variam de seção para seção quando se considera elevadas taxas de deformação, no caso do processo dinâmico. A nível atômico, pode-se visualizar a onda que propaga de acordo com uma sucessão de impactos de átomo a átomo. Estas ondas possuem uma velocidade característica, podendo ser calculada com excelente aproximação (MEYERS, 1994).

Um objeto se comporta balisticamente com uma resposta dinâmica, através de elevadas taxas de deformações geradas pelo impacto do projétil. O objeto sofre, em se tratando da intensidade da solicitação externa, com a propagação de ondas elásticas, plásticas ou de choque.

A onda elástica possui tensões transmitidas abaixo da tensão de escoamento do objeto. Existe uma dependência analítica do módulo de elasticidade do objeto (E) e a massa específica (ρ) para a velocidade (V_E) em um meio contínuo. A EQ. 2.3 demonstra uma relação desses parâmetros (MEYERS, 1994).

$$V_E = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{EQ. 2.3}$$

A onda plástica possui tensões transmitidas que excedem o limite de escoamento, e o objeto sofre deformação plástica. Logo, gera uma alteração da onda de tensão de uma componente elástica de maior velocidade e outra plástica. A velocidade da onda plástica é definida na EQ. 2.4 (MEYERS, 1994).

$$V_P = \sqrt{\frac{d\sigma/d\varepsilon}{\rho}} \quad \text{EQ. 2.4}$$

A Figura 2.10 exibi uma relação $d\sigma/d\varepsilon$, no regime elástico, constante e igual ao módulo de elasticidade (E). Referindo-se ao regime plástico a inclinação $d\sigma/d\varepsilon$ sofre redução, significando que ondas plásticas são propagadas com menor velocidade em relação a ondas elásticas.

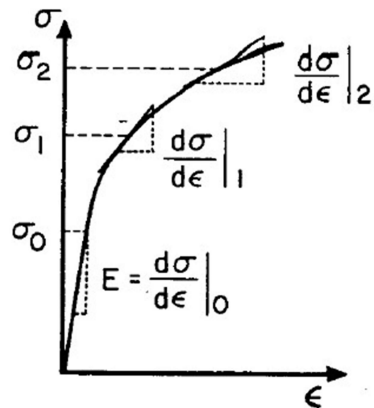


Figura 2.10 Gráfico tensão (σ) vs. deformação (ε).

Em se tratando de sollicitação dinâmica, o objeto apresenta um comportamento de um fluido e pode ser modelado através da equação dos gases perfeitos definido na EQ. 2.5. Isso ocorre devido as tensões das ondas que excedem o limite de escoamento do objeto, onde as tensões cisalhantes são desprezadas (MEYERS, 1994).

$$\frac{dP}{dV} = -\gamma \cdot \frac{P}{V} \quad \text{EQ. 2.5}$$

A onda de choque, em um objeto, pode ser obtida de um modelamento matemático através das equações de Rankine-Hugoniot. A onda de choque, juntamente com as equações de conservação de massa, de momento e de energia, é exemplificada através de uma representação de um pistão percorrendo um tubo com fluido gasoso. Na Figura 2.11 são exemplificadas as sequências do processo.

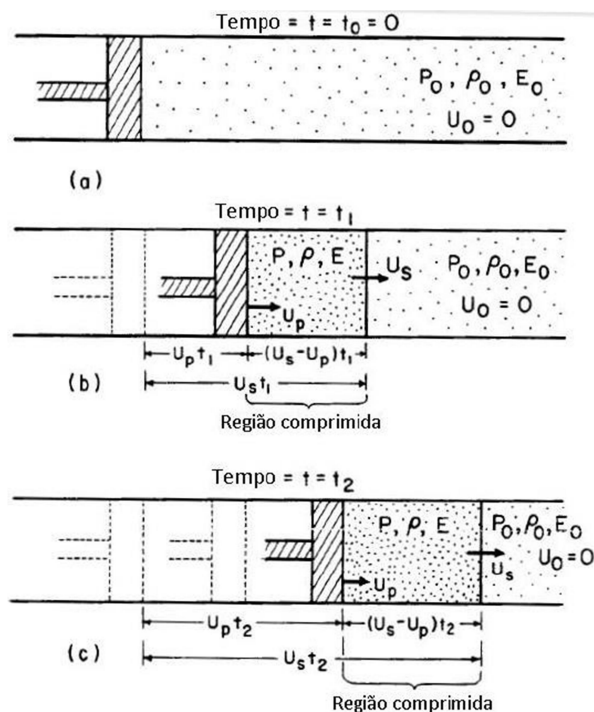


Figura 2.11 Apresentação de um modelo matemático no qual se propaga as ondas de choque: (a) Antes do choque; (b) Após um tempo t_1 ; (c) Após um tempo $t_2 > t_1$.

No tempo de $t_0=0$, o pistão encontra-se em repouso e o fluido gasoso contido (simulado o objeto) possui em uma massa específica $\rho=\rho_0$, pressão $P=P_0$, energia interna $E=E_0$ e velocidade $U_0=0$. Avançando para o tempo de t_1 , o pistão sofre aceleração atingindo uma velocidade U_p , gerando uma frente de choque que se movimenta com velocidade U_s . Assim, gera uma superfície plana separando o fluido gasoso estacionário com o que se movimenta. O pistão percorre $U_p \cdot t_1$ e a superfície plana de choque $U_s \cdot t_1$. O fluido gasoso contido nessa área que sofre compressão resulta em parâmetros com valores diferentes de P , ρ e E na região não comprimida. Com o tempo $t_2 > t_1$, o conceito é semelhante ao que acontece no momento t_1 . Entretanto, com a velocidade $U_s > U_p$, a área que sofre compressão torna-se cada vez maior (MEYERS, 1994).

Nas áreas de elevada amplitude de onda de tensão percorre com alta velocidade àquelas de baixa amplitude, determina-se onda de choque de pressão, temperatura e massa específica descontínua.

O modelamento matemático na propagação das ondas de choque resulta nas equações de conservação de Rankine-Hugoniot exibidas nas EQs. 2.6, 2.7 e 2.8.

$$\text{I) massa: } \rho_0 \cdot U_S = \rho \cdot (U_S - U_P) \quad \text{EQ. 2.6}$$

$$\text{II) momento: } (P - P_0) = \rho_0 \cdot U_S \cdot U_P \quad \text{EQ. 2.7}$$

$$\text{II) energia: } E - E_0 = \frac{1}{2} \cdot (P + P_0) \cdot (V_0 - V) \quad \text{EQ. 2.8}$$

São considerados as seguintes definições:

- O choque é considerado em uma região superficial não contínua e de nenhuma profundidade;
- O módulo de cisalhamento é determinado como zero;
- As forças atuantes no corpo e a propagação de energia térmica na linha frontal da superfície de choque são desprezíveis;
- O estado elastoplástico não é considerado;
- O objeto não sofre transformações de fase.

As EQs. 2.6, 2.7 e 2.8 apresentam as seguintes variáveis: pressão (P), energia (E), velocidade da partícula (U_P), massa específica (ρ) ou volume específico (V) e velocidade de choque (U_S). Com isso, é mandatório determinar uma equação calculável que apresentem as variáveis mencionadas (quarta equação). Esta equação (EQ. 2.9) denomina-se a equação de estado do material que exhibe a correlação gerada em experimentos de velocidade de partícula e de choque.

$$U_S = C_0 + S_1 \cdot U_P + S_2 \cdot U_{P^2} + \dots + S_n \cdot U_{P^n} \quad \text{EQ. 2.9}$$

Grande parte dos materiais, S_2 e os seguintes valores de S_n são de valores iguais a zero. Logo, resulta-se em uma simples equação linear (EQ. 2.10) no que se refere U_S e U_P , descrevendo de forma razoável o choque de materiais que não experimentam transformações de fase.

$$U_S = C_0 + S_1 \cdot U_P \quad \text{EQ. 2.10}$$

Resultados de C_0 e S_1 geralmente são encontrados em tabelas nos acervos literários. Tomando nota de todas as equações citadas (quatro equações) torna-se possível calcular uma série de relações, de forma de pares de $P-U_P$, $P-V / V_0$ e $E-U_s$.

2.6.1 Interação e Reflexão de Ondas de Choque

O casamento de impedâncias é um modelo exibido graficamente que estuda parâmetros de choque gerados de inúmeras associações em relação a cada camada de um SBM, quando as ondas de choque são obtidas depois da colisão do projétil. Quando se multiplica a velocidade da superfície frontal de onda com a massa específica, pode-se obter a impedância de choque do objeto. Na falta desse parâmetro, utiliza-se a velocidade da onda sônica. Sendo assim, elevando o valor da massa específica ou a velocidade da onda sônica, o objeto resultará em uma elevada impedância de choque. Isto possibilita calcular a pressão com uma específica velocidade de partícula gerando, como resultado, a interface de choque. Essa metodologia considera que o impacto deve interagir com apenas duas regiões planas; que estas sejam paralelas; e o caminho percorrido do projétil seja perpendicular da superfície.

Na Figura 2.12 demonstra-se de forma esquemática as etapas que antecede (a), no exato momento (b) e que procede (c) o choque interagindo na superfície do projétil e do alvo.

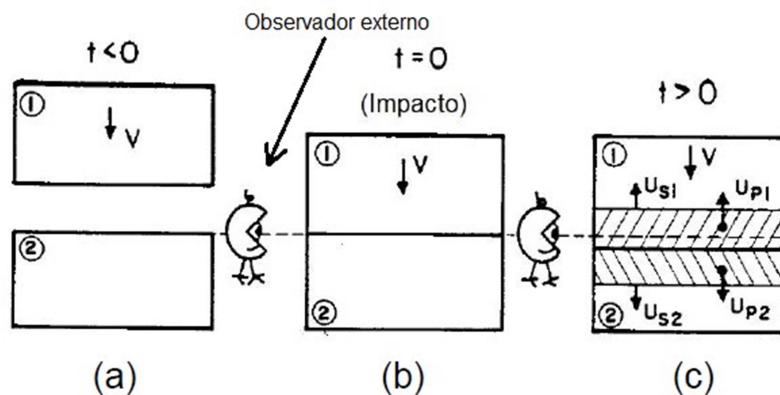


Figura 2.12 Sequência de etapas (a) que antecede, (b) exato momento e (c) procede o choque entre as regiões superficiais em análise.

Na etapa que antecede o impacto (a), o projétil (1) move-se a velocidade V e o alvo (2) permanece em velocidade nula. São produzidas duas ondas compressivas no exato momento do impacto, a primeira com velocidade U_{s2} viajando no interior do alvo, ao mesmo tempo que a segunda viagem com velocidade U_{s1} na região interna do projétil. A região que não sofreu compressão do projétil permanece movendo-se com velocidade V , ao mesmo tempo que a região que não sofre compressão do alvo permanece com velocidade zero.

Em relação à pressão resultante em ambos objetos estudados (alvo e projétil) prevalece duas premissas que necessitam ser mencionadas (MEYERS, 1994).

a) Deve-se impor velocidades semelhantes na região que sofre compressão, no que refere que o objeto seja linear ao longo da interface de impacto. Caso isso não aconteça, acarretaria vazios. Com isso, $U_{P1} = U_{P2}$;

b) Não considera a formação de outro pulso, ou seja, a pressão deverá ser de mesmo valor. Assim, $P_1 = P_2$.

Perante um sistema de referência, se estabelecem as igualdades através das equações de Rankine-Hugoniot (conservação de momento e de estado), que são exibidas nas EQs. 2.7 e 2.10. A velocidade U_{P1} deve ser medida em relação ao referencial móvel lagrangeano para manter a pressão constante (EQ. 2.11).

$$U_{P1} = V - U_{P2} \quad \text{EQ. 2.11}$$

A metodologia de casamento das impedâncias destina-se duas situações diferentes que podem ser analisadas:

1) Transmissão de onda de choque em uma região com valor de baixa impedância (A) para outra região com valor de alta impedância (B);

2) Transmissão de onda de choque de uma região com valor de alta impedância (A) para outra região com valor de baixa impedância (B).

Na primeira situação o objeto (A) tem massa específica de valor mais baixo do que o objeto (B). Visto que, a massa específica do objeto e sua velocidade da linha de frente do choque é diretamente proporcional a impedância de choque. A Figura 2.13(a) e (b) exibe o caminho e demonstra a pressão variando em relação das velocidades das partículas nos materiais (A) e (B). A reta de formato pontilhado de Rayleigh, significa uma pressão descontínua, já que ela não pode percorrer a curva Hugoniot de forma contínua. A reta de Rayleigh possui uma inclinação que resulta na multiplicação da massa específica (ρ_0) com a velocidade da superfície de frente de choque (U_s).

Nessa figura o objeto (A) é representado como o projétil e o objeto (B) é representado como o alvo (Figura 2.13(a)). Na interface de interação dos materiais A e B, resulta na alteração de pressão P_1 atingindo-se um equilíbrio. Calcula-se o casamento de impedância por meio da alteração exibido no esquema da Figura 2.13(a). Relata-se que o objeto (A) de impedância com baixo valor adquire menor ângulo em relação ao eixo horizontal, em relação ao objeto (B) de impedância com alto valor.

A curva denominada “AR” referente a intercessão com a curva de Hugoniot inversa do objeto (A), pode determinar os resultados de U_{P_1} e P_1 . No momento que procede o impacto, a pressão da interface é alterada de P_1 para P_2 . Com o resultado das intercessões das regiões do gráfico (U_{P_2} , P_2) é calculado pelo gráfico com a interação da curva Hugoniot do objeto (B) com a Hugoniot inversa do objeto (A). Com isso, a onda é transformada e uma superfície de frente de pressão que propaga de (A) até (B), mostrado na Figura 2.13(b). Gera-se então uma onda compressiva perante a frente da pressão que é retornada e com resultado de $P_2 - P_1$ no interior do objeto (A), Figura 2.13(b). O pulso propaga de forma contínua da direita para a esquerda e sua U_{P_2}

prevalece de mesmo valor na região de alta pressão. Com isso, é assegurado a continuidade de pressão e de velocidade de partícula (MEYERS, 1994).

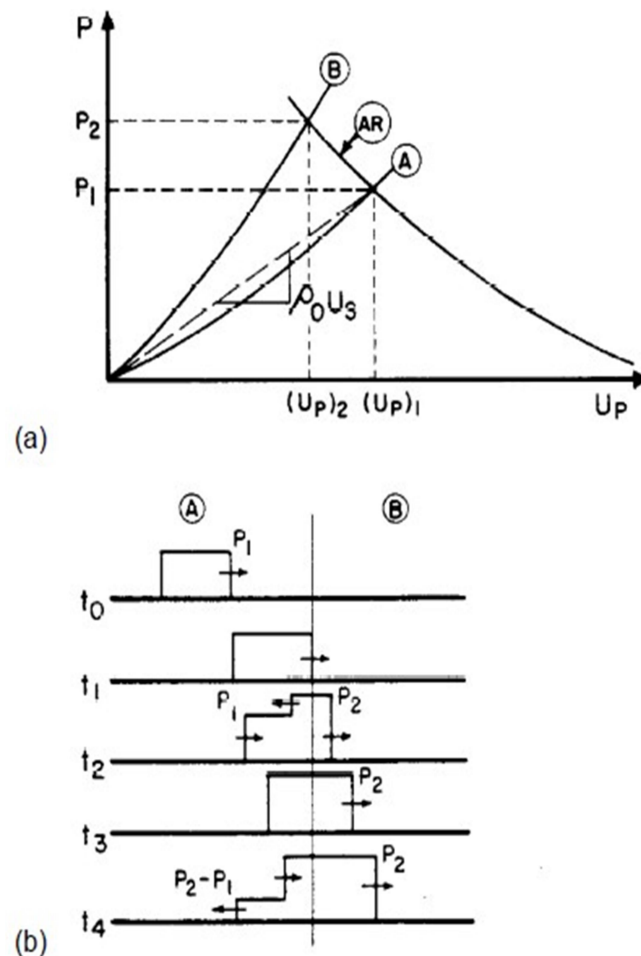


Figura 2.13 Transmissão de onda de choque em uma região com valor de baixa impedância para outra região com valor de alta impedância. a) Gráfico de Pressão vs. Velocidade da partícula; b) Desenvolvimento da pressão nos materiais (A) e (B) ao percorrer do tempo.

