

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

BRUNA MADEIRA DE ARAÚJO

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE BLINDAGEM  
MULTICAMADAS COM COMPOSITO DE EPÓXI REFORÇADO COM  
FIBRA OU TECIDO DE SISAL

Rio de Janeiro

2015

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**BRUNA MADEIRA DE ARAÚJO**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE BLINDAGEM  
MULTICAMADAS COM COMPOSITO DE EPÓXI REFORÇADO COM FIBRA OU  
TECIDO DE SISAL**

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

Orientador: Prof. Sérgio Neves Monteiro – Ph.D

Rio de Janeiro

2015

© 2015

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, microfilmear 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 autor e dos orientadores.

S.... Araújo, Bruna Madeira de

Avaliação do comportamento balístico de blindagem multicamadas com compósito de epóxi reforçado com fibra ou tecido de sisal/Bruna Madeira de Araújo – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2015.

115 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, 2015.

1.

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

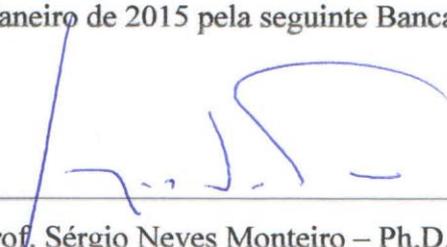
**BRUNA MADEIRA DE ARAÚJO**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE BLINDAGEM  
MULTICAMADAS COM COMPOSITO DE EPÓXI REFORÇADO COM  
FIBRA OU TECIDO DE SISAL**

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

Orientador: Prof. Sérgio Neves Monteiro – Ph.D.

Aprovada em 23 de Janeiro de 2015 pela seguinte Banca Examinadora:



---

Prof. Sérgio Neves Monteiro – Ph.D., IME – Presidente



---

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



---

Prof. Jean Igor Margem – D.Sc., ISE-CENSA

Rio de Janeiro

2015

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me amparar nos momentos difíceis e me dar forças para superar as dificuldades.

A todas as pessoas que me incentivaram, apoiaram e possibilitaram a conclusão desse trabalho. Em especial ao meu esposo, Renato Batista da Cruz, por todo amor, carinho, dedicação, paciência e parceria para a conclusão dessa etapa.

Aos meus pais e meu irmão que, mesmo distantes fisicamente, sempre estiveram presentes em todos os desafios da minha vida.

Aos professores do Instituto Militar de Engenharia (IME), em especial ao professor Sérgio Neves Monteiro, pela orientação, paciência e apoio.

Aos amigos que fiz durante o curso, pela verdadeira amizade que construímos, em especial aos amigos do grupo de fibras naturais, Fernanda dos Santos, Cap Thiago Milanezi e Verônica Scarpini pela ajuda e paciência.

Ao CAEx, por disponibilizar instalações e pessoas qualificadas para a realização dos ensaios balísticos, em especial ao Ten Cel Malizia, Cap D'Megeon, Sgt Santiago, Sgt Furiati, Sgt Marcelo Alves e ao Sgt Machado, que me auxiliaram diretamente na realização dos testes.

Ao Cap Édio pela disposição e suporte prestado nos ensaios balísticos.

À CAPES pelo incentivo financeiro para o desenvolvimento desse trabalho.

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| LISTA DE FIGURAS.....  | 7         |
| LISTA DE TABELAS.....  | 11        |
| LISTA DE ABREVIACÕES E SBOLOS.....                                | 13        |
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>17</b> |
| 1.1. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....                                  | 18        |
| 1.2. OBJETIVO DO ESTUDO.....   | 19        |
| 1.2.1. Objetivo geral.....   | 19        |
| 1.2.2. Objetivos específicos.....                                   | 19        |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                | <b>21</b> |
| 2.1 BLINDAGEM BALÍSTICA.....  | 21        |
| 2.2 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS VEGETAIS.....                  | 25        |
| 2.3 FIBRAS NATURAIS LIGNOCELULOSICAS.....                            | 27        |
| 2.3.1 Fibras de sisal.....   | 31        |
| 2.4 MATRIZES POLIMÉRICAS.....                                       | 35        |
| 2.5 COMPÓSITOS PARA PROTEÇÃO BALÍSTICA COM TECIDOS DE FIBRAS..... | 36        |
| 2.6 COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS MATERIAIS.....                       | 38        |
| 2.6.1 Interação e reflexão de ondas de choque.....                 | 44        |
| 2.7 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL.....                                    | 47        |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                   | <b>49</b> |
| 3.1 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....          | 50        |
| 3.1.1 Alumina e nióbia.....   | 50        |
| 3.1.2 Ligante.....   | 51        |
| 3.1.3 Fibra de sisal.....  | 51        |
| 3.1.4 Tecido de sisal.....   | 52        |
| 3.1.5 Resina epóxi.....   | 52        |
| 3.1.6 Plastilina.....  | 53        |
| 3.1.7 Placa de alumínio.....  | 54        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.1.8    | Adesivo.....  | 54        |
| 3.2      | <b>OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CERÂMICOS.....</b>  | <b>55</b> |
| 3.2.1    | Sinterização.....   | 59        |
| 3.2.2.   | Medições dos corpos cerâmicos.....  | 60        |
| 3.3      | <b>CONFECÇÃO DAS AMOSTRAS DE COMPÓSITO EPÓXI-SISAL.....</b>                                   | <b>61</b> |
| 3.4      | <b>ENSAIOS BALÍSTICOS.....</b>  | <b>64</b> |
| 3.5      | <b>MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....</b>   | <b>68</b> |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>  | <b>70</b> |
| 4.1      | <b>CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS CERÂMICOS.....</b>   | <b>70</b> |
| 4.2      | <b>DESEMPENHO BALÍSTICO DA BLINDAGEM MULTICAMADA.....</b>                                     | <b>71</b> |
| 4.3      | <b>ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS TESTES DE VELOCIDADE<br/>RESIDUAL.....</b>                      | <b>78</b> |
| 4.4      | <b>INTERAÇÃO DAS ONDAS DE CHOQUE NAS BLINDAGENS<br/>MULTICAMADAS.....</b>                     | <b>82</b> |
| 4.5      | <b>CUSTOS.....</b>  | <b>85</b> |
| 4.6      | <b>ANÁLISE DAS MICROGRAFIAS OBTIDAS NO MICROSCÓPIO<br/>ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV).....</b> | <b>86</b> |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES.....</b>  | <b>91</b> |
| <b>6</b> | <b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>  | <b>93</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>  | <b>94</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| FIG. 2.1  | Sistema típico de blindagem multicamadas (MAS).....  | 22 |
| FIG. 2.2  | Munição calibre 7,62 x 51 mm.....  | 23 |
| FIG. 2.3  | Esquema da constituição dos compósitos fibrosos (PICANÇO, 2005).....   | 25 |
| FIG. 2.4  | Classificação de acordo com a origem das FNLs.....   | 28 |
| FIG. 2.5  | Esquema de uma fibrila. (JOHN e THOMAS, 2008) (Adaptado).....  | 29 |
| FIG. 2.6  | O campo FNLs em um diagrama de Ashby de tensão vs densidade (MONTEIRO et al, 2011).....  | 30 |
| FIG. 2.7  | Plantação de sisal ( <i>Agave sisalana</i> ) (Disponível em: < <a href="http://www.cosibra.com.br/processos_estrutura.php">http://www.cosibra.com.br/processos_estrutura.php</a> >. Acesso em 16 de dezembro de 2014).....                           | 31 |
| FIG. 2.8  | Raspagem mecânica das folhas de sisal por meio da máquina desfibradora (Disponível em: < <a href="http://www.cosibra.com.br/processos_estrutura.php">http://www.cosibra.com.br/processos_estrutura.php</a> >. Acesso em 16 de dezembro de 2014)..... | 32 |
| FIG. 2.9  | Secagem ao ar das fibras de sisal (Disponível em:< <a href="http://www.cosibra.com.br/processos_estrutura.php">http://www.cosibra.com.br/processos_estrutura.php</a> >. Acesso em 16 de dezembro de 2014).....                                       | 32 |
| FIG. 2.10 | Penteamento e estiragem das fibras (Disponível em: < <a href="http://www.cosibra.com.br/processos_estrutura.php">http://www.cosibra.com.br/processos_estrutura.php</a> >. Acesso em 16 de dezembro de 2014).....                                     | 33 |
| FIG. 2.11 | Aspecto superficial da fibra de sisal obtida por microscopia eletrônica de varredura. Aumento de 300x. (MONTEIRO et al, 2011).....   | 33 |
| FIG. 2.12 | Diferentes tipos de arranjos de fibras: (a) simples; (b) sarja; (c) cetim e (d) cesta. (JOHN e THOMAS, 2008) (Adaptado).....   | 37 |
| FIG. 2.13 | Curva tensão versus deformação em um material dúctil. (MEYERS, 1994).....  | 39 |
| FIG. 2.14 | Esquema ilustrativo de propagação da região de compressão em um pistão contendo gás: (a) Antes do choque; (b) Após um tempo $t_1$ ; (c) Após um tempo $t_2 > t_1$ . (MEYERS, 1994).....  | 40 |
| FIG. 2.15 | Curva da probabilidade de perfuração. (ZUKAS, 1982) (Adaptada)..   | 43 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| FIG. 2.16 | Transferência da onda de choque de um meio com baixa impedância para um meio de alta impedância: (a) Gráfico de Pressão <i>versus</i> Velocidade de partícula; (b) Perfil de pressão. (MEYERS, 1994)..... | 45 |
| FIG. 2.17 | Transferência da onda de choque de um meio com alta impedância para um meio com baixa impedância: (a) Gráfico pressão <i>versus</i> velocidade de partícula; (b) Perfil de pressão. (MEYERS, 1994).....   | 46 |
| FIG. 3.1  | Diagrama esquemático da blindagem multicamadas, juntamente com a plastilina. (MONTEIRO et al, 2014a) (Adaptada).....  | 49 |
| FIG. 3.2  | Tecido de sisal com trama simples.....  | 52 |
| FIG. 3.3  | Resina e catalisador conforme fornecidos.....   | 53 |
| FIG. 3.4  | Plastilina da marca CORFIX em caixas unitárias de 500g.....   | 53 |
| FIG. 3.5  | Placa de alumínio.....  | 54 |
| FIG. 3.6  | Adesivo Ultra Flex PU Cura Rápida.....  | 55 |
| FIG. 3.7  | Moinho de bolas de alumina da marca MARCONI modelo MA 500 na posição de uso.....  | 56 |
| FIG. 3.8  | Balança digital da marca GEHAKA, modelo BK 300, com precisão de 0,001g.....   | 56 |
| FIG. 3.9  | Estufa ELKA para secagem do pó.....   | 57 |
| FIG. 3.10 | Peneira com malha 0,355 mm.....   | 57 |
| FIG. 3.11 | Agitador de peneiras marca +GF+ tipo PSA.....   | 57 |
| FIG. 3.12 | Matriz hexagonal plana de compactação do pó.....  | 58 |
| FIG. 3.13 | Prensa motorizada com capacidade de 30 toneladas da marca Nowak.....  | 58 |
| FIG. 3.14 | Forno para sinterização INTI modelo FE 1700.....  | 59 |
| FIG. 3.15 | Pastilhas cerâmica em formato hexagonal sinterizada.....  | 60 |
| FIG. 3.16 | Matriz metálica para confecção das placas compósitas.....   | 61 |
| FIG. 3.17 | Fibras de sisal secas com comprimento de aproximadamente 15 cm.   | 62 |
| FIG. 3.18 | Primeira camada de resina na matriz metálica.....   | 62 |
| FIG. 3.19 | Deposição da camada de fibras de sisal alinhadas sobre a resina.....  | 63 |
| FIG. 3.20 | Última camada de resina sobre as fibras de sisal.....   | 63 |
| FIG. 3.21 | Placa compósita submetida à pressão para a cura.....  | 63 |
| FIG. 3.22 | Resultado final da placa compósita epóxi-fibra de sisal.....  | 64 |
| FIG. 3.23 | Resultado final da placa compósita epóxi-tecido de sisal.....   | 64 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| FIG. 3.24 | Provete com calibre 7,62 mm dotado de mira laser.....  | 65 |
| FIG. 3.25 | Mira laser do provete calibre 7,62 mm.....   | 65 |
| FIG. 3.26 | Dispositivo de fixação do alvo na plastilina.....  | 65 |
| FIG. 3.27 | Blindagem multicamadas com compósito de fibra de sisal.....  | 66 |
| FIG. 3.28 | Blindagem multicamadas com compósito de tecido de sisal.....   | 67 |
| FIG. 3.29 | Medição da profundidade da indentação gerada na plastilina após os ensaios balísticos.....   | 68 |
| FIG. 3.30 | Microscópio eletrônico de varredura modelo Quanta FEG 250.....   | 69 |
| FIG. 3.31 | Equipamento de deposição de platina marca LEICA, modelo EM ACE600.....   | 69 |
| FIG. 4.1  | Blindagem multicamada com compósito epóxi-fibra de sisal antes do impacto balístico.....   | 72 |
| FIG. 4.2  | Blindagem multicamada com compósito epóxi-tecido de sisal antes do impacto balístico.....  | 72 |
| FIG. 4.3  | Blindagem multicamada com compósito epóxi-fibra de sisal após o impacto balístico.....   | 73 |
| FIG. 4.4  | Blindagem multicamada com compósito epóxi- tecido de sisal após o ensaio balístico.....  | 73 |
| FIG. 4.5  | Gráfico de distribuição de Weibull das indentações para as placas compósitas de epóxi reforçado com fibra de sisal.....                              | 77 |
| FIG. 4.6  | Gráfico de distribuição de Weibull das indentações para as placas compósitas de epóxi reforçado com tecido de sisal.....                             | 77 |
| FIG. 4.7  | Gráfico de distribuição de Weibull das velocidades limites para as placas compósitas de epóxi reforçadas com fibra de sisal.....                     | 80 |
| FIG. 4.8  | Gráfico de distribuição de Weibull das velocidades limites para as placas compósitas de epóxi reforçadas com tecido de sisal.....                    | 80 |
| FIG. 4.9  | Gráfico de pontos experimentais do ensaio de velocidade residual do compósito de tecido de sisal.....  | 82 |
| FIG. 4.10 | Micrografia obtida no MEV da superfície típica de fratura do compósito de epóxi reforçado com fibras de sisal. Aumento de 150x                       | 87 |
| FIG. 4.11 | Micrografia obtida no MEV da superfície do compósito de epóxi reforçado com fibras de sisal recoberto por fragmentos cerâmicos. Aumento de 500x..... | 88 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| FIG. 4.12 | Delaminação e rompimento das fibras do compósito reforçado com fibras de sisal.....   | 88 |
| FIG. 4.13 | Micrografia obtida no MEV da superfície típica de fratura do compósito de epóxi reforçado com tecido de sisal. Aumento de 500x..... | 89 |
| FIG. 4.14 | Blindagem de compósito reforçado com tecido de sisal após ensaio balístico.....   | 89 |
| FIG. 4.15 | Característica da fratura intergranular dos corpos cerâmicos. Aumento 10000x.....   | 90 |