Quando se tem um objeto com valor de alta impedância movendo-se para outro objeto com valor de baixa impedância, este evento pode ser exemplificado no esquema de transferência de onda de choque. Na Figura 2.14 ilustra o seguinte método.

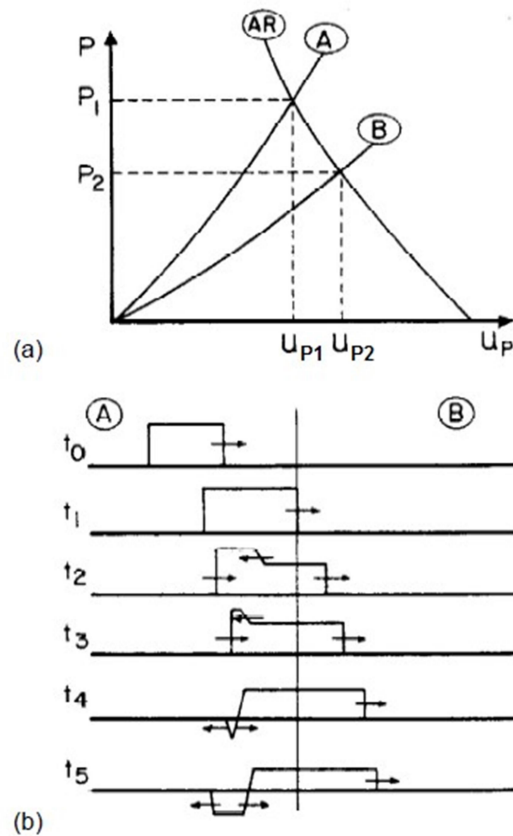


Figura 2.14 Transmissão de onda de choque de uma região com valor de alta impedância para outra região com valor de baixa impedância. a) Gráfico de Pressão vs. Velocidade da partícula; b) Desenvolvimento da pressão nos materiais (A) e (B) ao percorrer do tempo.

A curva "AR" sofre inversão no ponto P_1 , que através da curva de Hugoniot do objeto (A), pode determinar a pressão e da velocidade de partícula dentro do objeto no momento que precede o impacto. A representação da velocidade de partícula e da pressão da superfície (A) e (B) é associado à interseção da curva do objeto (B). Destaca-se que o valor da pressão P_2 possui um valor menor de P_1 . Sendo assim, gera uma propagação no interior do objeto (A) de um pulso de pressão. Considerando que os materiais (A) e (B) são parcialmente infinitos, o pulso irá percorrer com livre caminho até interceptar o pulso inicial. Esse momento é revelado em t_4 . Com isso, um pulso trativo é formado e irá percorrer no objeto (A) tanto para o objeto (B). Se essa onda trativa tiver uma amplitude suficiente alta, o objeto irá se quebrar totalmente. (MEYERS, 1994).

2.7 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

A estatística de Weibull se destaca entre as equações de probabilidade na engenharia. Além disso, ela se adapta para diferentes situações práticas com o uso de um pequeno número de variáveis (ABERNETHY *et al.*, 1983; O'CONNOR & KLEYNER, 2012). A equação de distribuição de Weibull é definida através da EQ. 2.14.

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\theta}\right)^\beta\right] \quad \text{EQ. 2.14}$$

Onde: θ e β são valores da estatística denominados de unidade característica e módulo de Weibull, respectivamente.

Além disso, é gerada a EQ. 2.15 ajustada matematicamente como uma reta aplicando-se o logaritmo.

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(x)}\right)\right] = \beta \ln(x) - [\beta \ln(\theta)] \quad \text{EQ. 2.15}$$

Esta equação se estabelece como uma equação linear e gera o coeficiente angular associado ao termo β e coeficiente linear ao termo $-\beta \ln(\theta)$. Com isso, os dados estatísticos de Weibull são gerados em programas de computador com grande segurança e rapidez. Para isso, utiliza-se na forma de um processo gráfico, no momento que os valores estejam orientados de maneira ascendente (O'CONNOR & KLEYNER, 2012).

Na presente tese, os valores da energia absorvida e profundidade de indentação serão obtidos pela estatística de Weibull.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 Alumina e Nióbia

A cerâmica utilizada será à base de alumina (Al_2O_3), obtida pela indústria nacional Treibacher Scheifmittel. Na Tabela 3.1 é exibida sua composição química fornecida pelo fornecedor.

Tabela 3.1 Composição química da Alumina.

| Elemento | Concentração (%) | Especificação (%) |
|-------------------------|------------------|-------------------|
| Al_2O_3 | 99,4 | Min. 99,1 |
| SiO_2 | 0,04 | Máx. 0,06 |
| Fe_2O_3 | 0,04 | Máx. 0,06 |
| Na_2O | 0,11 | Máx. 0,15 |
| MgO | 0,03 | --- |
| Umidade a 300°C | 0,2 | Máx. 0,5 |
| Outros | 0,18 | --- |

A nióbia (Nb_2O_5), a ser adicionada como aditivo de sinterização da Alumina no processo de sinterização, foi obtida pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM). Na Tabela 3.2 é exibida sua composição química fornecida pelo fornecedor.

Tabela 3.2 Composição química da Nióbia.

| Elemento | Concentração (%) |
|-------------------------|--------------------|
| Nb_2O_5 | 99,5 |
| Perda ao fogo | 0,1 |
| Elemento | Concentração (ppm) |
| Ta | 745 |
| Ti | 240 |
| Fe | 136 |
| Si | 66 |

3.1.2 Ligante

O ligante molecular foi utilizado para conservar as partículas cerâmicas unidas e garantir integridade física para um manuseio dos “corpos verdes”. Com isso, foi utilizado o ligante orgânico Polietileno Glicol (PEG), fornecido pela empresa VETEC.

3.1.3 Fibra e Tecido de Figue

No atual trabalho utilizou-se o figue com as configurações: fibra e tecido; os materiais foram fornecidos diretamente da Colômbia. Na Figura 3.1 são mostradas as configurações das fibras e tecido de figue.

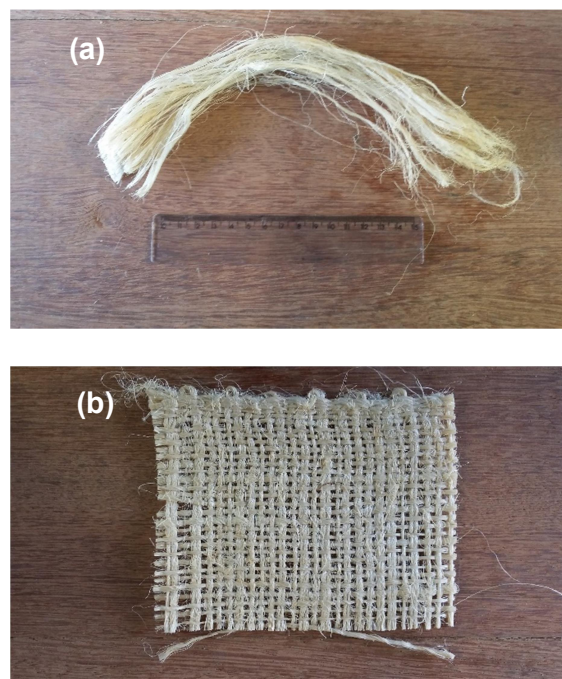


Figura 3.1 Fibras de figue: (a) fibras separadas; (b) tecido com trama simples (entremeadado ortogonal e alternado).

3.1.4 Resina Poliéster

A matriz polimérica utilizada nos compósitos será a resina poliéster Cristal, obtida pelas empresas RESINPOXY e EPOXYFIBER. Atualmente, a primeira empresa encontra-se fechada. Com isso, obteve-se as mesmas resinas com a segunda empresa. A resina é de origem Isoftálica, devendo ser misturada com o endurecedor em uma variação de 3% em peso. Durante a fase líquida é de fácil aplicação e sua cura é realizada rapidamente na temperatura ambiente.

3.1.5 Placa de Alumínio

O material da terceira camada (placas de alumínio 5052 H34) que será usado no ensaio foi fornecido pela empresa METALAK METAIS, com medidas de 120 x 150 x 4.76 mm (Figura 3.2). Os valores de resistência à tração (σ_T), limite de escoamento (σ_e), ductilidade ($\Delta L/L_0$) são exibidos na Tabela 3.3. Esta liga metálica foi escolhida pela sua resistência aceitável e à sua disponibilidade no mercado.



Figura 3.2 Placa de alumínio utilizada como camada interna da blindagem.

Tabela 3.3 Propriedades mecânicas da liga de alumínio utilizada.

| Propriedade | Valor | Especificação |
|--------------------|-------|-------------------|
| σ_T (MPa) | 249 | Min. 235 Max. 285 |
| σ_e (MPa) | 205 | Min. 180 |
| $\Delta L/L_0$ (%) | 10 | Min. 10 |

3.1.6 Tecido de Aramida

O tecido de aramida como um tecido laminado comercial, o Kevlar[®] S745 (fio K29) (Figura 3.3), com densidade 1,44 g/cm³, fabricado pela DuPont foi fornecido pela empresa LFJ Blindagens Com. Serv. S.A. na forma de placas de 8 camadas de tecido revestidas de cloroprene, com espessura aproximada de 5 mm, sendo unidas duas placas para obter a espessura final de 10 mm para compor o SBM de referência.

Figura 3.3 Tecido de aramida Kevlar[®] S745 (fio K29).

3.2 FABRICAÇÃO DAS PASTILHAS CERÂMICAS

3.2.1 Obtenção do Pó

A primeira etapa da fabricação das pastilhas cerâmicas foi a preparação da mistura de pós. Pós de alumina (700g, 94,5%p), de nióbia (29,15g, 3,94%p) e o ligante PEG líquido (11,3g, 1,53%p) foram misturados em um moinho com bolas de alumina, modelo MA 500 (Figura 3.4), por 8 horas. O moinho está disponível no Laboratório de Materiais Cerâmicos do IME.



Figura 3.4 Moinho de bolas MARCONI MA500.

Após a moagem, a mistura foi colocada em estufa para secagem à temperatura de 60°C por 48 horas. Em seguida, o pó foi desaglomerado em almofariz com pistilo, e peneirado em uma peneira com abertura de 0,355 mm.

3.2.2 Prensagem

O pó cerâmico peneirado na quantidade de 100 g foi prensado em uma matriz hexagonal (Figura 3.5), formada por dois punções e uma camisa flutuante. Um par de calços foi utilizado para manter a camisa na posição

correta. Uma carga de 12 toneladas, equivalente a 30 MPa, foi aplicada com o auxílio da prensa hidráulica semiautomática NOWAK (Figura 3.5), presente no laboratório do IME.



Figura 3.5 Matriz utilizada na moldagem dos corpos cerâmicos.



Figura 3.6 Prensa hidráulica semiautomática NOWAK, com capacidade para 30 toneladas.

A pressão selecionada para o presente trabalho foi a que apresentou melhor resultado em trabalho anterior (TRINDADE, 2012). A quantidade de pó foi determinada considerando a retração linear na espessura da peça. Após a sinterização apresentou um mínimo de 10 mm.

3.2.3 Sinterização

As pastilhas cerâmicas “verdes” foram sinterizadas no forno INTI, modelo FE 1700 (Figura 3.7), disponível no Laboratório de Materiais Cerâmicos do IME. A rota de sinterização já foi utilizada por outros autores (TRINDADE *et al.*, 2013; LUZ, 2014), e está detalhada a seguir:

- (1) Aumento de temperatura de 25°C até 158°C, taxa 1°C/min;
- (2) Patamar em 158°C por 1h;
- (3) Aumento de temperatura de 158°C até 375°C, taxa 1°C/min;
- (4) Aumento de temperatura de 375°C até 1000°C, taxa 8°C/min;
- (5) Aumento de temperatura de 1000°C até 1400°C, taxa 5°C/min;
- (6) Patamar de sinterização a 1400°C por 3h, e resfriamento no forno.

As três primeiras etapas dessa rota são responsáveis pela eliminação do ligante orgânico, e, sendo assim, a composição do material passa a ser 96% de alumina e 4% de nióbia.



Figura 3.7 Forno INTI FE 1700, utilizado na sinterização das pastilhas cerâmicas.

As placas cerâmicas produzidas neste processo, utilizando matérias primas de fornecedores semelhantes, já tiveram suas propriedades físicas

caracterizadas por diferentes autores (CHAGAS, 2014; GOMES, 2004; SILVA, 2014; TRINDADE, 2012). Elas apresentam densificação média de 88,1% na sinterização, e densidade média do sinterizado de 3,53 g/cm³. Luz, 2014, avaliou a retração linear destas peças e obteve o valor 12,6 ± 1,4%. Neste trabalho foi medida através do cálculo da razão massa/volume a massa específica dos corpos cerâmicos sinterizados (EQ. 3.1). Foi também determinada a densificação (EQ. 3.2) da massa específica teórica da mistura (Al₂O₃ + Nb₂O₅) obtida em termos percentuais. Foi calculada a massa específica teórica pela regra das misturas a qual é considerado a fração de todo componente da mistura, resultando em 4,01 g/cm³ (LUZ, 2014)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{EQ. 3.1}$$

$$\text{Densificação} = \left(\frac{\rho_{\text{sinterizado}}}{\rho} \right) \cdot 100\% \quad \text{EQ. 3.2}$$

Sendo:

ρ : massa específica teórica;

ρ sinterizado: massa específica do corpo cerâmico sinterizado;

m: massa da amostra (g);

V: volume da amostra (cm³).

Considerando a maior espessura do corpo cerâmico de maior relevância, o cálculo de retração linear (R_L) foi feito conforme a EQ. 3.3.

$$R_L = \frac{e_{\text{verde}} - e_{\text{sinterizado}}}{e_{\text{verde}}} \cdot 100\% \quad \text{EQ. 3.3}$$

Sendo:

e_{verde} : espessura do corpo verde;

$e_{\text{sinterizado}}$: espessura da amostra sinterizada.

3.3 FABRICAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Os compósitos reforçados com fibras e tecido de fique foram preparados nas proporções de 10, 20 e 30% em volume. Utilizou-se 36 corpos de prova, sendo 18 com o compósito reforçado com fibra de fique e 18 com o compósito reforçado com tecido de fique. A matriz utilizada para a prensagem das placas do compósito está apresentada na Figura 3.8. As dimensões internas dessa matriz são de 12 x 15 x 1,19cm com o volume final para a placa confeccionada será de 214,20 cm³. Como o volume de fibras em cada placa varia de 10 a 30%, então, o volume ocupado pelas fibras é de 9,91, 19,83 e 29,74 cm³. De acordo com a literatura (ALTOÉ, 2016), a densidade utilizada para a fibra de fique foi de 0,69 g/cm³, logo, a quantidade de massa de fibra utilizada foi em torno de 14,58 g para 10%, 29,16 g para 20% e 43,74 g para 30% em volume. Para a resina poliéster, a densidade utilizada foi de 1,10 g/cm³ (SILVA, 2014) e considerando a perda de resina na etapa de prensagem dos corpos de prova, então foi utilizado uma massa de resina de 235 g.



Figura 3.8 Matriz metálica utilizada na confecção das placas de compósito poliéster-fibra.

Para preparo da placa do compósito seguiu-se as seguintes etapas:

- i) Cortar as fibras nas dimensões da matriz, gerando várias camadas de fibras.
- ii) Envolver a matriz metálica com filme PVC e aplicar uma camada de graxa de silicone em toda a sua superfície de forma a evitar que a placa grudasse na matriz e facilitasse sua retirada.

- iii) Acondicionar os componentes no interior da matriz e, após, submeteu a pressão de 5 toneladas (prensa SKAY), sendo deixado para curar à temperatura ambiente por um período de 5 horas.
- iv) Extração da placa da matriz e obtenção das placas.

3.4 COLAGEM DAS CAMADAS

O preparativo dos corpos de prova multicamada foi realizada através da colagem das camadas de alumínio (e de aramida), de compósito e da cerâmica, utilizando cola de cura rápida ULTRAFLEX, que não interfere nos testes. A Figura 3.9 mostra o esquema de montagem de uma blindagem multicamada e o corpo de prova final obtido.

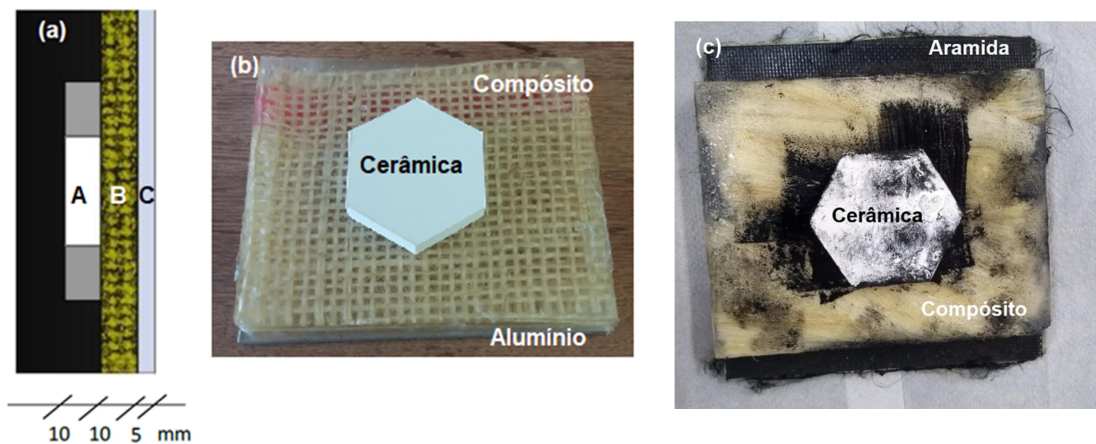


Figura 3.9 Blindagem multicamada: (a) Diagrama esquemático: A é a camada cerâmica, B é o compósito, poliéster ou aramida e C é o alumínio; (b) corpo de prova final utilizado nos ensaios balísticos; (c) corpo de prova final com terceira camada de aramida.

3.5 ENSAIO BALÍSTICO

O teste balístico teve por objetivo verificar a capacidade de um material ou equipamento absorver a energia cinética de um projétil de alta velocidade. No atual trabalho foi avaliado tanto as blindagens multicamada (Figura 3.8) como os materiais da segunda camada individualmente (seção 2.4). Para isto, foram realizados ensaios para a avaliação do nível da proteção balística alcançada pela blindagem multicamada, por medida da deformação provocada no material de referência pelo disparo (ensaio de deformação na plastilina), e ensaios para avaliar a perda de energia do projétil no impacto com o material da segunda camada (ensaio de velocidade residual).

5.5.1 Deformação na Plastilina

No ensaio de deformação na plastilina, a blindagem multicamada foi posicionada em frente a um bloco de plastilina (CORFIX[®]) com 50 mm de espessura e densidade de 1.7 g/cm³. Após o impacto balístico, foi medida a deformação (indentação) deixada pela blindagem na plastilina, como mencionado na seção 2.1. As condições gerais dos ensaios foram:

i) Munição: calibre 7,62 x 51 mm M1, conforme foi fornecida comercialmente ao Exército e disponibilizado para os ensaios balísticos no CAEx. O projétil tem uma massa de 9,7 g (Figura 3.10);



Figura 3.10 Munição calibre 7,62 mm x 51 mm M1.

ii) Distância do alvo (definida como a distância da boca da arma até o ponto de contato com o material a ser atingido): 15 metros, conforme prevê a norma ABNT NBR 15000 para as munições 7,62 mm;

iii) Ângulo de incidência no alvo: 90°;

iv) Números de disparos para cada grupo de blindagem: 6 (seis) disparos, para que a estatística de Weibull possa ser aplicada. Os grupos se diferenciam pelo material da segunda camada, como mostrado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Tipo e designação dos corpos de prova para os ensaios balísticos.

| Tipo de segunda camada (vol. de fique) | Designação | Número de amostras |
|---|-------------------|---------------------------|
| 10% de fibra | F10 | 6 |
| 20% de fibra | F20 | 6 |
| 30% de fibra | F30 | 6 |
| 10% de tecido | T10 | 6 |
| 20% de tecido | T20 | 6 |
| 30% de tecido | T30 | 6 |

v) Local: Centro de Avaliações do Exército (CAEx), linha de tiro IV, destinada aos testes que empregam armas e munições até o calibre .50". Para estes ensaios foi utilizado um provete calibre 7,62 mm (Figura 3.10a), um dispositivo de fixação do alvo (Figura 3.10b) e um radar doppler WEIBEL SL-520P (Figura 3.10c), para avaliação da velocidade do projétil. Uma exemplificação do sistema é exibida na Figura 3.10d.

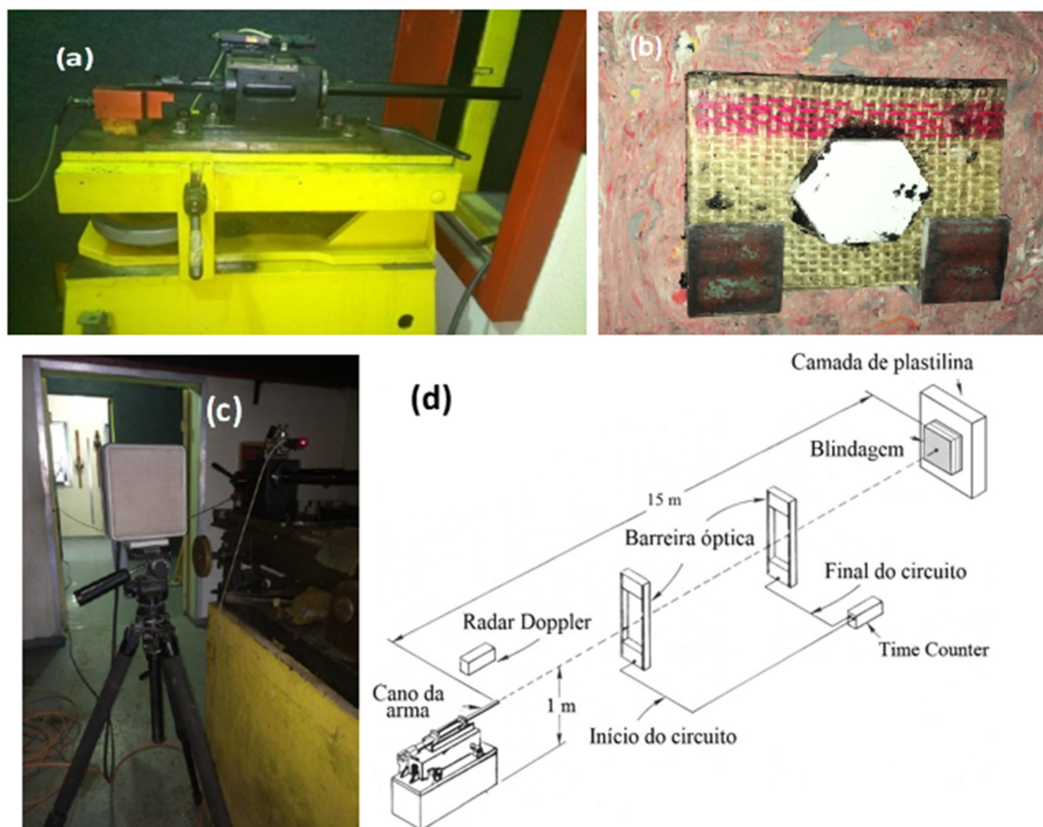


Figura 3.11 Equipamento utilizado no ensaio balístico: (a) Provette calibre 7,62 mm com mira à laser; (b) Alvo posicionado na plastilina; (c) Radar doppler; (d) Esquema ilustrando o sistema com barreira óptica modelo B471 da HPI

O critério adotado neste trabalho para a caracterização da eficiência balística foi a medida da maior profundidade da deformação na massa de plastilina após o impacto. É considerada eficiente se o valor for igual ou inferior a 44 mm, conforme prevê a Norma NIJ 0101.04.

3.5.2 Velocidade Residual

No ensaio de velocidade residual, os materiais formadores da segunda camada foram fixados em um suporte (Figura 3.11), e com o auxílio do radar doppler, foi medida a velocidade do projétil antes e após o impacto. Foram testadas 4 amostras para cada condição. Com os dados fornecidos pelo doppler, foi possível calcular a energia do projétil e estimar a VL pelas EQ. 2.1 e 2.2. As condições gerais para este ensaio são as mesmas que no ensaio de deformação na plastilina.

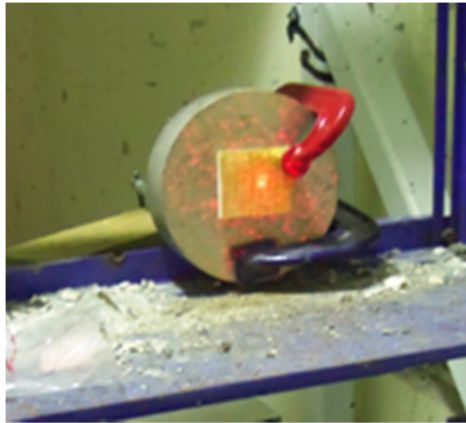


Figura 3.12 Dispositivo de fixação das placas no ensaio de velocidade residual, utilizado para fixar um compósito reforçado com tecido de fique.

3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Foi realizada uma análise fractográfica, através de um MEV das partículas oriundas dos ensaios balísticos. O objetivo consiste em buscar os mecanismos de falha presentes no processo. O equipamento foi o microscópio FEI Quanta FEG 250 (Figura 3.14), utilizando elétrons secundários.



Figura 3.13 MEV FEI Quanta FEG 250.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIO BALÍSTICO SOBRE A PLASTILINA

4.1.1 Desempenho Balístico da Primeira Camada: Pastilha Cerâmica

Nos ensaios balísticos realizados neste trabalho, o material cerâmico (primeira camada) resultou em uma fratura completa. O material cerâmico absorve cerca de 55,1% da energia resultante oriunda do projétil (SILVA, 2014). Seu estado final do SBM após o impacto pode ser visualizado na Figura 4.1.



Figura 4.1 SBM após o disparo da munição de calibre 7,62 x 51 mm.

Com a intenção de investigar a confiabilidade da fabricação e do método utilizado para fabricar as pastilhas cerâmicas, são exibidos na Tabela 4.1 a propriedade de densidade, densificação e retração linear. Totalizando, foram fabricadas 36 pastilhas. Nota-se que os resultados gerados estão semelhantes aos encontrados na literatura (LUZ, 2014; ARAÚJO, 2015; CRUZ, 2015). Os valores foram de 87,65% de densificação, 3,46 g/cm³ de densidade e 12,59% de retração linear. Constata-se que a fabricação das pastilhas cerâmicas foi obtida com sucesso.

Tabela 4.1 Propriedades das cerâmicas sinterizadas.

| Densidade (g/cm ³) | Espessura (mm) | Retração Linear (%) | Densificação (%) |
|--------------------------------|----------------|---------------------|------------------|
| 3,44 ± 0,05 | 10,75 ± 0,03 | 16,32 ± 0,14 | 83,55 ± 2,01 |

Como exibido na Figura 4.2, o mecanismo de fratura presente do material cerâmico foi de caráter intergranular (LUZ ,2014; ARAÚJO, 2015; CRUZ, 2015). Isso é explicado pela adição de 4% de nióbia. O óxido de nióbio pode reagir com o óxido de alumínio formando precipitados ($AlNbO_4$) nos contornos de grão da alumina, fazendo que eles fiquem fragilizados. Com isso, o mecanismo de fratura é alterado de transgranular para intergranular (CRUZ, 2015). Esse modo de fratura intensifica a absorção de energia de impacto.

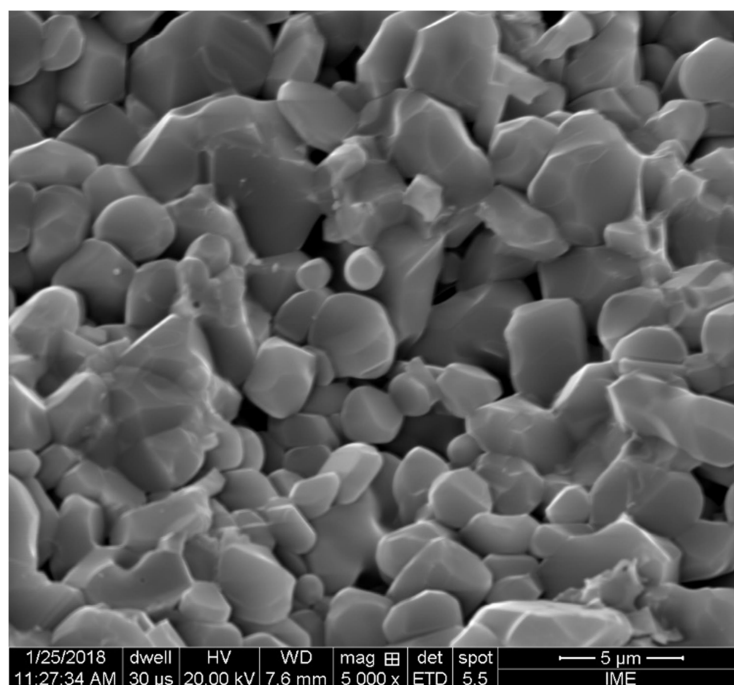


Figura 4.2 Imagem microscópica da cerâmica fraturada em 5000X.

4.1.2 Desempenho Balístico da Segunda Camada: Compósito Poliéster-Fique

O teste balístico foi estabelecido conforme a norma NIJ 0101.04 (2000) para SBM. As fibras de fique estudadas como segunda camada do SBM foram utilizadas nas seguintes condições: fibra e tecido, como exibido na Figura 4.3.

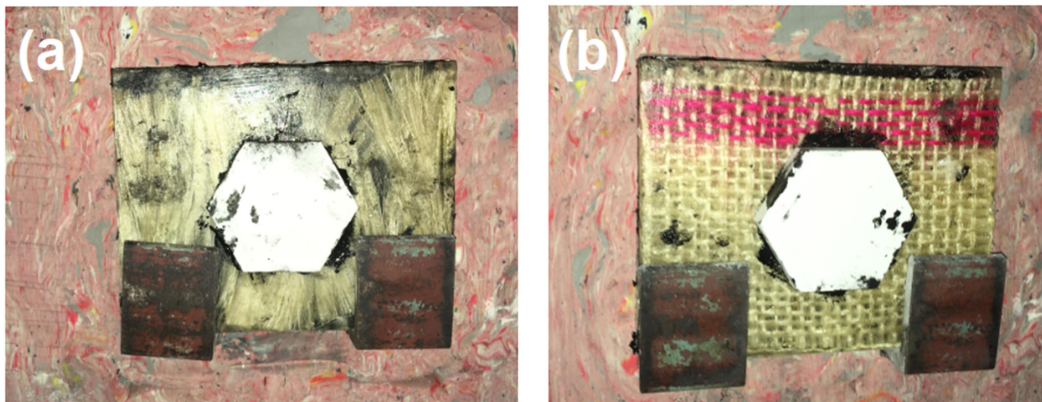


Figura 4.3 Blindagem multicamada utilizando como segunda camada compósito poliéster-fique: (a) fibra e (b) tecido.

Nas Figura 4.4 e 4.5 são exibidos os SBM com compósito poliéster reforçado com 10, 20 e 30% de fibras e tecido de fique após o impacto.