## LISTA DE TABELAS

|          |   |    |
|----------|---|----|
| TAB. 2.1 | Níveis de proteção.....   | 23 |
| TAB. 2.2 | Densidades e propriedades mecânicas de algumas fibras naturais e da aramida.....  | 34 |
| TAB. 3.1 | Análise química da alumina.....   | 50 |
| TAB. 3.2 | Análise química da nióbia HP.....   | 50 |
| TAB. 3.3 | Propriedades do PEG.....  | 51 |
| TAB. 3.4 | Propriedades da fibra de sisal.....   | 51 |
| TAB. 3.5 | Especificações do alumínio.....   | 54 |
| TAB. 4.1 | Valores de espessura, densidade, retração linear e densificação dos cerâmicos sinterizados.....   | 70 |
| TAB. 4.2 | Tipo de camada intermediária, valores de indentação, velocidade de impacto do projétil, energia de impacto e a espessura desta camada..                                   | 74 |
| TAB. 4.3 | Valores médios obtidos na caracterização das camadas intermediárias das blindagens multicamadas nos e ensaios balísticos  | 75 |
| TAB. 4.4 | Parâmetros de Weibull obtidos dos resultados balísticos das blindagens multicamadas com placa compósita reforçada com fibra e tecido de sisal.....                        | 78 |
| TAB. 4.5 | Valores das velocidades médias de impacto e residual, energia absorvida e velocidade limite para cada componente do sistema de blindagem multicamadas.....                | 79 |
| TAB. 4.6 | Parâmetros de Weibull obtidos dos resultados dos ensaios de velocidade residual para a placa compósita reforçada com fibra e tecido de sisal.....                         | 81 |
| TAB. 4.7 | Valores da velocidade da onda de choque e dos parâmetros característicos de cada material.....  | 83 |
| TAB. 4.8 | Valores do módulo de elasticidade e da onda elástica do compósito epóxi-sisal.....  | 83 |
| TAB. 4.9 | Valores da velocidade de partícula, pressão e velocidade de onda de choque nas interfaces de cada componente da blindagem multicamada e a natureza da onda de choque..... | 84 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| TAB. 4.10 | Valores de densidade, módulo de elasticidade, velocidade das onda refletidas e impedância de choque nas interfaces da blindagem multicamada..... | 85 |
| TAB. 4.11 | Relação de custo dos componentes utilizados na blindagem.....  | 86 |
| TAB. 4.12 | Comparativo de custo e peso total das blindagens multicamada.....  | 86 |

## LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

### ABREVIATURAS

|        |  |
|--------|--|
| CAEx   | Centro de Avaliações do Exército         |
| FNL's  | Fibras Naturais Lignocelulósicas         |
| IME    | Instituto Militar de Engenharia          |
| MAS    | <i>Multilayered armor systems</i>        |
| MEV    | Microscópio Eletrônico de Varredura      |
| NIJ    | <i>National Institute of Justice</i>     |
| PEG    | Polietileno Glicol                       |
| PEUAPM | Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular |

### SÍMBOLOS

|                          |   |
|--------------------------|---|
| $R^2$                    | Coefficiente de correlação                          |
| S                        | Constante do material                               |
| $\rho$                   | Densidade do material                               |
| $\rho_{\text{sint}}$     | Densidade do material sinterizado                   |
| $E_{\text{abs}}$         | Energia absorvida                                   |
| $e_{\text{sinterizado}}$ | Espessura do corpo cerâmico verde                   |
| $e_{\text{verde}}$       | Espessura do corpo cerâmico sinterizado             |
| $V_m$                    | Fração em volume da matriz                          |
| $V_f$                    | Fração em volume de fibra                           |
| $d\sigma/de$             | Inclinação da curva tensão <i>versus</i> deformação |
| $\gamma$                 | ndice adiabático                                   |
| M                        | Massa do material cerâmico                          |
| $E_f$                    | Módulo de elasticidade da fibra                     |
| $E_{\text{sisal}}$       | Módulo de elasticidade do sisal                     |
| $E_m$                    | Módulo de elasticidade da matriz                    |
| $E_c$                    | Módulo de elasticidade do compósito                 |
| $E_{\text{epóxi}}$       | Módulo de elasticidade do epóxi                     |
| $\beta$                  | Módulo de Weibull                                   |
| P                        | Pressão   |
| $\theta$                 | Unidade característica                              |

|       |                               |
|-------|-------------------------------|
| $R_L$ | Retração linear               |
| $U_s$ | Velocidade da onda de choque  |
| $C_o$ | Velocidade da onda elástica   |
| $V_p$ | Velocidade da onda plástica   |
| $V_i$ | Velocidade de impacto         |
| $U_p$ | Velocidade de partícula       |
| $C$   | Velocidade do som no material |
| $V_L$ | Velocidade limite             |
| $V_r$ | Velocidade residual           |
| $V$   | Volume específico             |

## RESUMO

As blindagens multicamadas são capazes de aliar proteção efetiva com considerável redução de peso. Essas blindagens são formadas pela combinação de materiais com propriedades diferentes e complementares, que são responsáveis por evitar a penetração do projétil. Um sistema de blindagem multicamadas típico geralmente é composto por uma camada de material cerâmico, uma camada de tecido de aramida, e por fim uma terceira camada metálica. O material cerâmico tem a função desgastar a ponta do projétil, dissipando grande parte da energia cinética. Já a camada de tecido de aramida tem a função absorver parte da energia remanescente dos fragmentos produzidos, e a camada de material metálico absorve a energia residual dos fragmentos através da deformação plástica. Este trabalho propõe a substituição da camada de tecido de aramida por camadas de compósitos de epóxi reforçados com fibra de sisal ou tecido de sisal, na proporção de 30% em volume de fibra ou tecido. Ensaio de impacto balístico com munição calibre 7,62 x 51 mm e velocidade de impacto superior a 800 m/s indicaram que os compósitos reforçados com sisal (nas duas configurações) atenderam as especificações da norma internacional NIJ 0101.04. As indentações medidas na plastilina, após os ensaios balísticos, indicaram que o compósito de epóxi reforçado com tecido de sisal (16,03 mm) apresentou melhor desempenho balístico quando comparado com o compósito reforçado com fibras de sisal (18,17 mm). Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura apontaram ruptura frágil da matriz de epóxi, interação das fibras de sisal com os fragmentos da camada cerâmica e delaminação dos compósitos reforçados por fibras unidirecionais. Esses mecanismos contribuem para dissipar a energia de impacto do projétil. Além do mais, a substituição do tecido de aramida por compósitos de epóxi reforçados com sisal, proporciona redução de peso da blindagem (3,89%) além da redução de custos (39,95%).

## ABSTRACT

The multilayer's armors are able to combine effective protection with considerable weight reduction. These armors are formed by the combination of materials with different and complementary properties, which are responsible for preventing the penetration of the projectile. A typical multilayer armor system is generally composed of a ceramic layer, an aramid fabric layer, and ultimately a third metal layer. The ceramic layer has the function wearing the tip of the projectile, dissipating much of the kinetic energy. Since the aramid fabric layer has the function of absorbing the remaining energy of the fragments produced and the metal material layer absorbs the residual energy of the fragments through plastic deformation. This work proposes the replacement of the aramid fabric layer with layers of sisal reinforced epoxy composite with fiber or fabric of sisal in a proportion of 30% by volume of fiber or fabric. Ballistic impact tests with ammunition caliber 7.62 x 51 mm and impact speed exceeding 800 m/s indicated that the composites reinforced with sisal (in both configurations) met the specifications of the international standard NIJ 0101.04. The deformation depths in the clay witness measures, after ballistic tests, showed that the epoxy composite reinforced with sisal's fabric (16.03 mm) showed better performance than the ballistic sisal fibers composite (18.17 mm). Micrographs obtained by scanning electron microscopy show brittle fracture of epoxy matrix, interaction of sisal fibers with the ceramic layer fragments, and delamination of composites reinforced by unidirectional fibers. These mechanisms contribute to remove the bullet impact energy. Moreover the replacement of aramid fabric for sisal reinforced epoxy composite provides weight reduction of the shield (3.89%) and the cost reduction (39.95%).

# 1 INTRODUÇÃO

Operações militares modernas, tecnologias orientadas para as táticas de guerra, e as atuais armas e munições que se encontram ilegalmente nas ruas exigem o desenvolvimento de sistemas avançados de blindagens balísticas para proteção individual. Tais sistemas devem ser resistente, flexíveis, com grande capacidade de absorção de energia e leves (DAVID, GAO e ZHENG, 2009).

Uma série de estudos relativos aos novos conceitos e modelos de materiais para blindagens corporal têm sido realizados nas últimas duas décadas para atender às novas demandas. Tecidos balísticos, cerâmicas e compósitos laminados estão entre os principais materiais utilizados em projetos modernos de blindagens (DAVID, GAO e ZHENG, 2009).

Sistemas de proteção balística de alto desempenho são normalmente compostos por diferentes camadas de materiais, sendo que cada camada proporciona um papel específico na atenuação da energia do projétil. Tipicamente, um material duro, como um material cerâmico, é colocado como a primeira camada de impacto com o projétil e uma camada de material mais leve, como a aramida ou um compósito de matriz polimérica, é colocada posteriormente (AVILA, PORTANOVA e RABIEI, 2014). Por fim, um sistema de blindagem de alto desempenho completo pode incorporar uma terceira camada metálica adicional como última camada desse sistema.

David, Gao e Zheng (2009) reportaram que as nanopartículas e os compósitos reforçados com fibras naturais são os materiais candidatos para a nova geração de sistemas de blindagens corporal.

Este trabalho propõe a substituição da camada intermediária de sistemas de proteção balística de alto desempenho, que normalmente é o tecido de aramida, por uma camada de material compósito reforçado com a fibra vegetal de sisal, na configuração de fibra e tecido.

As fibras naturais como linho, cânhamo, kenaf, juta e sisal tem uma série de vantagens, custo-benefício e ecológicas, em relação às fibras de vidro. A combinação de propriedades mecânicas e físicas, juntamente com o caráter ambientalmente correto, tem motivado uma série de setores industriais a considerar essas fibras como potenciais

candidatos para substituir as fibras de vidro em produtos ambientalmente seguros. As fibras naturais vegetais são abundantes, renováveis, baratas, recicláveis, biodegradáveis, apresentam baixa densidade e a extensão da poluição ambiental causada é menor em comparação com fibras sintéticas (GEORGE, SREEKALA e THOMAS, 2001).

Sendo assim, a obtenção de um sistema de blindagem multicamadas, utilizando compósitos reforçados com fibras vegetais, tem o objetivo de otimizar a proteção individual, com materiais leves e de baixo custo, da mesma forma que contribui com o desenvolvimento sustentável, por meio da inclusão de material renovável.

De acordo com a norma internacional NIJ 0101.04 uma blindagem destinada à proteção individual, como o colete, é considerada eficiente, quando a indentação provocada na plastilina, material argiloso que simula a consistência do corpo humano, após os testes de ensaios balísticos, não ultrapassa o valor de 44 mm.

No presente trabalho, foi realizada a avaliação do desempenho balístico de blindagens multicamadas através da indentação gerada na plastilina e a absorção da energia cinética relacionada a cada camada da blindagem. Esse sistema de blindagem foi constituído de uma camada frontal de cerâmica ( $Al_2O_3$ ), seguida de um compósito de epóxi reforçado com fibras ou tecido de sisal, e uma placa de alumínio. Foram avaliados também os aspectos da fratura dos corpos de prova por meio da microscopia eletrônica de varredura.