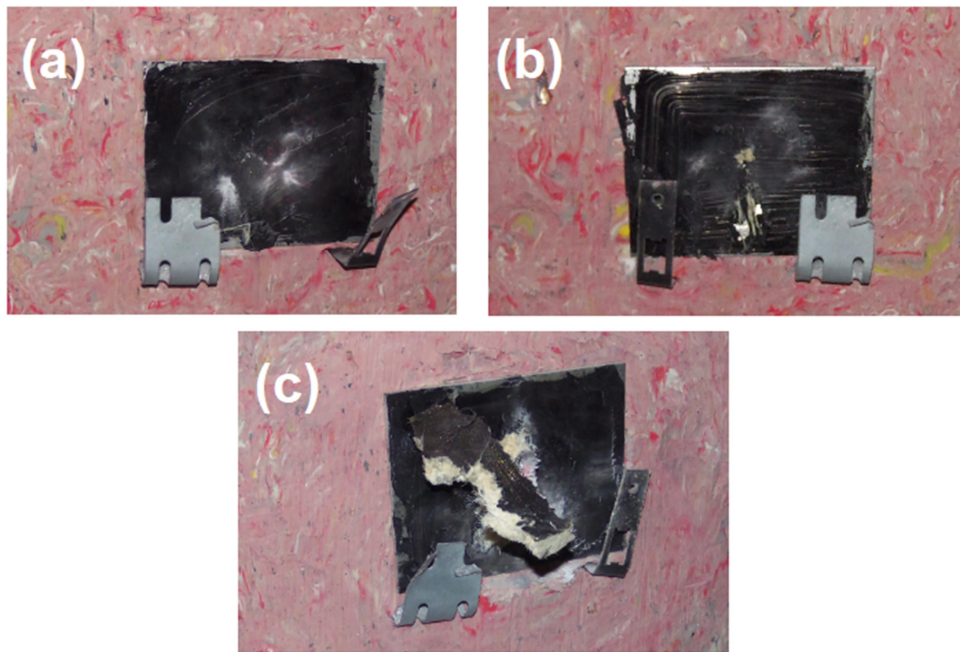


Figura 4.4 Blindagem multicamadas com compósito reforçado com fibras de fique com 10%(a), 20%(b) e com 30%(c).

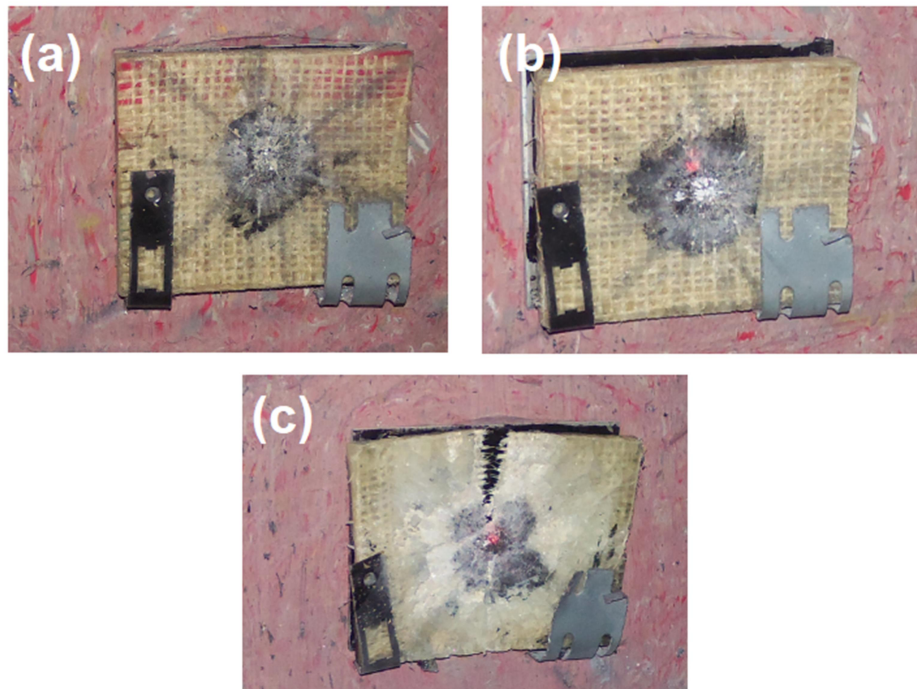


Figura 4.5 Blindagem multicamadas com compósito reforçado com tecido de fique com 10%(a), 20%(b) e com 30%(c).

Os SBM com compósito de poliéster reforçado com de fibras de fique, não sofreu a perfuração do projétil, ou seja, o SBM absorveu a energia cinética do

projétil. Em todas as situações, a camada cerâmica ficou totalmente destruída. Já nos compósitos de fibra de fique, apenas naqueles com 30% ocorreu a permanência de alguns fragmentos da cerâmica. Isso quer dizer que ocorreu uma fragmentação dos compósitos quando reforçados com fibras de fique, para todos os percentuais testados.

Em se tratando dos mecanismos dissipadores de energia, MORYE et al. (2000) dizem que a fratura das fibras influencia sobremaneira na balística. Além disso, outro importante mecanismo presente no compósito com 30% de fibra como de tecido de fique foi a delaminação de camadas, que favorece também a absorção da energia de impacto.

O ensaio de indentação na plastilina (Figura 4.6) é exibido na Tabela 4.2 que demonstra os resultados gerados para a indentação nas diversas configurações de blindagens ensaiadas.



Figura 4.6 Medição da profundidade de indentação causada na plastilina após o ensaio balístico.

Tabela 4.2 Resultados médios obtidos nos ensaios balísticos.

| Segunda camada | Indentação média (mm) | Velocidade de Impacto Média (m/s) | Energia de Impacto Média (kJ) |
|----------------|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| F10 | 17,15 | 835,18 | 3,38 |
| F20 | 16,64 | 846,86 | 3,48 |
| F30 | 16,99 | 849,84 | 3,50 |
| T10 | 16,60 | 835,48 | 3,39 |
| T20 | 17,49 | 843,86 | 3,45 |
| T30 | 19,89 | 842,95 | 3,45 |

Nos SBMs demonstrados na Tabela 4.2 estão de acordo com a norma NIJ 0101.04 (2000). Com isso, eles adquiriram um valor de indentação que não ultrapassou 44 mm. Observa-se que durante a execução do disparo do projétil apresentou uma distribuição irregular de sua velocidade, ocasionando uma variação da energia absorvida pelo SBM. Na Tabela 4.3 são exibidos os parâmetros de Weibull e na Figura 4.7 são mostrados os gráficos de Weibull.

Tabela 4.3 Parâmetros de Weibull obtidos das indentações das blindagens multicamadas.

| Blindagem Multicamada | Módulo de Weibull (β) | Indentação característica (θ) | Coefficiente de correlação (R^2) | Indentação média (mm) | Desvio padrão (mm) |
|-----------------------|-------------------------------|--|--------------------------------------|-----------------------|--------------------|
| F10 | 6,66 | 18,31 | 0,89 | 17,08 | 3,00 |
| F20 | 19,72 | 17,05 | 0,82 | 16,59 | 1,04 |
| F30 | 17,23 | 17,46 | 0,99 | 16,93 | 1,21 |
| T10 | 13,61 | 17,18 | 0,98 | 16,54 | 1,48 |
| T20 | 5,26 | 18,99 | 0,83 | 17,49 | 3,82 |
| T30 | 9,84 | 20,84 | 0,86 | 19,81 | 2,42 |

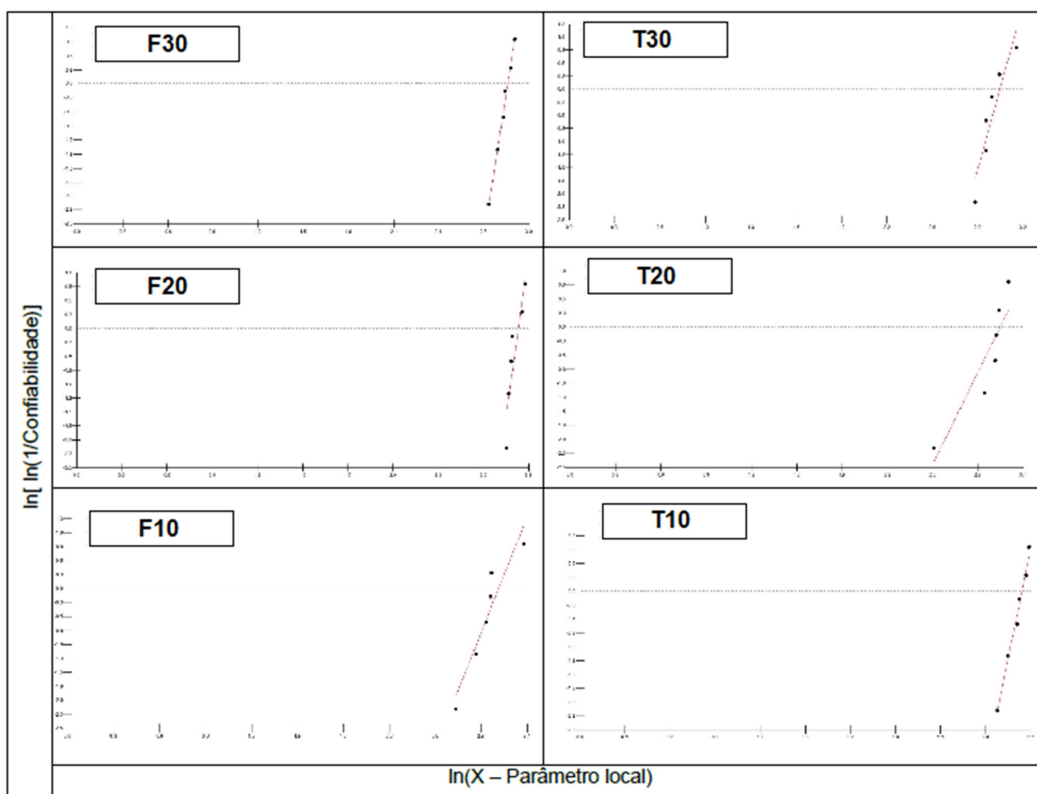


Figura 4.7 Gráficos de distribuição de Weibull para o SBM contendo como segunda camada o compósito de fibra de fique.

Tendo em vista os resultados de Weibull na Tabela 4.3, na configuração de fibras alinhadas de fique, a indentação média de profundidade não evidencia resultados diferentes significativos. Os compósitos reforçados com 10%vol. de tecido de fique exibiu valores menores de indentação em relação com 20 e 30%vol. de tecido de fique. Perante o compósito reforçado com tecido de fique, elevando-se a quantidade de tecido, os resultados de indentação tornam-se superiores.

Os coeficientes de correlação (R^2) revelaram um resultado por volta de 0,9 em todos os SBM. Os compósitos apresentam um resultado significativo no desvio padrão da indentação média. Uma explicação para este caso está relacionado à forma heterogênea das fibras naturais lignocelulósicas, destacando a fibra de fique que apresenta irregularidades perante suas propriedades mecânicas (SATYANARAYANA et al., 2007; MONTEIRO et al., 2011).

O SBM com 20%vol. de fibras alinhadas de fique exibiu superior homogeneidade quando comparado com resultados obtidos na literatura. Com isso, seu módulo de Weibull (β) apresenta um valor elevado (19,72). Sabendo que, para maiores valores deste parâmetro, sua dispersão será menor em relação aos resultados de indentação, tornando assim, mais confiáveis estes resultados.

Nas Figura 4.8 e Figura 4.9 são exibidas as figuras de profundidade de indentação característica (θ). Para ambas as configurações, esse é o parâmetro que se destaca na representatividade dos materiais analisados em função das variações volumétricas.

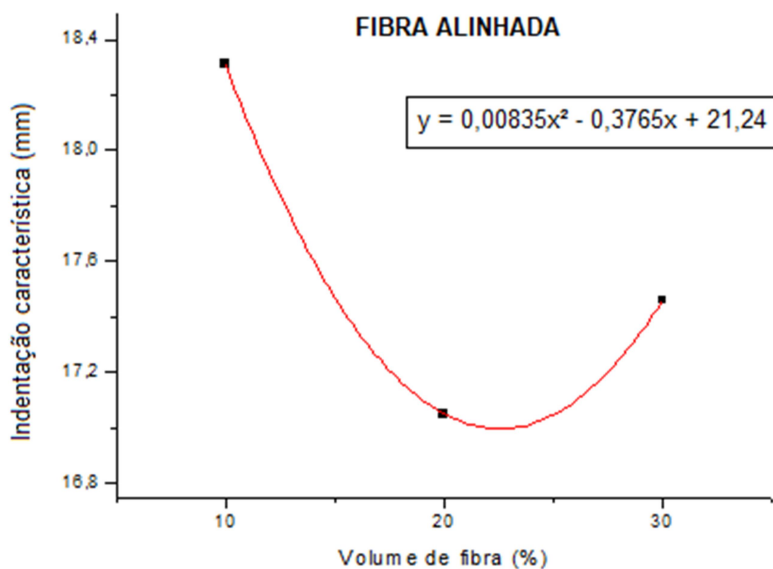


Figura 4.8 Variação da indentação característica em função da fração volumétrica de fibra de fique na configuração de fibra alinhada.

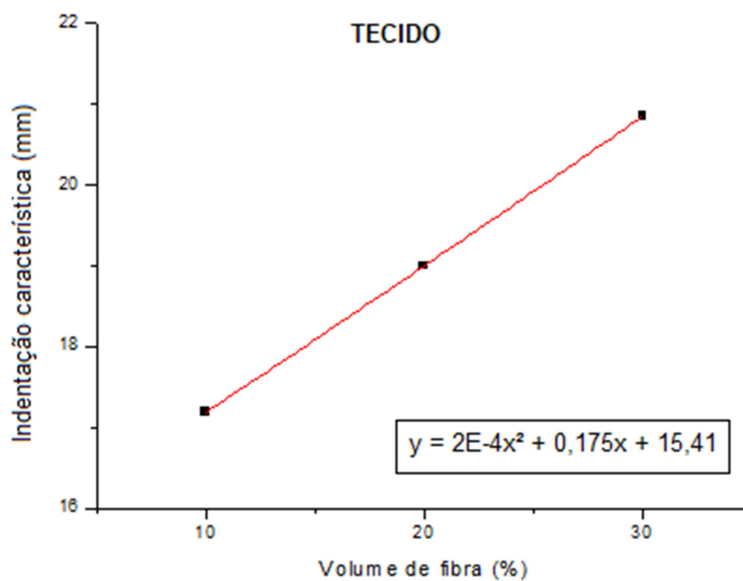


Figura 4.9 Variação da indentação característica em função da fração volumétrica de fibra de fique na configuração de tecido.

Na distribuição de fibra alinhada (Figura 4.8), valores menores de indentação característica ficam no intervalo de 20 e 30%. Com o distanciamento do valor de 20%, esse valor aumenta. Para valores superiores a 30%, a fabricação dos compósitos tem maior complexibilidade, ainda mais no que se refere a impregnar com resina as fibras. Na distribuição com tecido de fique (Figura 4.9) observa-se um resultado de indentação característica de caráter praticamente linear quando se eleva a quantidade de fique. Na medida que aumenta a porcentagem, os resultados da profundidade de indentação vão se elevando. Em outras palavras, na elaboração de compósitos com tecido, aumentando quantidade no seu compósito, interfere negativamente na indentação balística.

De acordo com a literatura (SILVA, 2014; LUZ, 2014; ARAÚJO, 2015; CRUZ, 2015), as blindagens oriundas de uma segunda camada com compósito polimérico reforçado com fibras naturais, que utilizaram 30% vol., são exibidos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Médias dos resultados obtidos nos ensaios balísticos.

| Camada intermediária | Indentação média (mm) | Velocidade de impacto média (m/s) | Energia de impacto média (kJ) | Referência |
|-----------------------------|------------------------------|--|--------------------------------------|-------------------|
| Poliéster - fique (fibra) | 17,04 | 843,96 | 3,45 | Presente Trabalho |
| Poliéster - fique (tecido) | 17,99 | 840,76 | 3,43 | Presente Trabalho |
| Poliéster - juta (manta) | 25,67 | 851,31 | 3,52 | ASSIS, 2016 |
| Poliéster - juta (tecido) | 17,80 | 853,08 | 3,53 | ASSIS, 2016 |
| Epóxi - bambu (fibra) | 17,58 | 825,01 | 3,30 | CRUZ, 2015 |
| Epóxi - bambu (plaquetas) | 18,68 | 827,7 | 3,32 | CRUZ, 2015 |
| Epóxi - sisal (fibra) | 18,17 | 822,21 | 3,28 | ARAÚJO, 2015 |
| Epóxi - sisal (tecido) | 16,03 | 827,95 | 3,32 | ARAÚJO, 2015 |
| Aramida | 22,67 | 835,72 | 3,39 | LUZ, 2014 |

Nessa tabela, os materiais apresentaram resultados satisfatórios e próximos em termos de indentação média, variando entre eles suas configurações de confecção. Para os compósitos distintos da configuração tecido ou fibra alinhada, como no caso de manta e plaquetas, os resultados não foram satisfatórios em relação aos demais.

Os compósitos de poliéster de fique, em todos os casos investigados, tiveram resultados de desempenho balístico superior em comparação com o tecido laminado de aramida. Uma explicação para esse caso é a fragilidade da matriz de poliéster e uma significativa distribuição de tensão das diversas frentes de trincamento de delaminação que as fibras de fique proporcionam.

4.1.3 Desempenho Balístico na Configuração como inserto

Luz (2018) ressalta que os coletes de nível III-A podem ser transformados para nível III através da colocação de insertos (placas balísticas) na parte

frontal. Com isso, foram realizados testes preliminares para a utilização dos compósitos de fibra e tecido de fique. Para isso, foi simulada a composição de uma blindagem de proteção pessoal colocando 12 camadas de tecido Kevlar[®] S745 na parte superior do SBM constituído apenas de cerâmica e compósito. Foram confeccionados 3 insertos de cada configuração, 20%vol de fibra e tecido de fique na matriz de poliéster (Figura 3.9c). Por fim, foram realizados os testes balísticos na plastilina.

Os resultados da configuração do SBM utilizando a terceira camada de aramida, substituindo assim a placa de alumínio, são demonstrados a seguir. Na Tabela 4.5 foram obtidos os resultados de indentação média para cada configuração. Os resultados demonstram que a placa de alumínio obteve melhores resultados de indentação. Isso é retificado que a densidade do alumínio e de 2,7 g/cm³ em relação a densidade da aramida que é 1,4 g/cm³.

Tabela 4.5 Resultados médios de indentação utilizando aramida e alumínio.

| Terceira Camada | Segunda camada (20% vol.) | Indentação média (mm) | Velocidade de Impacto Média (m/s) | Energia de Impacto Média (kJ) |
|-----------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Aramida | FIBRA | 19,9 ± 1,15 | 843,56 | 3,44 |
| | TECIDO | 20,2 ± 2,03 | 844,87 | 3,46 |
| Alumínio | FIBRA | 16,64 ± 1,04 | 846,86 | 3,48 |
| | TECIDO | 17,49 ± 3,82 | 843,86 | 3,45 |

Nenhuma das condições do SBM sofrem total penetração, como pode ser visto na Figura 4.10. Além disso, seus resultados de indentação ficaram com valores abaixo de 44 mm. A segunda camada do compósito de fibras alinhadas sofreu delaminação. O mesmo não ocorreu na configuração de tecido. A delaminação na configuração de fibras alinhadas ocorreu em ambas as configurações de aramida e alumínio.

Na Figura 4.10, após o impacto balístico na configuração com tecido de aramida, observa-se que a camada foi perfurada quando comparada com aquela utilizando alumínio. Isso também justifica os maiores resultados de indentação quando foi utilizado o tecido de aramida.

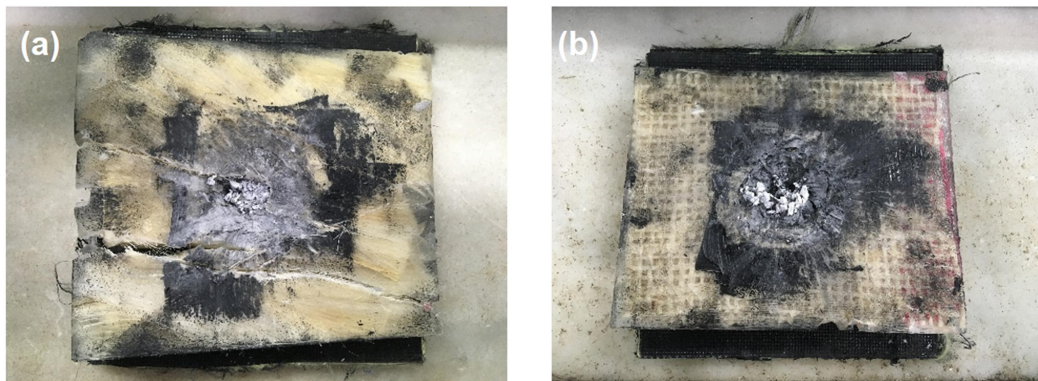


Figura 4.10 Blindagem multicamada com terceira camada de aramida com fibra de fique (a) e com tecido de fique (b).

4.2 ENSAIO DE VELOCIDADE RESIDUAL

Este ensaio foi realizado para obter apenas a velocidade limite dos materiais, composto de poliéster reforçado com fibras alinhadas e tecido de fique (Figura 4.11) variando suas frações volumétricas (10, 20 e 30%). Para isso, o ensaio de velocidade residual é capaz de mensurar a energia absorvida (E_{abs}) e a VL de matérias compostas.

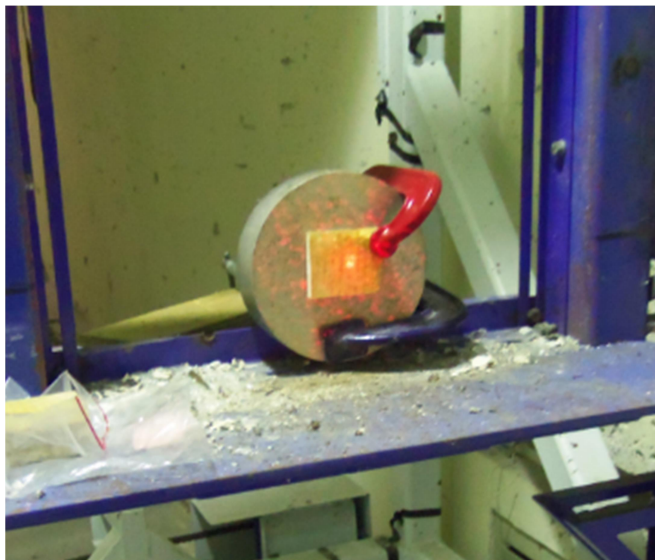


Figura 4.11 Ensaio de velocidade residual nos compostos poliéster-fique.

Na Figura 4.12 é exemplificado um dos valores significativos gerados pelo espectro de radar Doppler de um compósito poliéster-fique e sua curva polinomial ajustado contínua. Nota-se que logo abaixo de 810 m/s ocorre um decaimento abrupto de velocidade que sugere o instante de impacto no material. Pode-se definir essa velocidade (V_L) com a velocidade de impacto (V_i) e a velocidade mínima atingida nessa queda chamada de velocidade residual (V_r). Gráficos com característica semelhante à da Figura 4.12 foram gerados para o compósito poliéster com fibra e tecido de fique. Em relação aos resultados gerados dos gráficos pode-se obter a V_L para os compósitos poliéster-fique (Tabela 4.6). Nesta tabela também são exibidos os valores de outros materiais (SILVA, 2014; LUZ, 2014; ARAÚJO, 2015; CRUZ, 2015; BRAGA, 2015) para comparação.

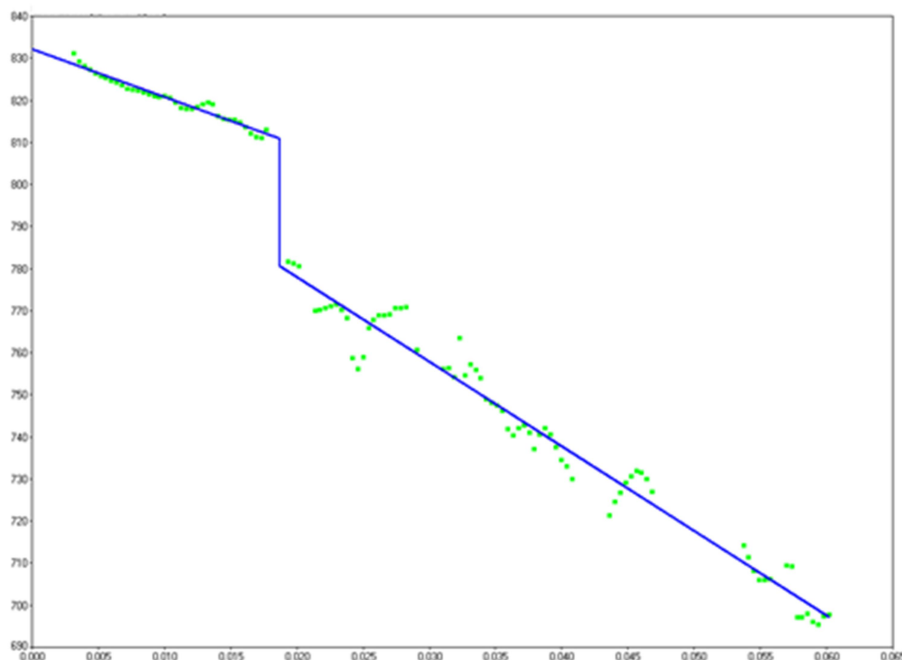


Figura 4.12 Gráfico de valores testados do ensaio de velocidade residual do compósito poliéster-fique.

Tabela 4.6 Resultados das velocidades médias de impacto e residual, energia absorvida e V_L para cada componente do SBM

| Materiais | V_i (m/s) | V_r (m/s) | E_{abs} (J) | % E_{abs} | V_L (m/s) | Referência |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| **PF - 10% (fibra) | 820 | 794 | 151 | 4 | 205 | *PT |
| **PF - 10% (tecido) | 817 | 790 | 156 | 4 | 208 | *PT |
| **PF - 20% (fibra) | 817 | 790 | 156 | 5 | 208 | *PT |
| **PF - 20% (tecido) | 794 | 763 | 174 | 6 | 220 | *PT |
| **PF - 30% (fibra) | 814 | 795 | 110 | 4 | 175 | *PT |
| **PF - 30% (tecido) | 806 | 790 | 92 | 4 | 160 | *PT |
| Poliéster - juta - 30% (manta) | 844 | 810 | 244 | 7 | 227 | ASSIS, 2016 |
| Poliéster - juta - 30% (tecido) | 839 | 812 | 189 | 5 | 200 | ASSIS, 2016 |
| Epóxi - bambu - 30% (fibra) | 844 | 821 | 190 | 6 | 198 | CRUZ, 2015 |
| Epóxi - sisal - 30% (fibra) | 845 | 823 | 171 | 5 | 188 | ARAÚJO, 2015 |
| Epóxi - sisal - 30% (tecido) | 844 | 817 | 221 | 6 | 213 | ARAÚJO, 2015 |
| Alumínio 5052 H34 | 860 | 832 | 234 | 6 | 228 | BRAGA, 2015 |
| Tecido de aramida | 848 | 835 | 221 | 6 | 212 | BRAGA, 2015 |
| Alumina | 847 | 566 | 1920 | 55 | 629 | SILVA, 2014 |

*PT: Presente trabalho. **PF: Poliéster-fique

Em relação aos resultados na Tabela 4.6, destaca-se que o material que dissipou maior energia cinética oriunda do projétil foi a cerâmica (alumina), girando na casa de 55,1%, por causa da sua elevada resistência a compressão (SILVA, 2014). Com espessura de 10 mm, aplicando-se de forma individual cada material, demonstrou que nenhum material foi aceitável contra munição de nível III.

Os valores da V_L , perante os compósitos de matrizes de poliéster e epóxi, obtiveram resultados comparáveis aos da liga de alumínio 5052 H34 (228 m/s) e do tecido de aramida (212 m/s). Estes resultados são explicados nos compósitos pelo mecanismo de fratura frágil de matriz poliéster dissipando maiores quantidades de energia cinética do projétil, bem como gerando delaminação entre camadas e ruptura das fibras (MORYE et al., 2000; LUZ, 2014).

O desempenho balístico foi semelhante quando se compara os compósitos reforçados com tecido em relação aos compósitos de fibras contínuas e alinhadas. Aplicadas como segunda camada nos SBMs, as fibras no tecido proporcionam uma distribuição de tensões, oriundas dos fragmentos cerâmicos, em diversas trincas que causam delaminação (HOSUR et al, 2004).

O método de análise de Weibull foi utilizado no ensaio de velocidade residual com a intenção de investigar as V_L s dos compósitos. Na Tabela 4.7 são exibidos os parâmetros de Weibull.

Tabela 4.7 Parâmetros de Weibull gerados das velocidades limite dos compósitos poliéster-fique.

| Segunda camada | Módulo de Weibull (β) | V_L Característica (θ) | Coefficiente de correlação (R^2) | V_L Média (m/s) | Desvio padrão (m/s) |
|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------------|---------------------|
| F10 | 10,13 | 212,5 | 0,98 | 202,3 | 24,04 |
| F20 | 14,68 | 209,5 | 0,90 | 206,7 | 6,37 |
| F30 | 3,37 | 226,4 | 0,89 | 203,3 | 16,5 |
| T10 | 7,85 | 229,4 | 0,85 | 215,8 | 22,58 |
| T20 | 16,24 | 176,4 | 0,91 | 171 | 12,96 |
| T30 | 4,75 | 170,7 | 0,97 | 156,3 | 17,52 |

De acordo com a Tabela 4.7, o coeficiente de correlação demonstrou valores aproximados a 0,9 nos casos investigados. Em relação ao módulo de Weibull (β), foram elevados os valores. Sabendo que, valores altos desse módulo, resulta em uma diminuição da variação dos valores de V_L .

No que se refere à velocidade de limite característica (θ), os compósitos de poliéster-fique na configuração fibra alinhada exibiram valores significativos comparando com os da configuração tecido. Logo, a energia do impacto referente ao projétil dissipou maiores valores para o caso de fibra alinhada em relação do tecido de fique.

4.3 INTERAÇÃO DAS ONDAS DE CHOQUE NAS BLINDAGENS MULTICAMADA

Na investigação da interação de choque no SBM foi utilizada a metodologia de casamento de impedância e as equações de conservação de *Rankine-Hugoniot* (EQ 2.7 e EQ 2.8). Calculou-se a impedância de choque, bem como as velocidades de partículas e pressão na interface para todas as configurações. Os parâmetros específicos para o compósito poliéster-fique não foram encontrados na literatura. Com isso, utilizou-se a velocidade da onda elástica (C_0), estabelecida na EQ. 2.3, em vez da velocidade de onda de choque (U_s). Utilizou-se também a equação da regra das misturas, podendo assim calcular o módulo de elasticidade (EQ 4.1) e a densidade (EQ 4.2) do compósito poliéster-fique. Para o material cerâmico, utilizou-se a velocidade da onda elástica em vez da velocidade da onda de choque (SILVA, 2014).

$$E_{cp} = E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f \quad \text{EQ. 4.1}$$

Onde:

E_{cp} → Módulo de elasticidade do compósito;

E_m → Módulo de elasticidade da matriz;

E_f → Módulo de elasticidade da fibra;

V_m → Fração volumétrica da matriz;

V_f → Fração volumétrica da fibra.

$$\rho_{cp} = \rho_m \cdot V_m + \rho_f \cdot V_f \quad \text{EQ. 4.2}$$

Onde:

ρ_{cp} → Densidade do compósito;

ρ_m → Densidade da matriz;

ρ_f → Densidade da fibra;

V_m → Fração volumétrica da matriz;

V_f → Fração volumétrica da fibra.

Os valores do módulo de elasticidade (máximo e mínimo) da matriz de poliéster e para fibra de fique, foram estabelecidos em resultados anteriores

(MONTEIRO et al., 2011). Nas Tabela 4.8 e Tabela 4.9 são exibidos os valores característicos dos materiais que foram implementados no SBM.