## 1.1. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais do IME já investe na área de blindagem balística, com o objetivo de se descobrir materiais que possam agregar no que diz respeito à proteção balística, uma vez que essa área é de grande interesse para o Exército Brasileiro. Esse trabalho é uma forma de dar continuidade as novas abordagens tecnológicas que buscam materiais alternativos, renováveis e de baixo custo, para exercer com eficiência a proteção individual.

## 1.2. OBJETIVO DO ESTUDO

### 1.2.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar e comparar a eficiência balística dos sistemas de blindagens multicamadas confeccionados. Os sistemas de blindagens foram fabricados com dois tipos diferentes de camadas intermediárias: compósito de epóxi reforçado com 30% em volume de fibras de sisal e compósito de epóxi reforçado com 30% em volume de tecido de sisal.

### 1.2.2. Objetivos específicos

1) Verificar se a eficiência balística para os materiais testado como camada intermediária da blindagem multicamadas atende a norma internacional NIJ 0101.04 (2000).

2) Comparar o desempenho balístico das blindagens que utilizaram os compósitos como camada intermediária neste trabalho, com os resultados obtidos para as blindagens com os compósitos de epóxi reforçado com 30% em volume de fibras de curauá (SILVA, 2014a), e de epóxi reforçado com 30% em volume de fibras de juta, além do tecido de aramida (LUZ, 2014).

3) Comparar o desempenho individual através da velocidade limite dos compósitos utilizados como camada intermediária.

4) Comparar as energias cinéticas absorvidas individualmente e associar com o desempenho balístico das placas de compósito epóxi-sisal, com os resultados obtidos por Silva (2014a) e Luz (2014) para os compósitos de epóxi reforçado com curauá e juta, e também para o tecido de aramida.

5) Associar o desempenho balístico com a impedância dos materiais testados como camada intermediária deste trabalho e de trabalhos anteriores.

6) Comparar o peso e o custo dos materiais utilizados na confecção dos sistemas de blindagem multicamadas das camadas intermediárias descritas neste trabalho com o sistema de blindagem que utiliza o tecido de aramida.

7) Analisar as superfícies fraturadas nos ensaios balísticos por meio da análise das micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura, com o intuito de verificar os mecanismos de absorção de energia.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BLINDAGEM BALÍSTICA

Segundo Meyers (1994) a blindagem corporal destina-se a proteger os indivíduos, principalmente, contra fragmentos e projéteis de armas, dessa forma a tecnologia de blindagem é vital tanto no atual cenário da guerra moderna como no cenário de guerrilha urbana, que se alastra por diversas cidades ao redor do mundo. O crescente avanço das tecnologias ligadas à produção de armamentos gera a necessidade de estudos para obtenção de tecnologia de fabricação de blindagens modernas que possam assegurar proteção adequada aos usuários (SANTOS et al, 2006).

Até a Segunda Guerra Mundial, as blindagens eram compostas basicamente de material metálico, no entanto o desenvolvimento dos projéteis forçou a utilização de blindagens grandes e pesadas. Uma forma solucionar essa situação foi à introdução de novas combinações de materiais leves e com melhor desempenho balístico, tais como compósitos de fibras e materiais cerâmicos (BÜRGER et al, 2012).

As fibras mais utilizadas para proteção balística são as fibras de vidro, aramida e o polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM) (BÜRGER et al, 2012; JACOBS e DINGENEN, 2001), sendo que de acordo com Jacobs e Dingenen (2001) essas fibras de alta resistência revolucionaram os projetos de blindagens leves, e elas são utilizadas para reforçar produtos balísticos como: capacetes, coletes, mantas e blindagens para carros.

Atualmente as blindagens mistas, também denominadas blindagens multicamadas, são capazes de aliar alta rigidez e resistência específica, com considerável redução de peso (JUNIOR, 2006). Essas blindagens são formadas pela combinação de materiais com propriedades diferentes e complementares, que são responsáveis por evitar a penetração do projétil (SILVA et al, 2014b).

Um sistema de blindagem multicamadas (MAS - *Multilayered Armor Systems*) completo, FIG. 2.1, é geralmente composto de uma camada cerâmica, uma camada de material compósito, e por fim uma terceira camada metálica (MONTEIRO et al, 2014a).

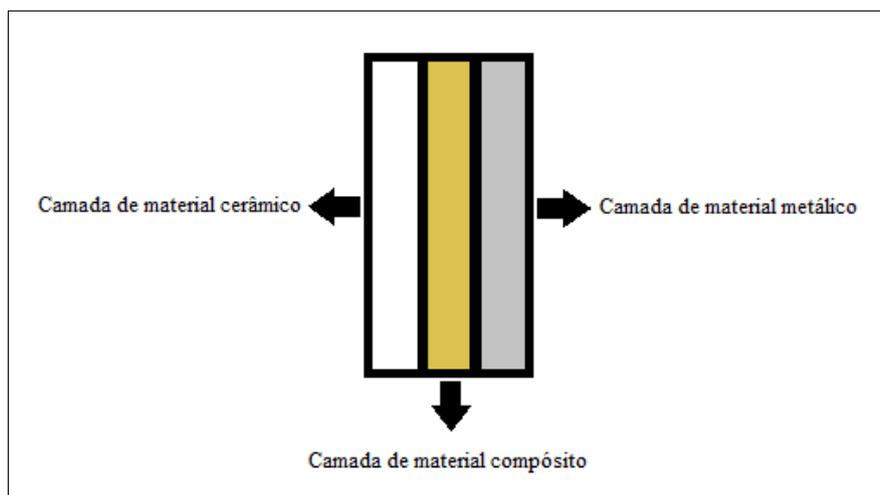


FIG. 2.1: Sistema típico de blindagem multicamadas (MAS)

Os materiais cerâmicos normalmente formam a primeira camada e são aqueles que recebem o impacto inicial do projétil. Sua função é desgastar a ponta do projétil, dissipando grande parte da energia cinética, fragmentando sua massa e melhorando a distribuição da pressão do impacto sobre a segunda camada (SILVA et al, 2014b).

Já a segunda camada, formada pelo material compósito, tem o papel fundamental no comportamento final da blindagem, pois a definição da composição volumétrica específica da fibra e o uso de agentes endurecedores da resina, influenciam diretamente no dano observado na estrutura de proteção após os ensaios (AJDELSZTAJN; BASTIAN, 1999). A função dessa camada é absorver parte da energia remanescente dos fragmentos do projétil e da cerâmica, por meio do descolamento das fibras (ou tecido) da matriz (MONTEIRO et al, 2014a).

Por fim um sistema de blindagem multicamadas completa pode incluir uma terceira camada metálica para agir como uma barreira final; ela tem a função de absorver a energia residual dos fragmentos do projétil e da própria cerâmica através da deformação plástica (SILVA et al, 2014b).

De acordo com a norma 0101.04 do Instituto Nacional de Justiça dos Estados Unidos (NIJ - *National Institute of Justice*) publicada em 2000, as blindagens pessoais são classificadas em níveis de proteção que dependem de sua resistência balística em relação ao calibre da arma. A TAB. 2.1 mostra os diferentes níveis de proteção ao impacto em função do calibre, da massa e da velocidade do projétil.

TAB. 2.1: Níveis de proteção.

| Nível | Calibre      | Massa (g) | Velocidade de referência (m/s) |
|-------|--------------|-----------|--------------------------------|
| I     | .22 LR       | 2,6       | 329                            |
|       | .38 ACP      | 6,2       | 322                            |
| II-A  | 9 mm         | 8,0       | 341                            |
|       | 40 S&W       | 11,7      | 322                            |
| II    | 9 mm         | 8,0       | 367                            |
|       | 357 Mag      | 10,2      | 436                            |
| III-A | 9 mm         | 8,2       | 436                            |
|       | .44 Mag      | 15,6      | 436                            |
| III   | 7,62 mm NATO | 9,7       | 838                            |
| IV    | .30          | 10,8      | 869                            |

Fonte: Adaptado da NIJ 0101.04 (2000).

Assim de acordo com a TAB. 2.1, o sistema de blindagem multicamadas confeccionado neste trabalho objetiva a proteção nível III, que se trata da proteção contra munições de alta velocidade com calibre 7,62 x 51 mm.

Segundo Bürger (2012) contra projéteis perfurantes, que é o caso da munição com calibre 7,62 x 51 mm (FIG. 2.2), é necessário que a blindagem agregue uma camada de material cerâmico com a finalidade de promover uma proteção mais eficiente. O uso desses materiais é motivado por eles possuírem elevada resistência a compressão dinâmica e baixa densidade expressiva (LOURO, LINDFORS e MEYERS, 1988).



FIG. 2.2: Munição calibre 7,62 x 51 mm.

Portanto o impacto de um projétil sobre a superfície de uma placa cerâmica gera ondas de choque compressivas que se propagam através dessa placa. Quando essas ondas atingem a superfície livre, elas podem ser refletidas como ondas de tração. O cerâmico irá fraturar se a magnitude da onda de tração refletida exceder a resistência de tração dinâmica do material. Devido ao impacto inicial, fendas radiais são formadas no fundo do material cerâmico, e viajam a partir desse fundo para o topo da placa cerâmica. Enquanto isso um cone de fratura é formado na zona de impacto sobre a parte superior da pastilha cerâmica, crescendo para a sua face traseira. No caso de um sistema de blindagem multicamadas, onde o material cerâmico é suportado por um material dúctil ao fundo, parte das ondas compressivas é transmitida para o apoio dúctil, e o restante das ondas são refletidas de volta para a placa cerâmica. A impedância mecânica do suporte dúctil vai determinar a quantidade de ondas de tensão que serão transmitidas a esse material de apoio (KRISHNAN et al, 2010).

Silva e colaboradores (2014b) destacam que os principais materiais cerâmicos utilizados para blindagens balísticas são o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), o carbetto de silício e o carbetto de boro; no entanto a alumina ( $Al_2O_3$ ) é o material de blindagem que apresenta as melhores relações custo-benefício dentre as cerâmicas avançadas, como: módulo de elasticidade elevado, alta dureza, alta refratariedade e viabilidade comercial. Além do mais, a presença de aditivos pode alterar os mecanismos de fratura do material cerâmico, como por exemplo, Madhu e colaboradores (2005) relatam que a nióbia ( $Nb_2O_5$ ), utilizada como aditivo da alumina no presente trabalho, faz com que o mecanismo de fratura da alumina passe de transgranular para intergranular devido à formação de precipitados nos contornos de grãos, aumentando a absorção de energia durante o impacto.

Outro fato importante associado à absorção da energia de impacto foi relatado por Monteiro e coautores (2014b), onde ensaios balísticos com munição 7,62 x 51 mm mostraram que o tecido de aramida logo após uma camada de cerâmica frontal, em uma blindagem multicamadas, foi capaz de dissipar aproximadamente de 36% da energia de impacto do projétil; já com a mesma munição o tecido de aramida sem a placa cerâmica frontal dissipa menos de 2% da energia de impacto. Este comportamento é associado ao mecanismo de absorção de energia cinética da nuvem de fragmentos após o impacto do projétil com a cerâmica; diferente do mecanismo de ruptura das fibras de aramida no ensaio individual, o da captura dos fragmentos por incrustação mecânica associada às

forças de Van der Waals e atração eletrostática, indica ser mais eficiente contra munição 7,62 mm de alta velocidade.

## 2.2 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS VEGETAIS

Ao longo das últimas décadas os polímeros substituíram muitos materiais convencionais em diversas aplicações, e isso se deve principalmente à facilidade de processamento, produtividade e redução de custos (SAHEB e JOG, 1999).

A utilização de fibras sintéticas para o reforço de polímeros é uma técnica muito empregada na indústria para a obtenção de materiais com melhor desempenho mecânico, e a substituição das fibras sintéticas por fibras vegetais é uma possibilidade interessante, uma vez que deste tipo de fibra é de fonte renovável e provoca menor impacto ambiental se comparado com as fibras sintéticas (MATTOSO et al, 1997 apud OLIVEIRA, 2009). Monteiro e colaboradores (2006a) também descrevem que comparativamente com as fibras sintéticas, como a de grafite e aramida, as fibras lignocelulósicas residuais têm a vantagem de serem mais baratas, e esse aspecto pode fazer grande diferença no momento da escolha comercial.

A FIG. 2.3 esquematiza como são constituídos os compósitos fibrosos.

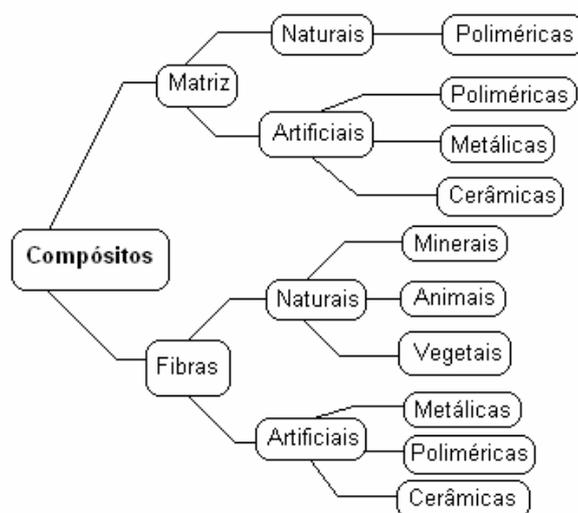


FIG. 2.3: Esquema da constituição dos compósitos fibrosos (PICANÇO, 2005).