Tabela 4.8 Resultados dos parâmetros característicos de cada material e da velocidade da onda de choque.

| Material | ρ (kg/m ³) | C (m/s) | S | Us (m/s) | Referência |
|----------|-----------------------------|---------|-------|----------------|--------------|
| Chumbo | 11300 | 2066 | 1,517 | 2066 + 1,517UP | MEYERS, 1994 |
| Aramida | 1440 | 1180 | 2,420 | 1180 + 2,420UP | MEYERS, 1994 |
| Alumínio | 2700 | 5328 | 1,338 | 5328 + 1,338UP | MEYERS, 1994 |
| Alumina | 3530 | | | 10375,39 | SILVA, 2014 |

Tabela 4.9 Resultados da densidade, onda elástica do compósito poliéster-fique e o módulo de elasticidade.

| Material | ρ (g/cm ³) | $E_{\min.}$ (GPa) | $E_{\max.}$ (GPa) | C_0 (min.) (m/s) | C_0 (máx.) (m/s) |
|-----------|-----------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Fique | 1,30 | 13,00 | 27,00 | - | - |
| Poliéster | 1,10 | 2,06 | 4,46 | - | - |
| *PF (30%) | 1,06 | 2,00 | 6,00 | 1428,98 | 2210,66 |
| *PF (20%) | 1,08 | 2,00 | 6,00 | 1377,06 | 2092,31 |
| *PF (10%) | 1,09 | 2,00 | 6,00 | 1372,74 | 2047,37 |

*PF: Poliéster-fique

A metodologia de casamento de impedância gerou um gráfico que é exibido na Figura 4.13. Neste gráfico apresenta-se as ondas de choque interagindo nas interfaces do SBM, sendo usada como segunda camada o compósito de matriz poliéster reforçado com 30%vol. de fibra de fique. Esta representação gráfica foi semelhante para os outros casos investigados. Os cálculos consideraram resultados das interfaces resumidamente em três estágios: interface projétil/cerâmica; interface cerâmica/compósito; e interface compósito/alumínio. A velocidade de projétil (material com base de chumbo) utilizada é semelhante à que foi adotada por SILVA (2014), LUZ (2015), ARAÚJO (2015) e CRUZ (2015) de 863,63 m/s. Com a finalidade de gerar uma base de comparação e utilizou-se o tecido de fique.

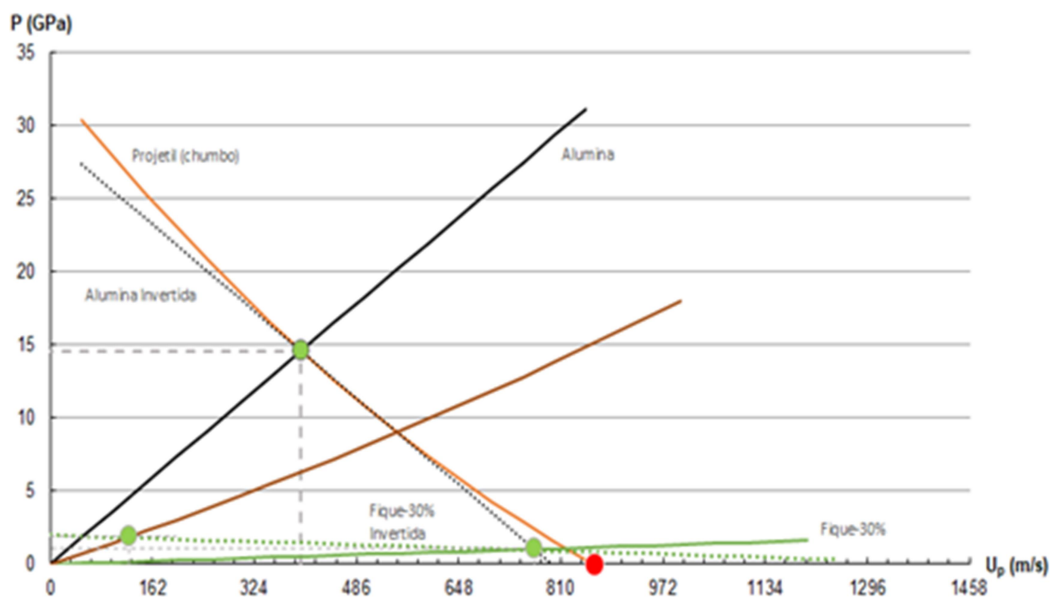


Figura 4.13 Gráfico pressão vs. velocidade de partícula para o SBM.

Os resultados obtidos na interação das ondas de choque, nas interfaces dos SBMs aplicando a metodologia de casamento de impedância, são exibidos na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 Valores da onda de choque, de velocidade de partícula e pressão nas interfaces de cada componente do SBM com sua natureza compressiva ou trativa.

| Interfaces | | Up (m/s) | Pressão (Gpa) | Us (m/s) | Natureza da onda de choque |
|---------------------|--------|----------|---------------|----------|----------------------------|
| Chumbo/Alumina | | 398 | 14 | 10375 | Compressão |
| Alumina/PF* (10%) | Mínimo | 764 | 1 | 1372 | Tração |
| | Máximo | 749 | 1 | 2047 | Tração |
| PF* (10%) /Alumínio | Mínimo | 141 | 2 | 5517 | Compressão |
| | Máximo | 195 | 2 | 5589 | Compressão |
| Alumina/ PF* (20%) | Mínimo | 764 | 1 | 1377 | Tração |
| | Máximo | 748 | 1 | 2092 | Tração |
| PF* (20%) /Alumínio | Mínimo | 142 | 2 | 5518 | Compressão |
| | Máximo | 199 | 3 | 5594 | Compressão |
| Alumina/ PF* (30%) | Mínimo | 768 | 1 | 1428 | Tração |
| | Máximo | 754 | 1 | 2210 | Tração |
| PF* (30%) /Alumínio | Mínimo | 126 | 1 | 5496 | Compressão |
| | Máximo | 181 | 2 | 5570 | Compressão |
| Alumina/Aramida | | 714 | 2 | 2909 | Tração |
| Aramida/Alumínio | | 365 | 5 | 5817 | Compressão |

*PF: Poliéster/Fique

Na Tabela 4.11 são exibidos os resultados de impedância de choque de alguns materiais do SBMs.

Tabela 4.11 Resultados da Impedância de choque dos componentes do SBMs.

| Material | Densidade (kg/m ³) | Velocidade de onda (m/s) | Impedância (kg/(m ² .s)) | Referência |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------|
| PF** (10%) (mín.) | 1060 | 1372 | 1,46 x 10 ⁶ | *PT |
| PF** (10%) (máx.) | 1060 | 2047 | 2,17 x 10 ⁶ | *PT |
| PF** (20%) (mín.) | 1080 | 1377 | 1,48 x 10 ⁶ | *PT |
| PF** (20%) (máx.) | 1080 | 2092 | 2,26 x 10 ⁶ | *PT |
| PF** (30%) (mín.) | 1090 | 1428 | 1,56 x 10 ⁶ | *PT |
| PF** (30%) (máx.) | 1090 | 2210 | 2,41 x 10 ⁶ | *PT |
| Chumbo | 11300 | 2.066 | 23,35 x 10 ⁶ | *PT |
| Alumínio | 2700 | 5.817 | 15,85 x 10 ⁶ | *PT |
| Aramida | 1440 | 2.909 | 4,19 x 10 ⁶ | ASSIS, 2016 |
| Poliéster-juta (mín.) | 1160 | 2145 | 2,46 x 10 ⁶ | ASSIS, 2016 |
| Poliéster-juta (máx.) | 1160 | 3105 | 3,60 x 10 ⁶ | ASSIS, 2016 |
| Epóxi-sisal (mín.) | 1155 | 1.948 | 2,25 x 10 ⁶ | ARAÚJO, 2015 |
| Epóxi-sisal (máx.) | 1155 | 2.955 | 3,41 x 10 ⁶ | ARAÚJO, 2015 |
| Alumina | 3530 | 10.375 | 36,62 x 10 ⁶ | SILVA, 2014 |

*PT: Presente trabalho.**PF: Poliéster-fique.

Referente aos resultados expressos nessa tabela, a aramida exibiu um significativo resultado de impedância de choque em comparação com os outros materiais na segunda camada. Esse valor justifica uma energia de impacto menor, verificada em trabalhos anteriores, devido a maior profundidade média de indentação obtida. Pois, maior é a energia do pulso de compressão transmitida para uma maior impedância de choque da segunda camada (LEE *et al.*, 1994).

4.4 ANÁLISE DAS MICROGRAFIAS OBTIDAS NO MEV

Depois do teste balístico de indentação do material de referência, parte dos compósitos fragmentados, tanto na configuração fibra como tecido, foram recolhidos e investigados por meio da técnica de MEV. Na Figura 4.14 é mostrado o compósito poliéster reforçado com fibra de fique. Nesta figura é exibida a região superficial fraturada do material e pode-se destacar o

recobrimento das partículas do material cerâmico, indicando que a energia cinética dos fragmentos foi absorvida pelo compósito através do mecanismo de impregnação mecânica.

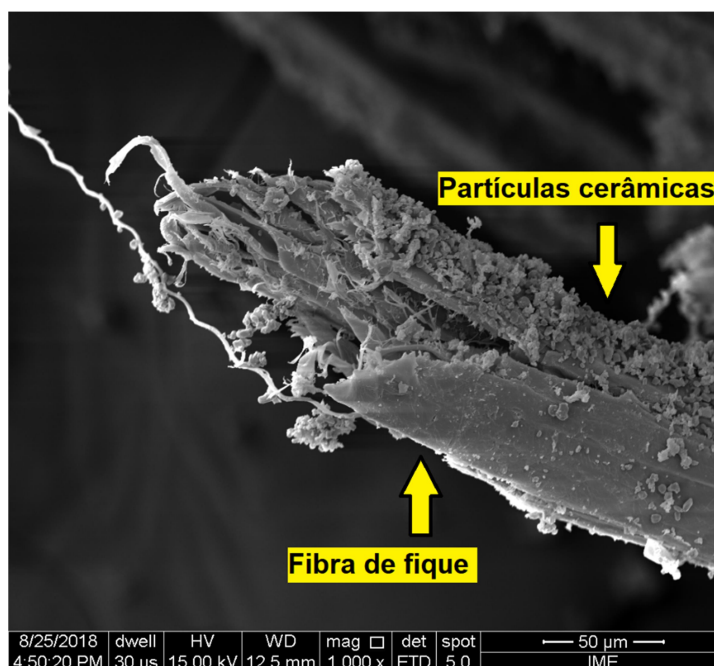


Figura 4.14 Superfície de fratura de compósito de 20% fibra de fique coberta com fragmentos cerâmicos.

As forças de Van der Waals e carregamento eletrostático presentes na superfície do compósito geram condições superficiais para impregnar de partículas cerâmicas, ocasionando um empilhamento (MONTEIRO et al., 2014). Na Figura 4.14 é exibido uma determinada região no qual as fibras de fique ficam impregnada de partículas cerâmicas.

Costa (2019) relatou pela primeira vez uma visão completa de seis mecanismos responsáveis pela dissipação da energia restante, após o impacto do projétil contra a cerâmica frontal, pelo composto de fibras de curauá como segunda camada do SBM. Esse comportamento das fibras de curauá também podem ser associados as fibras de fique tratando-se de fibras naturais.

Os mecanismos de captura de fragmentos cerâmicos na Figura 4.14 e da delaminação do compósito na Figura 4.10a são dos seis mecanismos que Costa (2019) destaca. Além destes dois, destaca-se a separação de fibrilas, o efeito pullout, a ruptura da fibra natural e a ruptura da matriz polimérica. Estes mecanismos estão destacados na FIG 4.15.

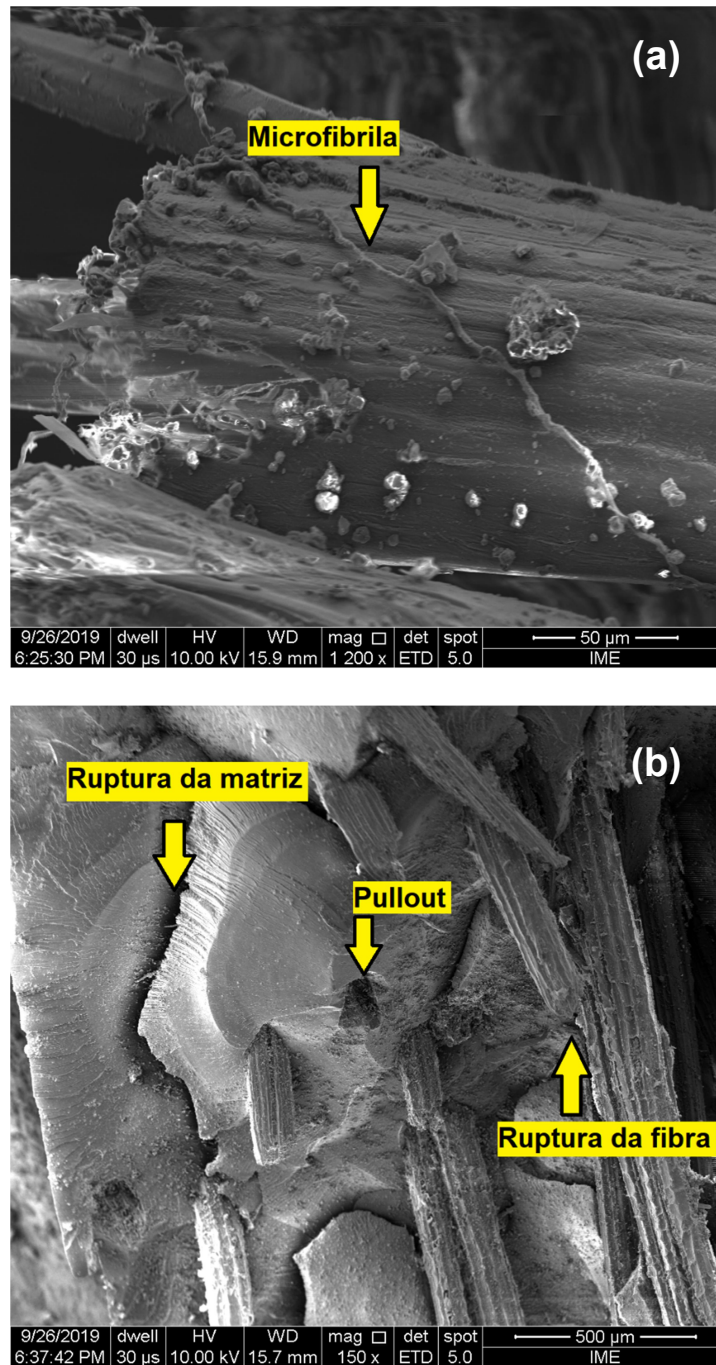


Figura 4.15 Superfície de fratura de compósito de 20% fibra de fique destacando a microfibrila (a) e do efeito Pullout e da ruptura da matriz e da fibra (b).

A junção dos mecanismos de dissipação de energia mostra que um compósito de poliéster reforçado com fique (fibra ou tecido) como segunda

camada SBM, um desempenho balístico aceitável (Tabela 4.4) semelhante ao de um laminado de aramida com a mesma espessura.

4.4.1 Espectro de EDS

Na Figura 4.16 é mostrada uma análise por MEV da amostra do compósito com fibra de fique. Nesta figura, as partículas cerâmicas (predominantemente Al_2O_3) estão impregnadas na superfície da fibra. O espectro EDS apresenta os elementos alumínio (Al), oxigênio (O) e nióbio (Nb). O elemento cobre (Cu) é oriundo do recobrimento de latão.