Os compósitos de matrizes poliméricas reforçadas por fibras naturais lignocelulósicas já são utilizados em diversos campos de interesse aplicado, incentivando pesquisas científicas e tecnológicas (MONTEIRO et al, 2006b). Além disso, o Brasil é um dos países que possuem uma das maiores biomassas do mundo e a maior extensão territorial cultivável, potenciais estes que podem ser melhores explorados com o estudo desses materiais (MATTOSO et al, 1997 apud OLIVEIRA, 2009).

Em compósitos reforçados com fibras, tanto a fase matriz quanto a fase fibra efetuam papel crucial no desempenho do produto final, sendo que os principais parâmetros que alteram o desempenho dos compósitos são: as propriedades das fibras, a proporção, e a interface fibra-matriz. (SAHEB; JOG, 1999).

Dentre esses parâmetros, um dos aspectos mais importantes para proporcionar um ótimo desempenho mecânico dos compósitos é a otimização da ligação interfacial entre a fibra e a matriz polimérica (SAHEB e JOG, 1999; BLEDZKI e GASSAN, 1999; GEORGE, SREEKALA e THOMAS, 2001), pois uma vez que as fibras e as matrizes são quimicamente diferentes, a adesão forte em suas interfaces é necessária para uma transferência eficaz de tensão (GEORGE, SREEKALA e THOMAS, 2001).

Outro aspecto importante é a estabilidade térmica das fibras, pois as fibras lignocelulósicas consistem principalmente de lignina, hemicelulose e celulose, dessa forma, as paredes celulares das fibras podem sofrer pirólise com o aumento da temperatura de processamento (SAHEB; JOG, 1999).

George, Sreekala e Thomas (2001) relataram que a combinação de uma matriz de plástico reforçada por fibras dá origem a compósitos que possuem as melhores propriedades de cada componente, uma vez que os plásticos são macios, flexíveis e leves em comparação com as fibras, e essa combinação proporciona uma elevada relação resistência-peso para o compósito resultante. Uma grande desvantagem das fibras de celulose é a sua natureza altamente polar, o que as tornam incompatíveis com os polímeros não polares, além disso, a baixa resistência à absorção de umidade faz com que o uso de fibras naturais seja menos atraentes para aplicações exteriores.

Vários tipos de polímeros têm sido utilizados como matrizes para compósitos de fibras naturais, os termofixos mais usados são o poliéster, epóxi e fenólicas, já os termoplásticos são o polietileno, poliestireno e o polipropileno (GEORGE, SREEKALA e THOMAS, 2001).

Fibras naturais lignocelulósicas mais utilizadas como materiais de reforço em compósitos tradicionais, em substituição as fibras sintéticas, como a fibra de vidro, são as fibras de sisal, coco, juta, rami e kenaf (SGRICCIA, HAWLEY e MISRA, 2008). A fibra de sisal, em especial, se destaca entre as fibras foliares em termos de qualidade e de aplicação comercial (OLIVEIRA, 2009).

A fibra de sisal é um reforço promissor para uso em compósitos devido ao seu baixo custo, baixa densidade, não oferecer riscos à saúde, ser de fácil disponibilidade em alguns países, ser facilmente cultivada e possuir elevada renovabilidade. Nos últimos anos, tem havido um grande interesse em descobrir novas aplicações para materiais compósitos reforçados com tais fibras, uma vez que elas são tradicionalmente usadas para a fabricação de cordas, esteiras, tapetes, artigos de luxo e outros (LI, MAI e YE, 2000).

Vários são os artigos que reportaram o uso da fibra de sisal para reforçar materiais poliméricos (JOSEPH et al, 1996; RONG et al, 2001; ZHONG e WEI, 2007; FAVARO, et al, 2010; BELAADI et al, 2014). Em especial o artigo de Oksman e colaboradores (2002) abordou a morfologia e as propriedades mecânicas dos compósitos de epóxi-sisal reforçado com fibras unidirecionais. Como esperado, a incorporação das fibras de sisal aumentou significativamente a resistência à tração e módulo de Young da resina epóxi.

Também Martin e coautores (2009) estudaram a fibra de sisal brasileira, da variedade *Agave sisalana*, e em suas pesquisas concluíram que ela apresenta propriedades mecânicas dentro da faixa relatada na literatura, mostrando-se adequada para ser utilizada em materiais compósitos poliméricos.

### 2.3 FIBRAS NATURAIS LIGNOCELULOSICAS

As fibras naturais são subdivididas de acordo com as suas origens, elas podem ser provenientes de plantas, animais ou minerais (BLEDZKI e GASSAN, 1999). As fibras naturais obtidas a partir de vegetais são conhecidas como fibras naturais lignocelulosicas (FNLs), este termo é comumente utilizado na literatura, e indica a predominância de lignina e celulose na estrutura das fibras (MONTEIRO et al, 2011).

Segundo Silva (2003) as FNLs também podem ser classificadas de acordo com sua origem, e são agrupadas em fibras de semente, caule, folha e fruto, conforme FIG. 2.4.

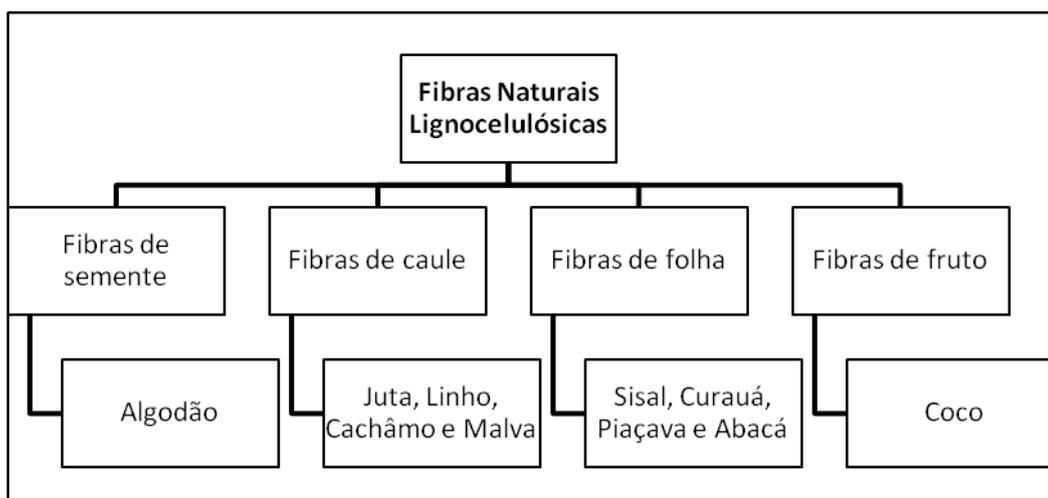


FIG. 2.4: Classificação de acordo com a origem das FNLs.

No quesito socioambiental, as FNLs são muito importantes, pois muitas são nativas ou cultivadas em regiões em desenvolvimento e representam uma importante fonte de renda para a população local (SATYANARAYANA, GUIMARÃES e WYPYCH, 2007; MONTEIRO et al, 2011). Além disso, tais fibras são renováveis, biodegradáveis, recicláveis e neutras em relação às emissões de CO<sub>2</sub>, contribuindo para a prevenção do aquecimento mundial (MONTEIRO et al, 2009; MONTEIRO et al, 2011). Possuem baixa densidade, elevada flexibilidade (MONTEIRO et al, 2011), não proporcionam problemas à saúde, em comparação com as fibras sintéticas, possuem facilidade de modificação superficial e são muito mais baratas do que as fibras sintéticas. Esses fatores justificam o aumento do uso das FNLs para reforços em compósitos (JOSEPH et al, 1996).

As fibras vegetais são constituídas por células individuais (microfibras) unidas umas às outras por meio da lamela intermediária, que é constituída de hemicelulose e lignina. Cada microfibras é formada por um número de camadas, contendo fibrilas que são compostas por cadeias moleculares de celulose. Essas fibrilas se apresentam, em cada camada sob a forma de espiral com ângulos de inclinação variáveis, que têm influência sobre o desempenho mecânico da fibra. A FIG. 2.5 apresenta um esquema de uma microfibras, onde podem ser vistas as camadas primária e secundária (GRAM, 1983 apud PIKANÇO, 2005).

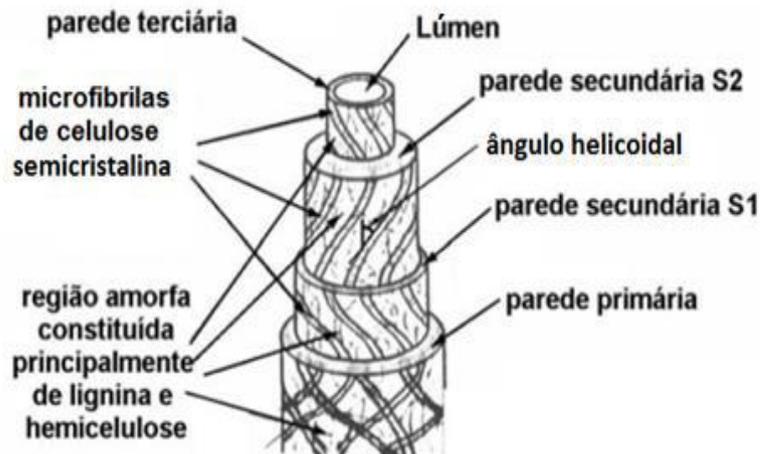


FIG. 2.5: Esquema de uma fibrila (JOHN e THOMAS, 2008) (adaptado).

A região central da fibra apresenta uma cavidade denominada lúmen, que é a grande responsável pela elevada absorção de água e baixa massa específica aparente, características comuns das fibras vegetais; além de fornecer os minerais básicos para o crescimento celular (PICANÇO, 2005).

A hemicelulose é responsável pela biodegradação, absorção de umidade e degradação térmica das fibras vegetais (SAHED e JOG, 1999)

A celulose é um polímero glucano hidrófilo consistindo de uma cadeia linear que contém grupos hidroxilo alcoólicos. Estes grupos hidroxilo formam ligações de hidrogênio intramoleculares, dentro da própria macromolécula e entre outras macromoléculas de celulose, bem como com os grupos hidroxilo provenientes do ar. Portanto as fibras naturais são de natureza hidrofílica (MOHANTY, MISRA e HINRICHSEN, 2000).

A lignina é um polímero que funciona como um material de suporte estrutural em plantas. Durante a síntese da parede celular das plantas, polissacarídeos tais como celulose e hemicelulose são fixados por um lado, e a lignina preenche os espaços entre as fibras de polissacarídeos, cimentando-os juntos. Este processo provoca um endurecimento da parede celular (MOHANTY, MISRA e HINRICHSEN, 2000).

Assim o reconhecimento de FNLs como uma nova classe de materiais, em uma posição privilegiada entre os materiais de engenharia, conforme FIG. 2.6, tem contribuído para novas aplicações. Quando é possível selecionar fibras mais finas, podem-se associar esses materiais a aplicações de alta resistência (MONTEIRO et al, 2011).

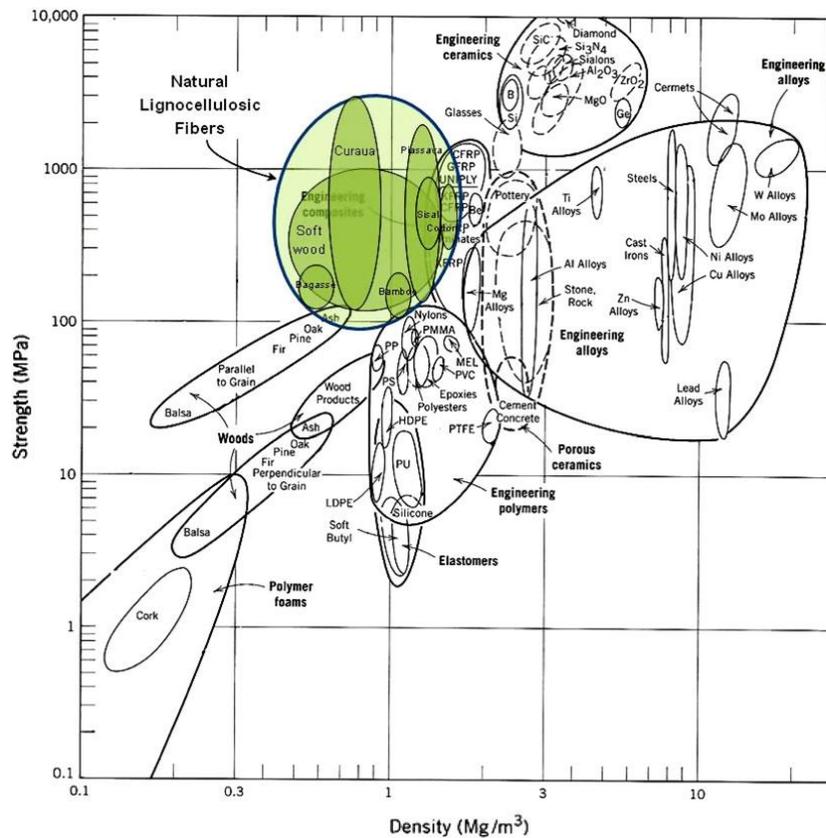


FIG. 2.6: O campo FNLs em um diagrama de Ashby de tensão vs densidade (MONTEIRO et al, 2011).