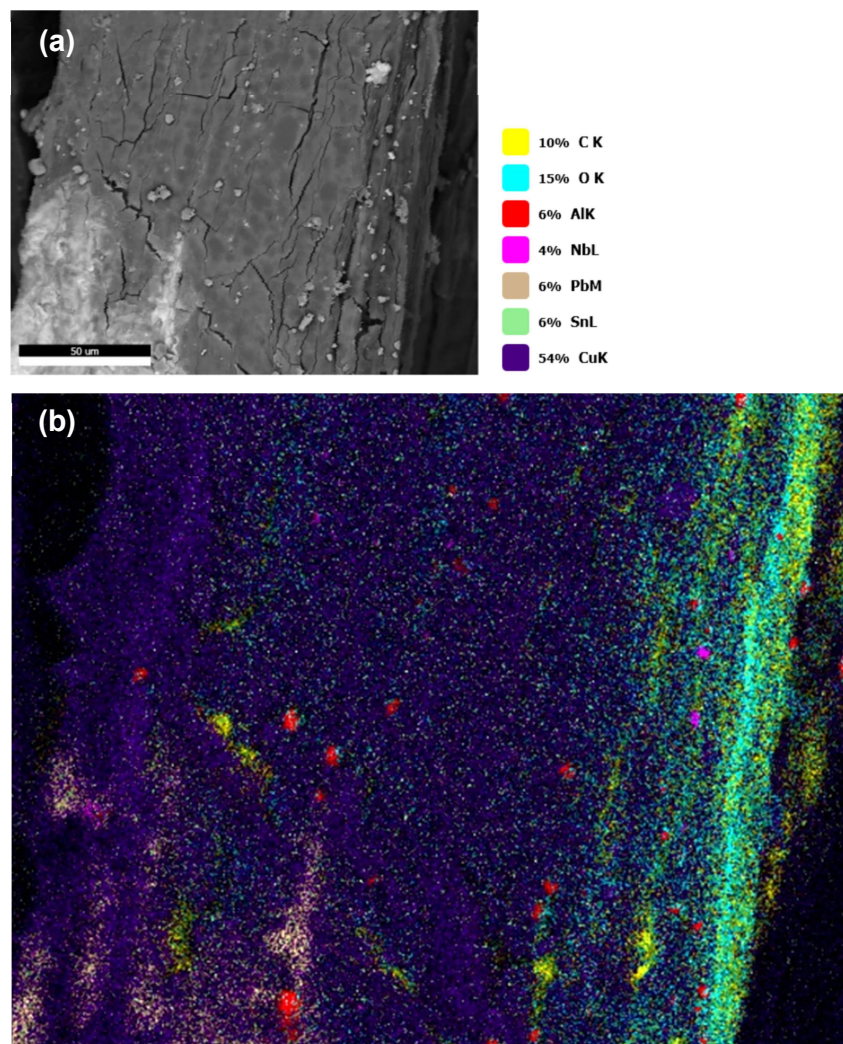
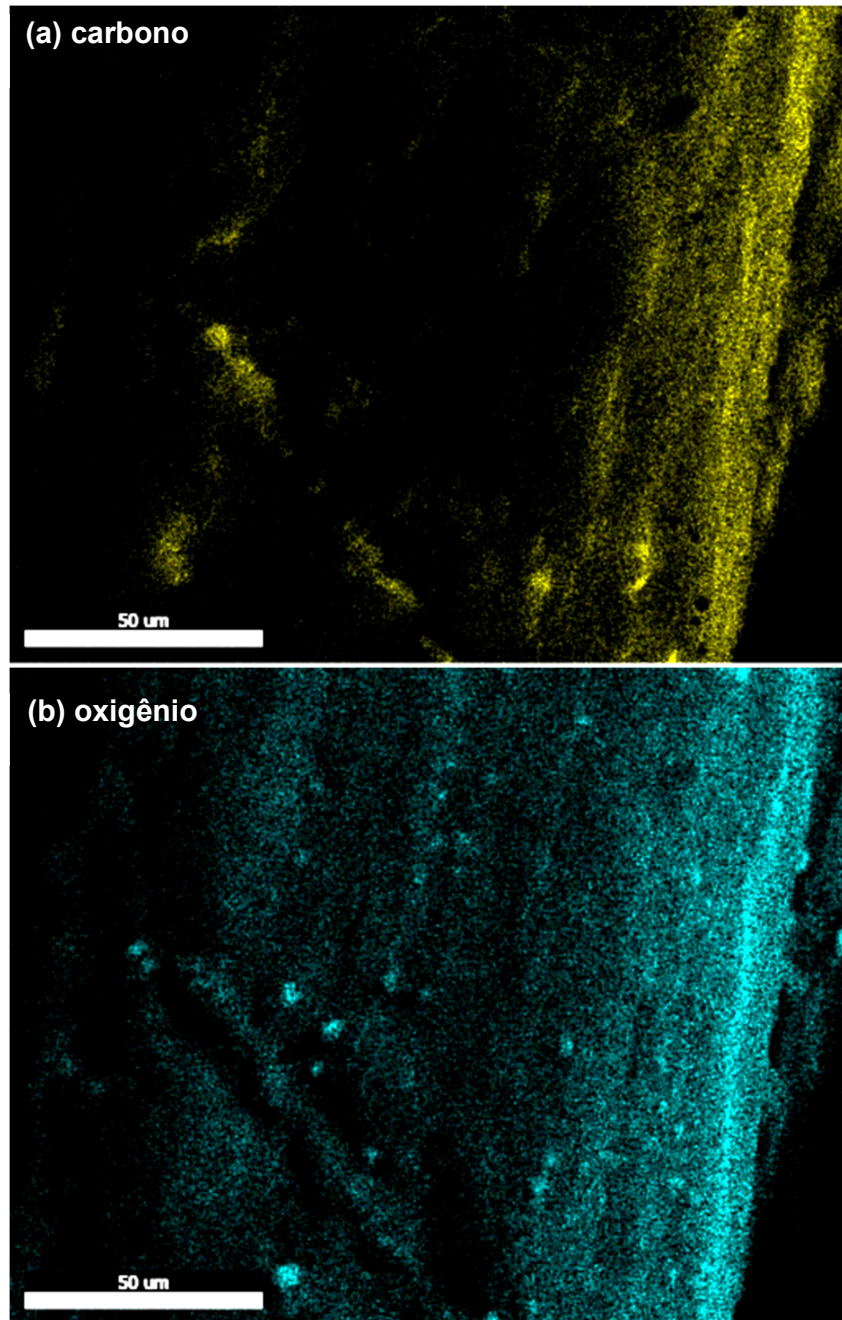
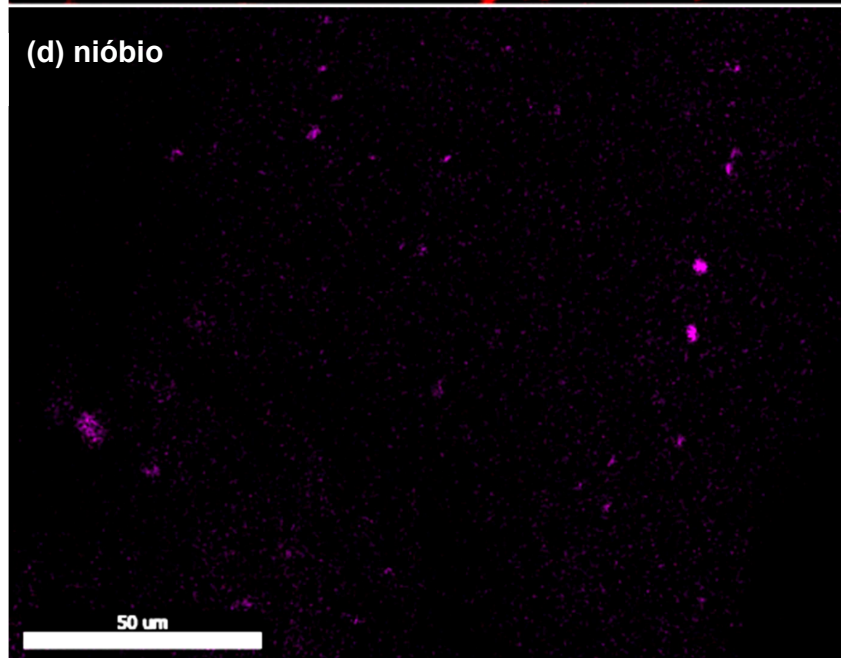
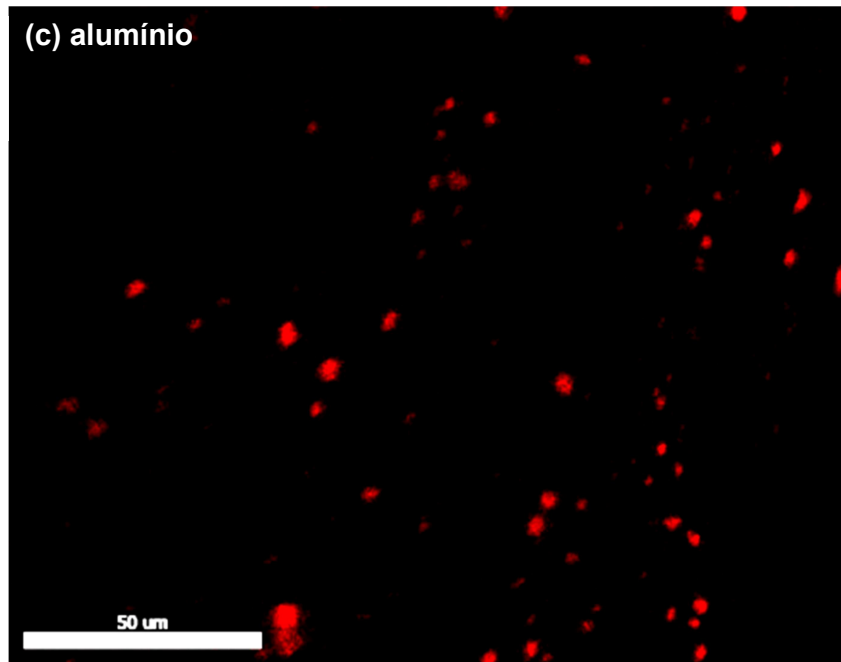


Figura 4.16 Imagem de MEV (a) e EDS dos elementos químicos presentes na imagem (b).

As imagens que constituem os elementos separadamente estão na FIG 4.17. Além do alumínio e do nióbio que vieram da cerâmica, consta-se os elementos de chumbo (Pb) e de estanho (Sn) que são oriundos do projétil.





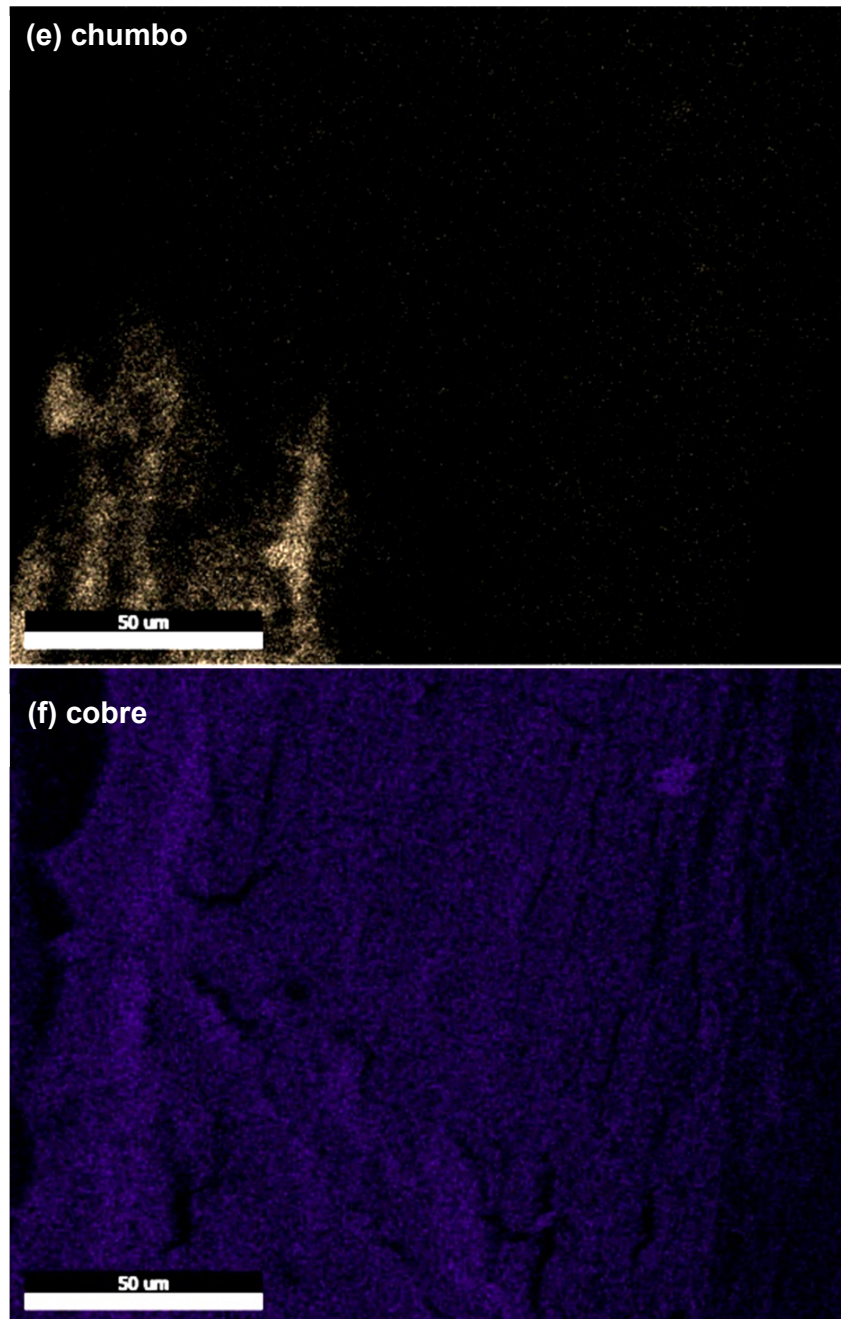


Figura 4.17 EDS que constitui o elemento de carbono (a), de oxigênio (b), de alumínio (c), de nióbio (d), de chumbo (e) e de cobre (f).

Um EDS característico da região do impacto balístico é exibido na FIG 4.18. Neste caso, evidencia a presença dos elementos químicos da fibra de fique, da cerâmica e do projétil. As porcentagens em peso dos elementos foram de 12,44% de oxigênio, de 8,47% de alumínio, de 16,83% de chumbo, de 2,71% de estanho e 59,65% de cobre. Além disto, destaca-se a presença de cobre devido ao recobrimento metálico para a análise.

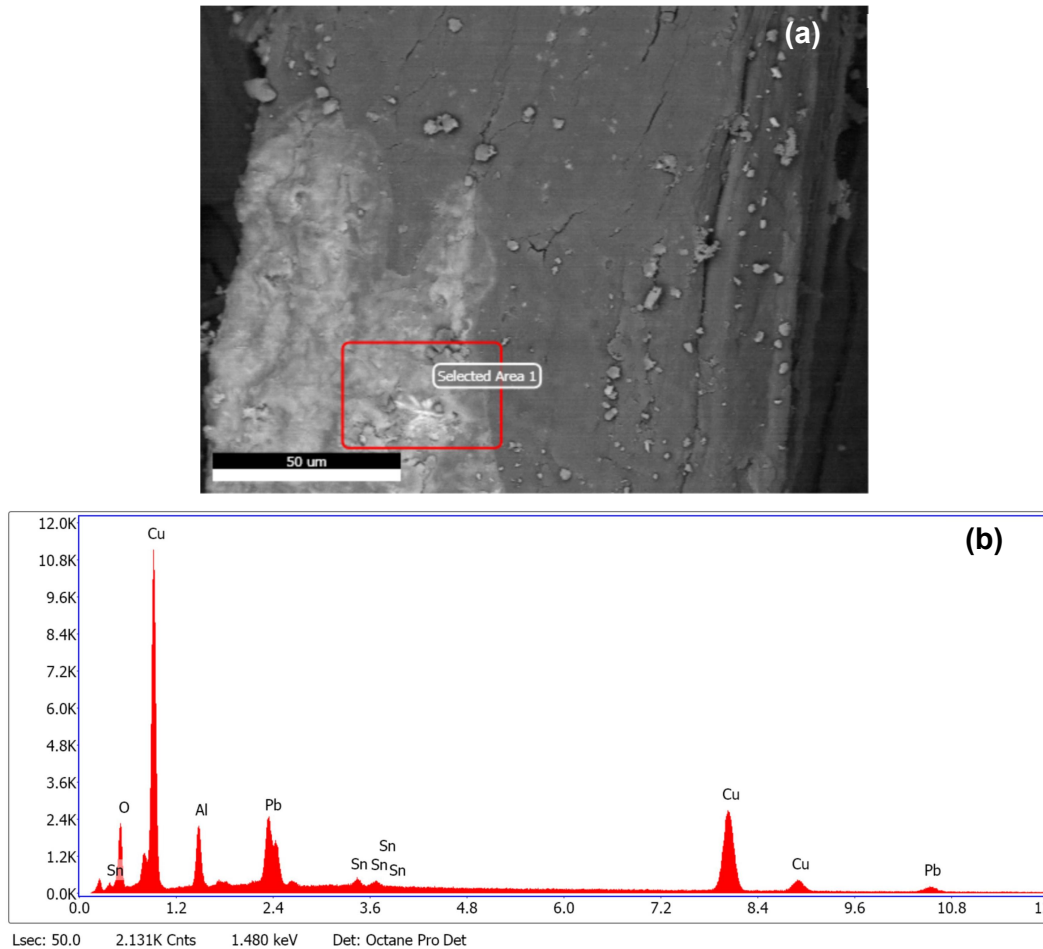


Figura 4.18 Imagem de MEV destacando a área de varredura (a) e espectro de EDS da determinada área (b).