Uma característica que pode limitar o uso das FNLs, é que suas propriedades podem variar consideravelmente, pois isto depende se a fibra é produzida a partir de hastes ou folhas, a qualidade da localização, a idade da planta, o pré-condicionamento e o processo de extração (MONTEIRO et al, 2011).

As fibras lignocelulósicas são microestruturalmente não uniforme ao longo de toda a orientação tridimensional. Esta é uma diferença marcante entre esse tipo de fibra e as fibras sintéticas. Observa-se também que a densidade de irregularidades em fibras lignocelulósicas varia de acordo com o diâmetro equivalente. Seções transversais menores apresentam comparativamente menor densidade de irregularidades, tanto na superfície, quanto no interior do volume da fibra; como consequência, as fibras mais finas tendem a ser mais homogênea do que as mais grossas da mesma espécie (MONTEIRO et al, 2011).

### 2.3.1 Fibras de sisal

As fibras de sisal são obtidas das folhas da planta *Agave sisalana* (FIG. 2.7), que se originou no México e agora é principalmente cultivada no leste da África, Brasil, Haiti, Índia e Indonésia.



FIG. 2.7: Plantação de sisal (*Agave sisalana*) (Disponível em: <[http://www.cosibra.com.br/processos\\_estrutura.php](http://www.cosibra.com.br/processos_estrutura.php)>. Acesso em 16 de dezembro de 2014).

Segundo Martin e colaboradores (2009) o sisal é a principal fibra dura (fibra monocotiledônea) produzida no mundo, correspondendo a aproximadamente 70% da produção comercial de todas as fibras desse tipo. No Brasil, seu cultivo é principalmente na região Nordeste.

O cultivo da *Agave sisalana* concentra-se em áreas de pequenos produtores, com predomínio do trabalho familiar. Assim, além do sisal constituir uma fonte de renda e emprego para um grande contingente de trabalhadores, seu cultivo é um importante agente de fixação do homem à região semiárida nordestina, sendo, em algumas dessas regiões, a única alternativa de cultivo com resultados econômicos satisfatórios (MARTIN et al, 2009).

A colheita do sisal, normalmente, é feita após 5 ou 6 anos do plantio, e a vida útil da planta é estimada em 25 anos. Para a extração das fibras cortam-se as folhas de baixo para cima, de forma que ainda reste entre 12 e 18 folhas na planta, sendo que essa colheita pode ser executada várias vezes durante o ano (PICANÇO, 2005).

As fibras são extraídas das folhas que possuem de 8 a 10 cm de largura e de 150 a 200 cm de comprimento. De cada folha obtém-se cerca de 3 a 5% do seu peso em fibra. Os 95 a 97% restantes constituem os chamados resíduos do beneficiamento, que são utilizados pela indústria farmacêutica, ou como adubo orgânico e ração animal (MARTIN et al, 2009)

De acordo com Picanço (2005) as fibras de sisal encontram-se incrustadas no cerne das folhas. A retirada das fibras é feita com a descamação, esmagamento e raspagem do das folhas em conjunto com um jato de água (FIG. 2.8), seguida de secagem ao ar (FIG. 2.9). Estes processos podem ser efetuados de forma mecânica ou artesanal (MARTIN et al, 2009).



FIG. 2.8: Raspagem mecânica das folhas de sisal por meio da máquina desfibrador (Disponível em: <[http://www.cosibra.com.br/processos\\_estrutura.php](http://www.cosibra.com.br/processos_estrutura.php)>. Acesso em 16 de dezembro de 2014).



FIG. 2.9: Secagem ao ar das fibras de sisal (Disponível em: <[http://www.cosibra.com.br/processos\\_estrutura.php](http://www.cosibra.com.br/processos_estrutura.php)>. Acesso em 16 de dezembro de 2014).

Por fim, após a secagem das fibras, é realizado o penteamento e estiragem, conforme FIG. 2.10.



FIG. 2.10: Penteamento e estiragem das fibras (Disponível em: <[http://www.cosibra.com.br/processos\\_estrutura.php](http://www.cosibra.com.br/processos_estrutura.php)>. Acesso em 16 de dezembro de 2014).

Essas fibras são utilizadas principalmente para confecção de cordéis, sacos, alguns tipos de tecidos, barbantes para embalagem, reforço para cabo de arame, canos, passadeiras, tapetes, estofamento, redes de pesca, artigos de luxo e reforços em compósitos (MUKHERJEE e SATYANARAYANA, 1984; PICANÇO, 2005).

A FIG. 2.11 possibilita a vista da fibra lignocelulósica de sisal, sem tratamento superficial, obtida no microscópio eletrônico de varredura.

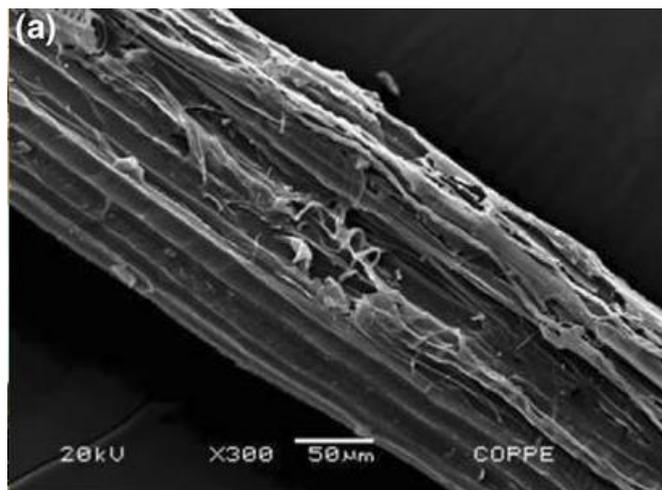


FIG. 2.11: Aspecto superficial da fibra de sisal obtida por microscopia eletrônica de varredura. Aumento de 300x. (MONTEIRO et al, 2011).

Nota-se que a fibra de sisal possui considerável rugosidade superficial, que para aplicações em materiais compósitos pode contribuir para adesão da interface fibra-matriz. (MONTEIRO et al, 2011).

Na TAB. 2.2 é possível comparar as principais propriedades mecânicas da fibra de sisal com as das principais fibras lignocelulósicas e com a fibra de aramida.

TAB. 2.2: Densidades e propriedades mecânicas de algumas fibras naturais e da aramida.

| <b>Fibra</b> | <b>Densidade<br/><math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Resistência à<br/>tração <math>\sigma</math> (Mpa)</b> | <b>Módulo de<br/>Young (Gpa)</b> | <b>Referências</b>   |
|--------------|---|---|----------------------------------|--|
| Sisal        | 1,26 a 1,50   | 287 a 913   | 9 a 28                           | BLEDZKI e GASSAN, 1999;<br>MOHANTY et al, 2000;<br>SATYANARAYANA et al,<br>2007; MONTEIRO et al, 2011              |
| Bambu        | 1,03 a 1,21   | 106 a 204   | 48 a 89-                         | MONTEIRO et al, 2011<br>NETRAVALI e CHABBA, 2003   |
| Curauá       | 0,57 a 0,92   | 117 a 3000  | 27 a 80                          | SATYANARAYANA et al,<br>2007; MONTEIRO et al, 2011   |
| Cânhamo      | 1,07  | 389 a 690   | 35                               | NABI SAHED e JOG, 1999;<br>EICHHORN, 2001  |
| Juta         | 1,30 a 1,45   | 393 a 800   | 13 a 27                          | BLEDZKI e GASSAN, 1999;<br>NABI SAHED e JOG, 1999;<br>SATYANARAYANA et al,<br>2007; MONTEIRO et al, 2011           |
| Linho        | 1,30 a 1,50   | 344 a 1035  | 26 a 28                          | BLEDZKI e GASSAN, 1999;<br>EICHHORN, 2001  |
| Rami         | 1,5   | 400 a 1620  | 61 a 128                         | BLEDZKI e GASSAN, 1999;<br>MOHANTY et al, 2000;<br>EICHHORN, 2001;<br>SATYANARAYANA et al,<br>2007; MONTEIRO, 2011 |
| Aramida      | 1,44  | 3000 a 4100   | 63 a 131                         | KLASON et al, 1984; BLEDZKI<br>e GASSAN, 1999  |

Fonte: Adaptado de Monteiro et al (2011).

Em relação aos custos, as fibras de sisal são muito mais baratas se comparadas com as fibras sintéticas. O preço da fibra de sisal (0,41 \$ / kg) (CONAB, 2012) corresponde a aproximadamente 13% do preço da fibra de vidro (3,25 US \$ / kg) e menos que 1% do preço da fibra de aramida (63,60 \$ / kg) (LI, MAI e YE, 2000).

## 2.4 MATRIZES POLIMÉRICAS

Os polímeros apresentam significativas vantagens em relação aos demais materiais, como fácil processamento, baixo custo, alta produtividade e versatilidade (JUNIOR, 2006).

Os materiais empregados como agentes de reforço, na preparação de compósitos de matriz polimérica, podem ser classificados como reforço particulado ou reforço fibroso. O uso de reforço fibroso promove um aumento significativo na resistência mecânica e na rigidez das matrizes poliméricas. Os compósitos reforçados com materiais fibrosos, normalmente, são preparados a partir de fibras de alto módulo de elasticidade e resistência mecânica. Em geral, as fibras são os principais membros de solicitação mecânica, enquanto a vizinhança da matriz as mantém na localização e direção desejada, agindo como um transportador médio de carga e protegendo as fibras de danos ambientais decorrentes de altas temperaturas e umidade, por exemplo (FROLLINI, 2002).

Desta forma, fibras e matriz conservam suas identidades químicas e físicas e produzem uma combinação de propriedades que não podem ser conseguidas com um dos componentes agindo sozinho (PAIVA e FROLLINI, 2002).

A resina epoxídica é um polímero bastante utilizado como matriz curada na preparação de materiais compósitos (AMARAL et al, 2001). A resina curada apresenta ligações químicas cruzadas, que podem ser formadas à temperatura ambiente ou em altas temperaturas, dando origem a um polímero termorrígido (SILVA, 2009).

Margem (2013) afirma que os materiais termorrígidos apresentam algumas vantagens em relação aos polímeros termoplásticos, entre elas está o aumento da molhabilidade, através da facilitação de incorporação de cargas ou componentes reforçadores, pois antes da cura a viscosidade é baixa, uma vez que a resina encontra-se na forma de monômeros ou oligômeros.

Quanto à estabilidade química, o epóxi é um dos termorrígidos mais inertes e possui boa estabilidade dimensional em serviço, uma vez que após a cura, os sistemas epóxi apresentam pequena contração, em média na ordem de 2%. (PIRES et al, 2005)

As principais características da resina de epóxi são: estabilidade térmica, resistência a solventes, boa adesão e fácil processamento. Tendo assim como uma de suas

aplicações típicas, o uso como matrizes para compósitos com reforço de fibras (AMARAL et al, 2001; PIRES et al, 2005; ASKELAND e PHULE, 2008)

## 2.5 COMPÓSITOS PARA PROTEÇÃO BALÍSTICA COM TECIDOS DE FIBRAS

As blindagens individuais confeccionadas de compósitos que usam tecidos, como o colete de proteção individual, tem a função de impedir que o projétil atravesse totalmente a blindagem, bem como evitar que o impacto induza um abaulamento significativo na sua face posterior, pois, tal deformação pode muitas vezes ocasionar graves lesões ao usuário, mesmo que o projétil não perfure a blindagem. Estudos realizados por Gopinath, Zheng e Batra (2012) afirmam que a magnitude da protuberância gerada na blindagem pode ser reduzida através da incorporação de camadas de material fibroso.

Como reforço fibroso, algumas das fibras naturais lignocelulósicas podem ser encontradas na forma de mantas de fios picados e tecidos (SILVA et al, 2010), sendo que os tecidos tramados são os mais comuns como reforço de plásticos, principalmente em compósitos de alto desempenho (CARVALHO, 2005). Segundo John e Thomas (2008) existem quatro tipos principais de tecidos tramados, FIG. 2.12:

- Simples: cada fibra urdidura passa alternadamente por baixo e por cima de cada fibra de trama, assim o tecido é simétrico, com uma boa estabilidade e porosidade razoável (FIG. 2.12a).

- Sarja: uma ou mais fibras da urdidura tecem alternadamente por cima e em duas ou mais fibras da trama, de maneira regular e repetida. O tecido também tem uma superfície lisa e propriedades mecânicas ligeiramente mais elevadas (FIG. 2.12b).

- Cetim: essa trama é fundamentalmente a trama sarja modificada para produzir menos interseções de urdidura e trama. Caracterizam-se por ser planas e ter alto grau de maleabilidade (FIG. 2.12c).

- Cesta: é fundamentalmente o mesmo que a trama da simples, exceto que duas ou mais fibras da urdidura alternadamente entrelace com duas ou mais fibras de trama (FIG. 2.12d).