4.5 CUSTO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA BLINDAGEM MULTICAMADA

Um modelo de custo associado ao uso de compósitos de fique em relação com compósitos de engenharia convencional é apresentado na Tabela 4.12. Os custos básicos foram obtidos da literatura para poliéster, epóxi, laminados de aramida (KevlarTM) e fibra de vidro (CALLISTER & RETHWISCH, 2014), bem como para fibra e tecido de fique (CASTELLANOS et al., 2009) e para sisal, juta, curauá e piaçava (CONAB, 2018).

Tabela 4.12 Modelo de custo para diferentes compósitos.

| Material Compósito | Custo (US\$/Kg) | Referência |
|------------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| 64,8 vol.% aramida / epóxi | 49,59 | CALLISTER & RETHWISCH, 2014 |
| 72 vol.% fibra de vidro / epóxi | 18,06 | CALLISTER & RETHWISCH, 2014 |
| 30 vol.% fibra sisal / poliéster | 3,23 | CASTELLANOS et al., 2009 |
| 30 vol.% fibra juta / poliéster | 3,24 | CONAB, 2018 |
| 30 vol.% fibra curauá / poliéster | 3,19 | CONAB, 2018 |
| 30 vol.% fibra piaçava / poliéster | 3,21 | CONAB, 2018 |
| 30 vol.% fibra fique / poliéster | 3,26 | Presente trabalho |

Nesta tabela, observa-se que o Kevlar™ (fibra de aramida) é o compósito mais caro, mais de 15 vezes o preço de qualquer compósito de fibra natural comum, incluindo os compostos investigados presentes. Mesmo um compósito de fibra de vidro menos dispendioso é mais do que 5 vezes mais caro do que qualquer compósito de fibra natural. Portanto, a incorporação de qualquer material comum relacionado com as fibras naturais, incluindo a fibra de fique, reduz o preço da blindagem balística.

5. CONCLUSÕES

1) Os resultados dos ensaios balísticos deste trabalho para os diversos SBMs atenderam as exigências da norma NIJ-0101.04 (2000) de que o projétil gerasse uma indentação menor que 44 mm na plastilina.

2) Com a implementação de fibras e tecido de fique em compósitos de matriz poliéster foi evidenciado um desempenho semelhante ao tecido de aramida quando comparados em uma segunda camada do SBMs. O valor de 30%vol. de tecido de fique na matriz de poliéster resultou em resultados de indentação menores que 20 mm na plastilina, ou seja, bem abaixo do que a norma exige. Além disso, manteve a integridade da segunda camada após o impacto balístico.

3) A segunda camada no aspecto geral da blindagem, foi eficiente em capturar os fragmentos da primeira camada (cerâmica). Com isso, acarretou impregnação superficial dos fragmentos nas fibras de fique e na matriz de poliéster. Isto incluiu captura de fragmentos por forças de Van der Waals e cargas eletrostáticas. Para este caso, a fratura ocorreu por mecanismo de delaminação, efeito Pullout, ruptura da fibra natural e da matriz polimérica.

4) Tendo em vista a análise de fratura e sua integridade, os compósitos com fibra alinhada de fique apresentaram um comportamento de fratura delaminada. Para os compósitos de tecido de fique, presenciou que o compósito não sofreu grande (ou quase nenhuma) delaminação. Isso é consequência da qualidade superior da adesão do compósito e da geometria aplicada nas fibras.

5) A relevância da presença da segunda camada nos SBMs ficou evidenciada nos resultados das impedâncias de choque e pressões de interface. A cerâmica da primeira camada cumpriu o papel de resistir ao impacto do projétil. A impedância é menor porque a densidade da segunda camada é menor que a primeira camada. Os compósitos geraram uma impedância variando de $2,41 \times 10^6$ kg/m².s para 30%vol. de fibra de fique.

6) O compósito reforçado com 20%vol. de fibras de fique mostrou um desempenho balístico considerável. O resultado da penetração no material de

referência foi de $16,59 \pm 1,04$ mm. Este resultado é estatisticamente melhor que os outros compósitos, obteve o parâmetro de Weibull ($\beta = 19,72$), que justifica um SBM de ótimo desempenho. Além disso, como o valor da velocidade residual, depois do impacto balístico, foi de $V_L = 208$ m/s, confirmou um desempenho balístico semelhante aos outros compósitos.

7) Os compósitos na configuração de tecido de fique também obtiveram resultados numéricos significativos perante os testes balísticos. A indentação média foi $19,89 \pm 2,42$ mm e sua V_L foi 160 m/s. Entretanto, essa configuração se destacou pela integridade física após os impactos balísticos. No qual, com um número maior de impactos, sua integridade é superior às demais configurações.

8) Comparando com os SBMs elaborados com fibras naturais, verificou-se que a aramida é o compósito mais caro, mais de 15 vezes o preço de qualquer compósito de fibra natural comum, incluindo os compostos investigados de fibra de fique. Mesmo um compósito de fibra de vidro menos dispendioso é 5 vezes mais caro do que qualquer compósito de fibra natural. Portanto, a incorporação de qualquer material comum à base de fibras naturais, incluindo a fibra de fique, reduz o preço do compósito e mantém a eficiência do SBM.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS

- Buscar novas configurações de trama de tecido de fique e/ou manta de fique no intuito de otimizar os resultados de indentação junto com o aumento do percentual de fibra no compósito.
- Estudar a otimização da espessura das camadas de cerâmica e de compósitos de fique para aplicação como insertos em coletes nível III-A.
- Desenvolver um protótipo de colete balístico de Dyneema® e comparar com os compósitos já estudados.
- Determinar as propriedades dinâmicas dos diferentes compósitos e caracterizar os efeitos da taxa de deformação por meio do ensaio de barra Hopkinson.
- Avaliar a degradação do compósito para determinar o tempo de vida útil de um colete balístico.
- Obtenção da composição química da fibra de fique junto com o seu ângulo microfibrilar.
- Aumentar os percentuais de fibra e tecido de fique nos compósitos (40 e 50%).

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABERNETHY, R. B.; BRENEMAN, J. E.; MEDLIN, C.H.; REINMAN, G.L. **Weibull Analysis Handbook**. Disponível em: www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a143100.pdf.>. 1983.
- ABNT NBR 15000. **Blindagens para impactos balísticos - classificação e critérios de avaliação**, 2005.
- ALTOÉ, G. R. **Avaliação Da Influência Do Diâmetro, Por Meio Da Distribuição De Weibull, Nas Propriedades Mecânicas E Estruturais Da Fibra De Figue**. Monografia de Graduação do Curso em Engenharia Metalúrgica e de Materiais na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. 2016.
- ALVES, A.L.S.; NASCIMENTO, L.F.C.; SUAREZ, J.C.M. **Comportamento Balístico de Compósito de Polietileno de Altíssimo Peso Molecular: Efeito da Radiação Gama**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, Vol. 14, nº 2, p. 105-111. 2004.
- ARAÚJO, B.M. **Avaliação do Comportamento Balístico de Blindagem Multicamada com Compósito de Epóxi Reforçado com Fibra de Sisal**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2015.
- ASSIS, F. S. **Comportamento Balístico de Blindagem Multicamadas Com Compósitos de Poliéster Reforçados com fibras de Juta**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2016.
- BLEDZKI, A.K.; GASSAN, J. **Composites reinforced with cellulose based fibers**. *Progress in Polymer Science*, Vol. 24, p. 221-274. 1999.
- BRAGA, F.O. **Comportamento Balístico de uma Blindagem Multicamada Utilizando Compósito Poliéster-Curauá como Camada Intermediária**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2015.
- BRYDSON, J.A. **Plastics Materials**. 7a ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. 1999.
- CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D.G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 8a ed. Danvers: John Wiley & Sons. 2014.
- CANTWELL, W.J.; MORTON, J. **The Impact Resistance of Composites Materials – a Review** – *Composites*; vol. 22, n.5. 1991.
- CASTELLANOS, F.; et al. **Definición de la Agenda Prospectiva de Investigación en la Cadena Productiva Agroindustrial de Figue a Partir de**

- Sistemas de Inteligencia Tecnológica. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.** 1. Ed. Bogotá D.C, 2009.
- CHAGAS, C.F.M.C. **Minimização do Efeito de Aresta em Blindagem Cerâmica à Base de Alumina.** Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2014.
- CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento 2017.** Disponível em: <http://sisdep.conab.gov.br/precosiagroweb/>. Acesso em: 2 Ago. 2018.
- COSTA, U.O.; NASCIMENTO, L.F.C; GARCIA, J.M.; MONTEIRO, S.N.; DA LUZ, F.S.; PINHEIRO, W.A.; GARCIA, F.G.F. **Effect of Graphene Oxide Coating on Natural Fiber Composite for Multilayered Ballistic Armor.** *Polymers*, 11(8), 1356, 2019.
- CRUZ, R.B. **Avaliação do Comportamento Balístico de Blindagem Multicamadas com Compósitos de Epóxi Reforçados com Fibras de Bambu.** Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2015.
- EICHHORN, S.J. et al. **Review: Current international research into cellulosic fibers and composites.** *Journal of materials Science*, Vol. 36 (9), 2107-2131, 2001.
- EL MOGAHZY, Y.E. **Development of textile fiber products for medical and protection applications.** *Engineering Textiles*, 475-525, 2009.
- EMBRAPOL. Disponível em: <<http://www.embrapol.com.br/resina.htm>>. Acesso em: 2 Ago. 2018.
- FARUK, O.; BLEZKI, A.K.; FINK, H. SAIN, M. **Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010.** *Progress in Polymer Science*, nº 37, p.1552-1596. 2012.
- GAÑÁN, P. and Mondragon I. **Surface modification of fique fibers.** Effects of their physico-mechanical properties. *Polymer Composites*. 2002.
- GAÑÁN, P. and Mondragon I. **Thermal and degradation behavior of fique fiber reinforced thermoplastic matrix composites.** *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2003.
- GOMES, A.V. **Comportamento Balístico da Alumina com Adição de Nióbia e Variação da Geometria do Alvo.** Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2004.
- JOHN, M.J.; THOMAS, S. **Biofibres and Biocomposites.** *Carbohydrate Polymers*, Vol. 71, p. 343-364. 2008.
- KALIA, S.; KAITH, B.S.; KAUR, I. (Eds.). **Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites.** 1a ed. New York: Springer. 2011.

LACH, DE. **Developments and Applications of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastics**, New York: Van Nostrand Reinhold Co, 576-588p. 1998.

LOURO, L.H.L.; LINDFORS, A.; MEYERS, M.A. **Stress-wave-induced damage in alumina**. Journal de Physique, Colloque C3, Supplément au n°9, Tome 49. 1988.

LUZ, F.S. **Avaliação das Fibras de Coco e Palf como Reforços de Compósitos Epoxídicos Empregados em Sistema de Blindagem Multicamada**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2018.

LUZ, F.S. **Avaliação do Comportamento Balístico de Blindagem Multicamada dom Compósito de Epóxi Reforçado com Fibra de Juta**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2014.

LUZ, F.S.; LIMA, JR., E.P.; LOURO, L.H.L.; MONTEIRO, S.N. **Ballistic test of multilayered armor with intermediate epoxy composite reinforced with jute fabric**. Mater. Res., 18: 170-177. 2015.

MEDINA, J. C. **Plantas Fibrosas da Flora Mundial, Instituto Agrônômico de Campinas**, p. 787-792, 1959.

MEDVEDOVSKI, E. **Ballistic Performance of Armour Ceramics: Influence of Design and Structure**. Part 1. Ceramics International. Vol. 36, p. 2103-2115. 2010.

MEYERS, M.A. **Dynamic behavior of materials**. New York: John Wiley & Sons, 1994.

MOHANTY, A.K.; MISRA, M.; DRZAL, L.T. **Sustainable Bio-Composites from Renewable Resources: Opportunities and Challenges in the Green Materials World**. Journal of Polymers and the Environment, Vol. 10, n° 1/2, p. 19-26. 2002.

MONTEIRO, S.N.; LIMA JR, E.P.; LOURO, L.H.L., SILVA, L.C.; DRELICH, J.W. **Unlocking function of aramida fibers in multilayered ballistic armor**. Accept for publication un Metallurgical and Materials Transactions A, November, 2014.

MONTEIRO, S.N.; LOPES, F.P.D.; BARBOSA, A.P.B.; BEVITORI, A.B.; DA SILVA, I.L.A.; DA COSTA, L.L. **Natural Lignocelulosic Fibers as Engineering Materials – An Overview**. Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 42A, p. 2963-2974. 2011.

MONTEIRO, S.N.; LOPES, F.P.D.; FERREIRA, A.S.; NASCIMENTO, D.C.O. **Natural Fiber Polymer Matrix Composites: Cheaper, Tougher and Environmentally Friendly**. JOM, Vol. 61, p. 17-22. 2016.

- MORYE, S.S.; HINE, P.J.; DUCKETT, R.A.; CARR, D.J.; WARD, I.M. **Modelling of the Energy Absorption by Polymer Composites Upon Ballistic Impact**. Composites Science and Technology, Vol. 60, p. 2631-2642. 2000.
- MOURA, M.F.S.F.; MORAIS, A.B.; MAGALHÃES, A.G. **Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico**. 2ª ed. Porto: Publindústria Edições Técnicas. 2011.
- National Criminal Justice Reference Service. US Department of Justice, & National Institute of Justice. NIJ 0101.04. **Ballistic Resistance of Body Armor** 2000.
- NORONHA, K. F., MELO, F. C. L, 2010. “**Avaliação do desempenho de adesivos poliméricos na interface dyneema®/alumina**”. In:6º Congresso nacional de engenharia mecânica, 2010.
- O’CONNOR, P.D.T.; KLEYNER, A. **Practical Reliability Engineering**. 5ª ed. Chichester: John Wiley & Sons. 2012.
- 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.
- TABIEI, A.; NILAKANTAN, G. **Ballistic Impact of Dry Woven Fabric Composites: A Review**. Applied Mechanics Reviews, Vol. 61, nº 010802, p. 1-13. 2008.
- THAKUR, V.K.; THAKUR, M.K.; GUPTA, R.K. **Review: Raw Natural Fiber-Based Polymer Composites**. International Journal of Polymer Analysis & Characterization, Vol. 19, p. 256-271. 2014.
- TRINDADE, W. **Influência da Geometria e da Microestrutura no Comportamento Dinâmico da Alumina Aditivada com Nióbia**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2012.
- TRINDADE, W.; GOMES, A. V.; LOURO, L.H.L. **Elaboração de uma Nova Rota de Eliminação de Ligante da Cerâmica De Alumina**. Revista Militar de Ciência & Tecnologia. Vol. 4, p. 71-79. 2013.
- WASELFISZ, J.J. **Mortes Matadas por Armas de Fogo no Brasil: 1980-2012**. Unesco. 2015.
- WAMBUA, P.; VANGRIMDE, B.; LOMOV, S.; VERPOEST, I. **The Response of Natural Fibre Composites to Ballistic Impact by Fragment Simulating Projectiles**. Composite Structures, Vol. 77, p. 232–240. 2007.

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.

WILKINS, M.L. **Mechanics of Penetration and Perforation**. **International Journal of Engineering Sciences**. Vol. 16, n. 11, p. 793-807. 1978.

ZUKAS, J.A.; NICHOLAS, T.; SWIFT, H.F.; GRESZCZUK, L.B.; CURRAN, D.R. **"Impact dynamics"**. 1° editioned, New York: John Wiley & Sons, 1982.