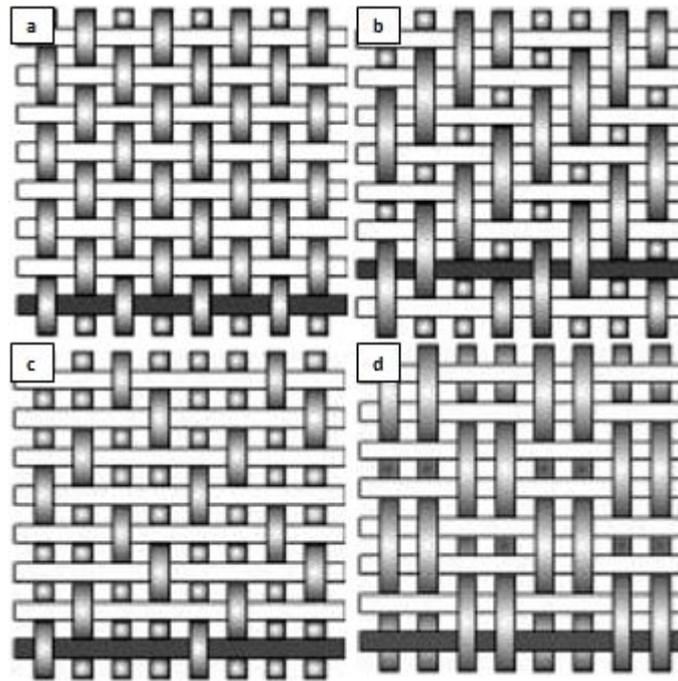


FIG. 2.12: Diferentes tipos de arranjos de fibras: (a) simples; (b) sarja; (c) cetim e (d) cesta. (JOHN e THOMAS, 2008) (Adaptado).

Os compósitos feitos com fibras contínuas e unidirecionais são bem conhecidos por favorecer a delaminação, no sentido das fibras. Dessa forma, os compósitos confeccionados com tecidos, em contrapartida, apresentam maior resistência à fratura, em comparação com os de fibras unidirecionais.

Entre as características únicas e vantajosas desses diferentes tipos de mecanismos de falha, pode-se citar: a aspereza inerente ao tecido; a disponibilidade de regiões ricas em resina entre os fios e entre os tecidos; a propagação de fendas ao longo do padrão ondulante dos fios, criando uma grande área de superfície de fratura e a distribuição das tensões em varias frentes de trincas de delaminação (HOSUR et al, 2004).

Também já foi constatado que compósitos de resina polimérica com tecido podem influenciar de forma significativa o desempenho da estrutura balística, mesmo que a quantidade de matriz presente em tais compósitos seja pequena (cerca de 20-25% em volume). Pois a presença da matriz tem o efeito de gerar grande resistência ao movimento dos fios, mantendo-os unidos (GOPINATH, ZHENG e BATRA, 2012).

## 2.6 COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS MATERIAIS

Os processos que ocorrem quando os corpos estão sujeitos a cargas que variam rapidamente podem ser relevantemente diferentes dos processos que ocorrem em situações estáticas ou quase-estáticas (MEYERS, 1994).

Dessa forma a taxa de variação da força aplicada a um corpo define a natureza do processo como dinâmico ou estático. Para taxas de deformação elevadas, tem-se um comportamento dinâmico, onde o carregamento torna-se um fenômeno localizado que se propaga no sólido como uma onda de tensão, enquanto que taxas de deformação lentas caracterizam um comportamento estático em que o fenômeno de carregamento é experimentado por todo o corpo (MEYERS, 1994 e ZUKAS, 1982)

O comportamento balístico dos materiais depende de mecanismos com alta taxa de deformação envolvida no processo, assim como da resposta dinâmica dos materiais a estes mecanismos. De acordo com o nível de tensão existente no material, pode-se ter como respostas às solicitações externas ondas elásticas, plásticas e de choque (MEYERS, 1994).

Segundo Meyers (1994) quando a tensão, em materiais dúcteis, ultrapassa o limite elástico, ocorre deformação plástica, e isto pode acontecer na forma de deformação dinâmica ou quase estática. Então, quando uma onda de tensão está se propagando no material e sua amplitude excede o limite elástico, ocorre decomposição dessa onda em uma componente elástica e outra plástica. A velocidade da onda plástica é dada pela EQ. 2.1.

$$V_p = \sqrt{\frac{d\sigma/d\varepsilon}{\rho}} \quad \text{Eq. 2.1}$$

Onde  $(d\sigma/d\varepsilon)$  é a inclinação da curva tensão ( $\sigma$ ) *versus* deformação ( $\varepsilon$ ) apresentada na FIG. 2.13, e  $(\rho)$  é a densidade do material (MEYERS, 1994).

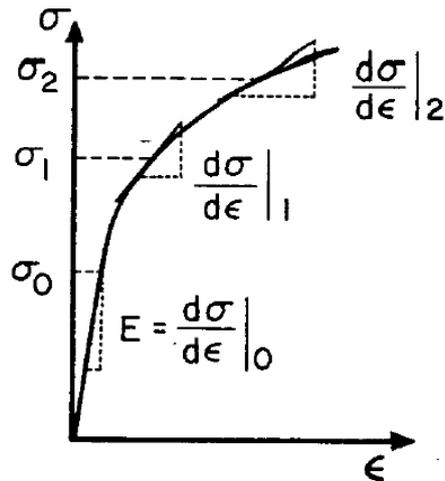


FIG. 2.13: Curva tensão versus deformação em um material dúctil. (MEYERS, 1994).

Já a onda elástica transmite tensões abaixo da tensão de escoamento do material, ou seja, dentro do regime elástico. De acordo com a FIG. 2.13 é possível observar que na região elástica ( $\frac{d\sigma}{d\epsilon}$ ) é igual a módulo de elasticidade ( $E$ ), já no regime plástico a inclinação da curva é menor (MEYERS, 1994):

$$\left(\frac{d\sigma}{d\epsilon}\right)_{\text{elástico}} > \left(\frac{d\sigma}{d\epsilon}\right)_{\text{plástico}}$$

Portanto a velocidade de propagação de uma onda elástica é maior do que de uma onda plástica.

Dessa forma a velocidade da onda elástica ( $c_0$ ) em um meio contínuo depende da densidade do material ( $\rho$ ) e do módulo de elasticidade ( $E$ ), sendo obtida através da EQ. 2.2.

$$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{Eq. 2.2}$$

Por fim quando o limite de escoamento dinâmico do material é excedido pelas ondas de tensão, as tensões cisalhantes podem ser desprezadas, já que o material passa a comportar-se como um fluido e pode ser modelado a partir da equação de um gás perfeito (EQ. 2.3) (MEYERS, 1994).

$$\frac{dP}{dV} = -\gamma \frac{P}{V} \quad \text{Eq. 2.3}$$

Onde  $(P)$  é a pressão,  $(V)$  o volume específico e  $(\gamma)$  é o índice adiabático (MEYERS, 1994).

Neste caso, as ondas são chamadas de ondas de choque e são tratadas matematicamente pelas equações de Rankine-Hugoniot (TRINDADE, 2012).

O conceito de propagação de ondas de choque e as equações de conservação que governam este fenômeno podem ser mais facilmente entendidos com auxílio da FIG. 2.14.

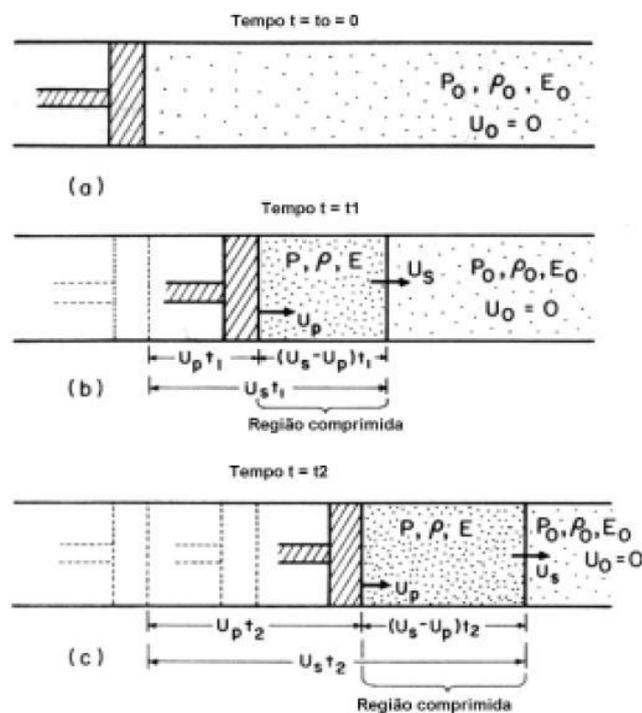


FIG. 2.14: Esquema ilustrativo de propagação da região de compressão em um pistão contendo gás: (a) Antes do choque; (b) Após um tempo  $t_1$ ; (c) Após um tempo  $t_2 > t_1$ . (MEYERS, 1994).

Inicialmente, FIG. 2.14(a), o pistão está parado, e o gás no seu interior possui pressão  $P_0$ , densidade  $\rho_0$ , e velocidade  $U_0$ . No momento em que o pistão é subitamente acelerado até a velocidade de partículas  $U_p$  surge uma região de gás comprimido à frente do pistão, formando a frente de choque, ou seja, um plano que separa o fluido que se move do fluido ainda estacionário.

No tempo  $t_1$ , FIG. 2.14(b), o deslocamento da região comprimida à frente do pistão foi  $U_s t_1$ , onde  $U_s$  é a velocidade de propagação da perturbação à frente do pistão. Durante este intervalo o pistão se deslocou  $U_p t_1$  e a região comprimida adquiriu uma pressão  $P$  e uma densidade  $\rho$ .

Na FIG. 2.14(c) temos a situação para o tempo  $t_2$ , que conceitualmente, não há diferença entre  $t_1$ , porém essa figura mostra que a região compactada tende a aumentar, com a evolução do tempo, uma vez que  $U_s > U_p$ .

Quanto maior a amplitude do distúrbio, ou seja, quanto maior a tensão provocada pela solicitação externa, maior será sua velocidade de propagação, efeito este contrário ao que ocorre nas ondas plásticas, onde quanto maior a tensão menor é a sua velocidade. Este é o requisito fundamental de uma onda de choque, ou seja, regiões com maior amplitude de onda deslocam-se mais rápido do que as regiões de menor amplitude, produzindo, assim, descontinuidades na pressão, temperatura (ou energia interna) e densidade (TRINDADE, 2012).

Segundo Meyers (1994) os cálculos dos parâmetros das ondas de choque são possíveis por meio das três relações de conservação de Rankine-Hugoniot:

a) Massa:  $\rho_0 U_s = \rho (U_s - U_p)$  EQ. 2.4

b) Momento:  $(P - P_0) = \rho_0 U_s U_p$  EQ. 2.5

c) Energia:  $(E - E_0) = \frac{1}{2} (P + P_0) (V_0 - V)$  EQ. 2.6

Tais equações fornecem cinco variáveis: velocidade da partícula ( $U_p$ ), velocidade de choque ( $U_s$ ), volume específico ( $V$ ) ou densidade ( $\rho$ ), pressão ( $P$ ) e energia ( $E$ ). Dessa forma, uma equação adicional é necessária para calcular todos os parâmetros de interesse. Esta quarta equação (EQ. 2.7) expressa uma relação entre  $U_p$  e  $U_s$  obtida experimentalmente e é conhecida como equação de estado do material (EOS) (MEYERS, 1994).

$$U_s = C_0 + S_1 U_p + S_2 U_p^2 \quad \text{EQ. 2.7}$$

Onde  $C_0$  e  $S_1$  são parâmetros empíricos e  $U_p$  é a velocidade do som no material à pressão zero. Para a maioria dos materiais os parâmetros empíricos de ordem maior que 1 são nulos e tem-se uma equação reduzida, EQ. 2.8.

$$U_s = C_0 + S_1 U_p \quad \text{EQ. 2.8}$$

Essa relação linear entre  $U_s$  e  $U_p$  descreve razoavelmente bem a resposta ao choque de materiais não sujeitos a transformação de fases. Os valores de  $C_0$  e  $S_1$  são normalmente tabelados e encontrados na literatura. Porém para que seja possível utilizar as equações acima, é necessário que sejam respeitadas as seguintes condições (MEYERS, 1994).:

- a) o choque é uma superfície descontínua sem espessura aparente;
- b) o módulo de cisalhamento é zero quando o material comporta-se como um fluido;
- c) As forças de corpo, como força gravitacional e a condução de calor na frente de choque são desprezíveis;
- d) não há comportamento elastoplástico; e
- e) o material não sofre transformações de fase.

Zukas (1982) descreve que um dos problemas encontrados no estudo de fenômenos de impacto é a determinação de uma velocidade abaixo do qual um objeto deixará de perfurar uma barreira ou algum tipo de dispositivo de proteção. Esta determinação é de primordial importância na avaliação da eficácia da blindagem.

As técnicas disponíveis para descrever o comportamento balístico dos materiais são os métodos determinísticos ou probabilísticos. Os métodos determinísticos são amparados pelas três relações de conservação de Rankine-Hugoniot (massa, energia e momento) e as equações de estado dos materiais, para determinar a velocidade crítica de impacto (ZUKAS, 1982).

Já o método probabilístico é um método estatístico que se baseia na probabilidade de ocorrência ou não da perfuração do alvo, adotando como critério a velocidade em

que ocorre a perfuração a uma probabilidade pré-fixada. Para isso, é utilizado um grande número de série de impactos (ZUKAS, 1982).

O limite balístico ( ) é o critério mais adotado, que consiste na determinação do valor que corresponde a uma probabilidade igual a 50% de o alvo ser perfurado ou não. A curva típica da probabilidade de perfuração em função da velocidade de impacto é ilustrada na FIG. 2.15 (ZUKAS, 1982).

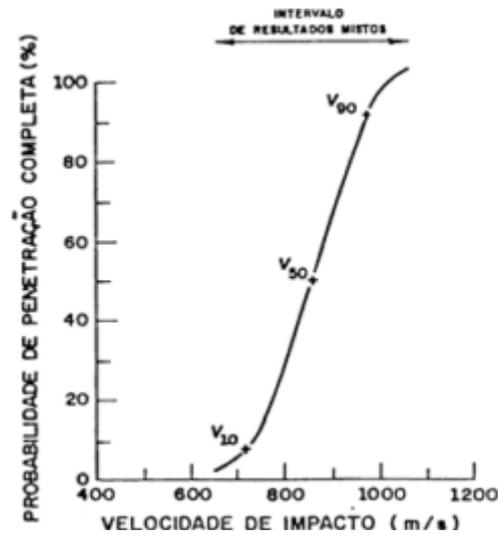


FIG. 2.15: Curva da probabilidade de perfuração adaptada. (ZUKAS, 1982).

Dessa forma Morye (2000) descreve que a energia cinética dissipada pelo projétil durante a penetração no alvo é igual à energia total absorvida pelo alvo, assim é possível calcular a velocidade limite do projétil ( $V_L$ ). Essa velocidade limite pode ser definida como sendo a velocidade em que o alvo absorve toda a energia cinética do projétil, não ocorrendo a perfuração do mesmo.

A energia absorvida é dada pela diferença entre a energia cinética de impacto ( $E_i$ ) e a energia cinética residual ( $E_r$ ) expressa a partir das respectivas velocidades pela EQ. 2.9.

$$E_{abs} = \frac{1}{2} m (V_i^2 - V_r^2) \quad \text{EQ. 2.9}$$

Onde ( $m$ ) é a massa do projétil, ( $V_i$ ) a velocidade de impacto e ( $V_r$ ) a velocidade residual do projétil. A relação entre a velocidade limite ( $V_L$ ) e a energia absorvida está apresentada na EQ. 2.10.

$$v_L = \sqrt{\frac{2}{\rho}}$$

EQ. 2.10

### 2.6.1 Interação e reflexão de ondas de choque

Segundo Meyers (1994) quando uma onda de choque propaga-se de um meio A para um meio B, muda-se a pressão, velocidade da onda, densidade e assim por diante. Assim é conveniente definir a impedância de choque como o produto da densidade inicial,  $\rho_0$ , e da velocidade da onda de choque,  $v_L$ . É possível fazer uma aproximação colocando a impedância de choque como o produto da densidade inicial,  $\rho_0$ , e da velocidade sônica da onda,  $c$ . A impedância será alta para materiais com alta densidade e alta velocidade sônica. A impedância de choque fornece uma medida da pressão que vai ser gerada para um determinado valor de velocidade das partículas. Em materiais com alta impedância o melhor método para tratar a transferência de onda de um meio A para um meio B é o do casamento de impedâncias, porém é necessário considerar que a interface é como um meio contínuo e que a velocidade de partícula e pressão serão os mesmos em ambos os materiais.

A aplicação deste método pode ser exemplificada para duas diferentes situações: transferência de onda de choque de um meio de baixa impedância (A) para outro de alta impedância (B); e transferência de onda de choque de um meio de alta impedância (A) para outro de baixa impedância (B).

Portanto, para este primeiro caso, o material A possui menor impedância que o material B. A FIG. 2.16 ilustra esta primeira situação e mostra a variação da pressão em função da velocidade de partícula para os materiais A e B (MEYERS, 1994).

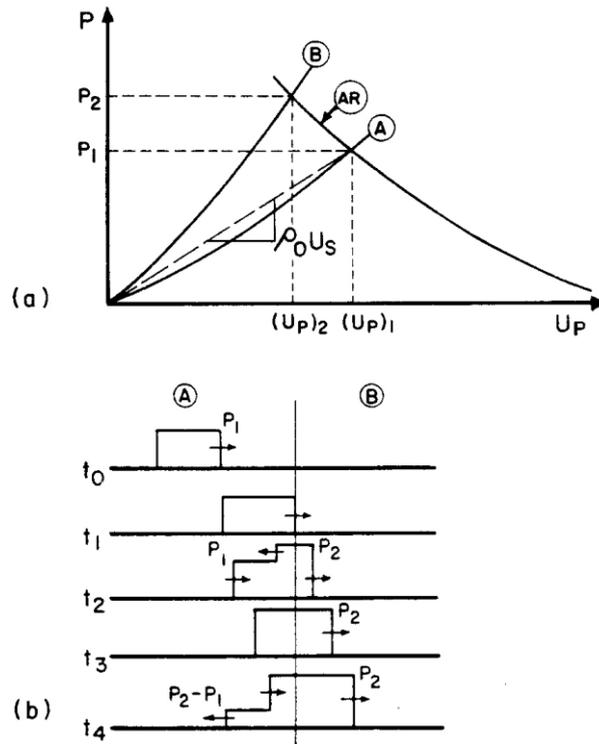


FIG. 2.16: Transferência da onda de choque de um meio com baixa impedância para um meio de alta impedância: (a) Gráfico de Pressão *versus* Velocidade de partícula; (b) Perfil de pressão. (MEYERS, 1994).

A reta pontilhada da curva do material A é a linha de Rayleigh, a qual explica a descontinuidade na pressão (ou densidade) durante o choque. A inclinação da linha de Rayleigh é dada pelo produto da densidade do material e a velocidade da onda de choque. Na interface entre os materiais A e B, ocorrerá mudança da pressão para que o equilíbrio seja atingido. Essa mudança pode ser calculada através do casamento de impedâncias, como apresentado esquematicamente na FIG. 2.16. Conforme a FIG. 2.16(a) nota-se que para o material A, de menor impedância, a inclinação da curva é menor comparando com o material B. Neste caso, o material A faz o papel do projétil e o material B o alvo, pois o material A que irá impactar no material B. Para determinar a pressão na interface, é necessário calcular a velocidade de partícula na interação entre o material A e B. Então, considera-se o momento de impacto, onde ocorre a queda de velocidade do projétil de  $(U_P)_1$  para  $(U_P)_2$ . Esta velocidade de interação ( $(U_P)_2$ ) é dada pela interseção da curva Hugoniot do material B com a curva invertida do material A (projétil), como mostra a FIG. 2.16(a). Aplicando-se as equações de conservação e de estado do material é possível definir os valores de  $P_1$  e  $P_2$ . Para esta situação, o perfil

de pressão é apresentado na FIG. 2.16(b). A pressão passa de  $P_1$  para  $P_2$  quando a frente de choque atinge a interface. Neste momento, ocorre a decomposição da onda e uma frente de pressão é propagada em A e outra em B. Então, esta frente de pressão retorna na forma de uma onda compressiva e sua pressão cai para  $P_2$ . O pulso continua sua propagação para a esquerda e a velocidade de partícula se mantém a mesma na região de alta pressão, em A e B. Deste modo, é assegurada a continuidade de pressão e de velocidade de partícula (MEYERS, 1994).

No segundo caso, a transferência da onda de choque ocorre de um meio com alta impedância, A, para um meio com baixa impedância, B. A FIG. 2.17(a) apresenta a solução gráfica para esta situação.

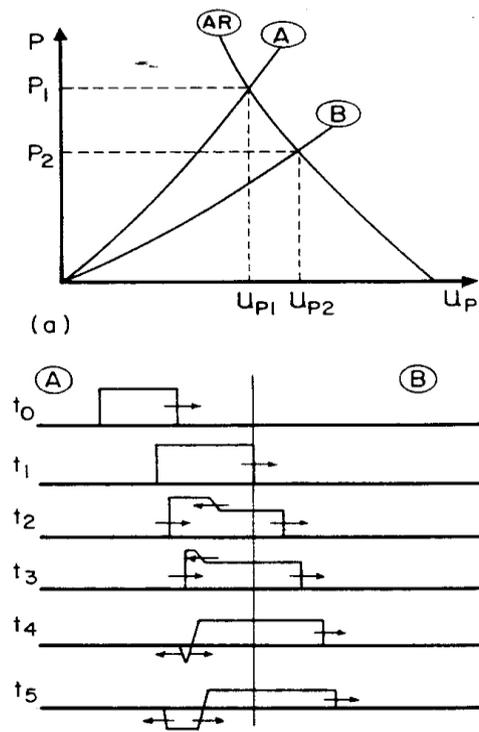


FIG. 2.17: Transferência da onda de choque de um meio com alta impedância para um meio com baixa impedância: (a) Gráfico pressão *versus* velocidade de partícula; (b) Perfil de pressão. (MEYERS, 1994).

Para determinar a velocidade de partícula e pressão na interface dos materiais A e B é necessário, primeiramente, inverter a curva do material A na pressão (AR). A interseção dessa curva na curva do material B ocorrerá em  $U_{P2}$ . Neste caso, a pressão  $P_2$  é menor que  $P_1$ . Esta pressão libera um pulso que se propagará no material A. Admitindo que os materiais A e B são semi-infinitos e que o pulso liberado viaja livremente até

encontrar a frente de onda do pulso primário. Este encontro ocorre no instante  $t_0$  que gera um pulso de tensão trativa que se propaga tanto para dentro do material B quanto para o material A. Caso a onda trativa possua uma amplitude suficientemente alta ocorre o estilhaçamento do material (MEYERS, 1994).

## 2.7 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

A distribuição Weibull é uma das distribuições de vida mais amplamente utilizada na análise de confiabilidade. Esta distribuição é nomeada em homenagem ao professor sueco Waloddi Weibull (1887-1979), que desenvolveu a distribuição para modelar a resistência dos materiais (RAUSAND e HOYLAND, 2004).

Devido à confiabilidade das análises, os modelos de Weibull surgem em diversas aplicações médicas e industriais. Em aplicações industriais, os modelos de Weibull têm sido utilizados em testes de vida para determinar a probabilidade de que um componente fabricado irá falhar sob um dado ambiente. (ELMAHDY, 2015).

A principal vantagem da análise de Weibull é a capacidade de fornecer análise de falha e previsões de falhas razoavelmente precisas com extremamente pequenas amostras. Outra vantagem é que ela fornece uma representação gráfica simples e útil dos dados de falha. (ABERNETHY, 2006)

Portanto Weibull propôs uma função empírica de distribuição de probabilidade de falhas e obteve a expressão para a probabilidade de fratura acumulada, a qual chamou de Distribuição de Weibull (EQ. 2.11): onde:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\theta}\right)^\beta\right] \quad \text{EQ. 2.11}$$

Onde  $\theta$  e  $\beta$  são parâmetros estatísticos, conhecidos por unidade característica e módulo de Weibull, respectivamente. Rearranjando a EQ. 2.11 obtém-se a EQ. 2.12.

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(x)}\right)\right] = \beta \ln x - \beta \quad \text{EQ. 2.12}$$

Comparando a EQ. 2.12 com a equação da reta ( $Y = \alpha X$ ), tem-se que ( $\alpha$ ) é dado por  $\left\{ \ln \left[ \ln \left( \frac{1}{1-F(x)} \right) \right] \right.$ , é igual a ( $\beta$ ), é equivalente a (módulo de Weibull), ou seja, ao coeficiente angular da reta e dado por ( $-\beta$ ). Para apresentar graficamente estes valores é necessário ordená-los de forma crescente (LIPSON, 1973).

Assim quanto maior é o módulo de Weibull, menor é a dispersão, representando maior confiabilidade dos dados (PINHEIRO, ESTEVÃO e VITOR, 2014).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foi utilizado um sistema de blindagem multicamadas, que se divide em três camadas distintas. A primeira camada é composta por um hexágono cerâmico de  $Al_2O_3$  dopada com  $Nb_2O_5$  na proporção de 4% em massa (camada A da FIG. 3.1).

Já a segunda camada é formada pela placa compósita, que foi fabricada em duas configurações diferentes, com reforço de fibras e tecido de sisal. As placas foram confeccionadas em matriz de epóxi, na proporção de 30% em volume de fibras ou tecido (camada B da FIG. 3.1).

A terceira camada é composta por uma placa quadrada de alumínio da liga 6061 (camada C da FIG. 3.1).

Por fim, para que seja possível medir a profundidade que o projétil penetra o alvo, a blindagem é apoiada na plastilina (camada D da FIG. 3.1). Este material caracteriza-se por ser uma massa deformável formada por argila, que simula a densidade do corpo humano.

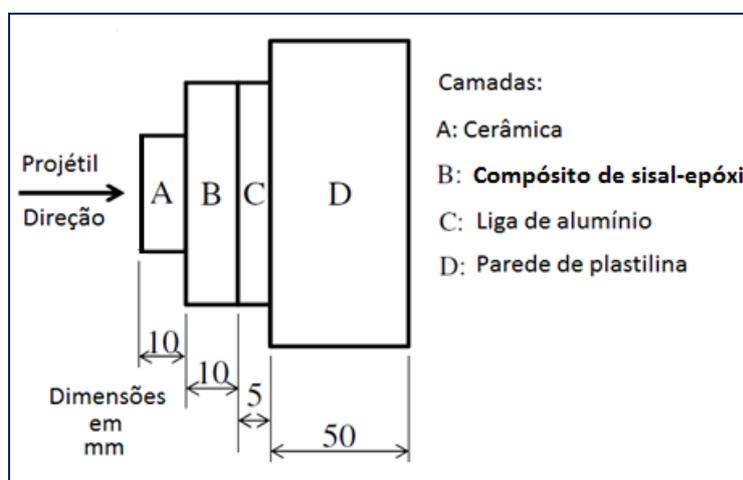


FIG. 3.1: Diagrama esquemático da blindagem multicamadas, juntamente com a plastilina. (MONTEIRO et al, 2014a) (Adaptada).

### 3.1 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

#### 3.1.1 Alumina e nióbia

A alumina utilizada foi da empresa Treibacher Schleifmittel Brasil. Já o aditivo de sinterização foi a nióbia HP da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) (TRINDADE, 2012).

As TAB. 3.1 e 3.2 apresentam, respectivamente, as análises químicas da alumina e da nióbia utilizadas, conforme as informações dos fornecedores.

TAB. 3.1: Análise química da alumina.

| <b>Elemento</b>                    | <b>Análise</b> | <b>Especificação</b> |
|------------------------------------|----------------|----------------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 99,4           | min. 99,1            |
| SiO <sub>2</sub> (%)               | 0,04           | max. 0,06            |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 0,04           | max. 0,06            |
| Na <sub>2</sub> O (%)              | 0,11           | max. 0,15            |
| MgO (%)                            | 0,03           | -                    |
| Umidade a 300° C (%)               | 0,20           | max. 0,5             |
| Outros (%)                         | 0,18           |                      |

Fonte: (TRINDADE, 2012) (Adaptada).

TAB. 3.2: Análise química da nióbia HP.

| <b>Elemento</b>                    | <b>Análise</b> |
|------------------------------------|----------------|
| Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | 99,5           |
| Perda ao fogo (%)                  | 0,1            |
| Ta (ppm)                           | 745            |
| Ti (ppm)                           | 240            |
| Fe (ppm)                           | 136            |
| Si (ppm)                           | 66             |

Fonte: (TRINDADE, 2012) (Adaptada).

### 3.1.2 Ligante

O ligante orgânico utilizado foi o polietileno glicol, da empresa Vetec. A adição do ligante é para possibilitar o manuseio do corpo cerâmico verde (TRINDADE, 2012).

A TAB. 3.3 apresenta as propriedades deste ligante, as quais foram informadas pelo fornecedor.

TAB. 3.3: Propriedades do PEG.

| <b>Análise</b>        | <b>Resultado</b>              |
|-----------------------|-------------------------------|
| Cor (APHA)            | Max. 35                       |
| Teor de água          | Max. 0,3%                     |
| Massa molecular média | 200                           |
| Viscosidade à 100 °C  | 65-115 cP EM H <sub>2</sub> O |
| Resíduo após ignição  | Max. 0,1%                     |

Fonte: (TRINDADE, 2012) (Adaptada).

### 3.1.3 Fibra de sisal

A fibra de sisal é uma fibra de fácil comercialização, uma vez que ela é utilizada na montagem de rebaxamento de tetos com gesso. Dessa forma as fibras foram adquiridas na empresa Tetolar – Artefatos para gessos, na cidade do Rio de Janeiro – RJ, em pacotes de 500 gramas. As especificações técnicas encontradas na literatura das fibras de sisal estão listadas na TAB. 3.4.

TAB. 3.4: Propriedades da fibra de sisal.

| <b>Propriedades da fibra de sisal (<i>Agave sisalana</i>)</b> |            |
|---|------------|
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> )                                | 1,26 -1,50 |
| Resistência a tração (MPa)                                    | 287 - 913  |
| Módulo de Elasticidade (GPa)                                  | 9 - 28     |
| Resistência à tração específica (MPa.cm <sup>3</sup> /g)      | 725        |

Fonte: (MONTEIRO et al, 2011) (Adaptada).

### 3.1.4 Tecido de sisal

O tecido de sisal foi adquirido na empresa Sisalsul - Fibras Naturais, localizada na cidade de São Paulo – SP. O material possui composição 100% de sisal, disposto em rolos com dimensões de 1,5m x 30m, e caracteriza-se por possuir trama simples (FIG. 3.2).



FIG. 3.2: Tecido de sisal com trama simples.

### 3.1.5 Resina epóxi

A resina epóxi é comercializada pela empresa Resinpoxy, localizada na cidade do Rio de Janeiro – RJ. Esta resina é do tipo éter diglicidílico do bisfenol A (DGEBA), endurecida com trietileno tetramina (TETA) (FIG. 3.3). O endurecedor é adicionado à resina na proporção de 13% em peso, pois esta é a proporção estequiométrica que equivale à abertura de todos os anéis epóxi por ligação com as moléculas de amina (MARGEM, 2013).

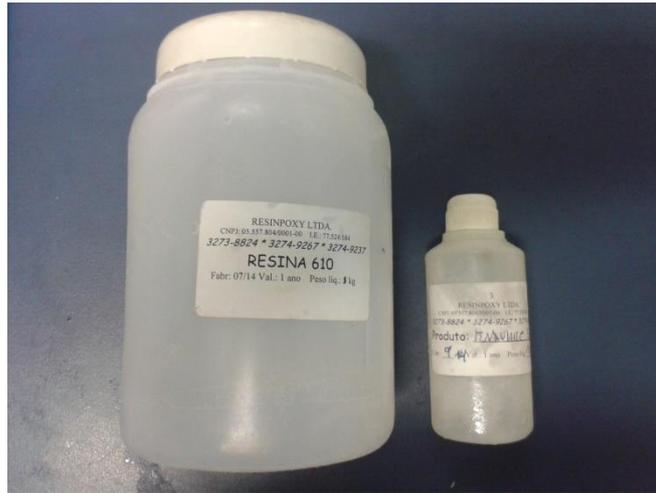


FIG. 3.3: Resina e catalisador conforme fornecidos.

### 3.1.6 Plastilina

Trata-se do material utilizado baseado na Norma NIJ 0101.04, para as atividades de avaliação do comportamento balístico, promovendo a simulação da proteção individual, uma vez que ele simula a densidade do corpo humano (TRINDADE, 2012).

A plastilina utilizada é a massa para modelar da marca Corfix (FIG. 3.4). Ela caracteriza-se por ser atóxica, não ressecante, inodora e da cor branca, com densidade que varia de 1,70-1,85 g/cm<sup>3</sup>, e é adquirida pelo CAEx (Centro de Avaliações do Exército) em caixas unitárias de 500 gramas (CORFIX, 2011).



FIG. 3.4: Plastilina da marca CORFIX em caixas unitárias de 500g.

### 3.1.7 Placa de alumínio

As especificações da placa de alumínio (FIG. 3.5) são dadas na TAB. 3.5, conforme os resultados apresentados por Chagas (2014). Tais placas são da liga 6061 e foram cortadas nas dimensões de 15 cm x 15 cm x 0,5 cm.

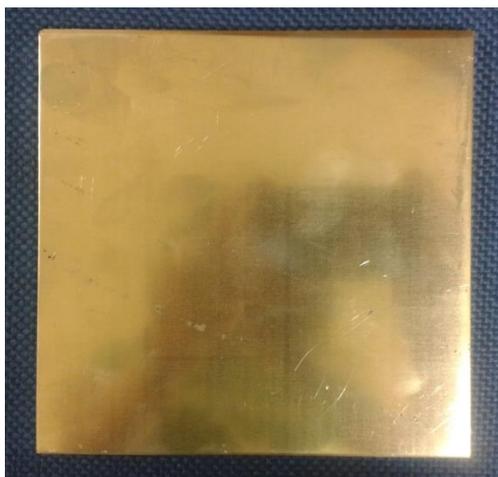


FIG. 3.5: Placa de alumínio.

TAB. 3.5: Especificações do alumínio

| <b>Material</b> | <b>Densidade</b>      | <b>Módulo de elasticidade</b> | <b>Módulo de Cisalhamento</b> | <b>Dureza Vickers</b> |
|-----------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Alumínio        | 2,7 g/cm <sup>3</sup> | 68 GPa                        | 25 GPa                        | 15                    |

Fonte: (CHAGAS, 2014) (Adaptada).

### 3.1.8 Adesivo

O adesivo utilizado na montagem da blindagem multicamadas foi o Ultra Flex Cura Rápida Adesivo de Poliuretano da marca ITW PPF Brasil (FIG. 3.6). Este produto é indicado para realizar trabalhos de colagem em uma grande variedade de substratos, tais como alumínio, materiais cerâmicos, plásticos, entre outros.



FIG. 3.6: Adesivo Ultra Flex PU Cura Rápida.

### 3.2 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CERÂMICOS

Para a confecção dos corpos de prova cerâmicos foi preparada uma mistura da alumina, com o aditivo de sinterização (nióbia) e o ligante (polietileno glicol – PEG); esses componentes foram moídos à úmido, por 12 horas, em um moinho de bolas de alumina, MARCONI modelo MA 500 (FIG. 3.7). Esta mistura foi realizada com a composição em peso de 94,53% de alumina, 3,94% de nióbia e 1,53% de PEG (TRINDADE, 2012). Após a evaporação do ligante orgânico, a adição de nióbia passou a ser de 4% em peso, sendo esta a proporção que apresentou melhores resultados em testes balísticos de trabalhos anteriores (GOMES, 2004).

Para realizar a pesagem dos materiais foi utilizada uma balança digital da marca GEHAKA, modelo BK 300, com precisão de 0,001g (FIG. 3.8). As quantidades de materiais utilizados na moagem foram:

- 1400 g de  $Al_2O_3$ ;
- 58,3 g de  $Nb_2O_5$ ;
- 22,6 g de PEG (polietileno glicol);
- 1500 g de água;
- 1300 g de bolas de alumina.

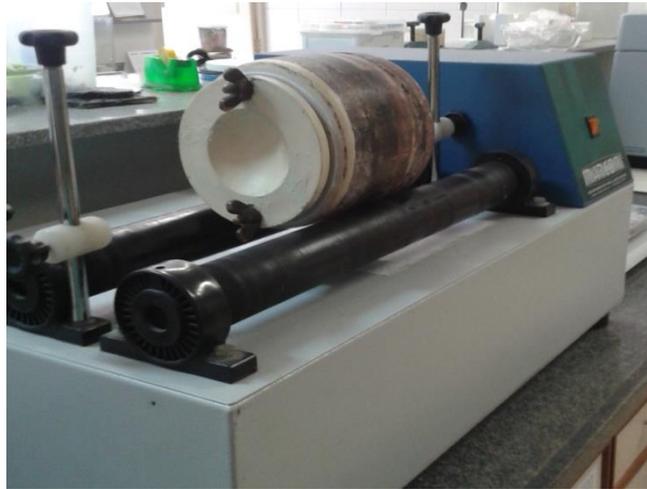


FIG. 3.7: Moinho de bolas de alumina da marca MARCONI modelo MA 500 na posição de uso.



FIG. 3.8: Balança digital da marca GEHAKA, modelo BK 300, com precisão de 0,001g.

Ao final do processo de moagem a mistura foi colocada na estufa ELKA (FIG. 3.9) à temperatura de 80° C, por um período de 48 horas. O pó seco foi macerado manualmente e peneirado em uma malha de 0,355 mm (FIG. 3.10), que foi colocada em um agitador de peneiras da marca +GF+ tipo PSA (FIG 3.11). O material peneirado foi então utilizado na etapa de prensagem (TRINDADE, 2012).



FIG. 3.9: Estufa ELKA para secagem do pó.



FIG. 3.10: Peneira com malha 0,355 mm.



FIG. 3.11: Agitador de peneiras marca +GF+ tipo PSA.

Para a prensagem do corpo verde foi utilizado aproximadamente 100 g do pó macerado em uma matriz hexagonal plana (FIG. 3.12), de modo que as peças após a sinterização ficaram com espessura de aproximadamente 10 mm. A prensagem foi uniaxial, usando o método dos dois punções móveis e camisa flutuante, por meio de uma prensa motorizada da marca Nowak (FIG. 3.13), com capacidade de 30 toneladas. A pressão de compactação do corpo verde utilizada foi de 60 MPa, já que segundo Trindade (2012) pressões acima desse valor promovem defeitos ao longo da peça.

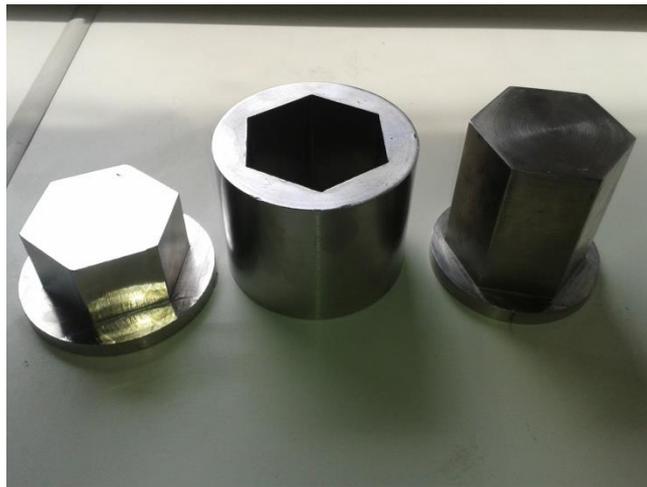


FIG. 3.12: Matriz hexagonal plana de compactação do pó.



FIG. 3.13: Prensa motorizada com capacidade de 30 toneladas da marca Nowak.

### 3.2.1 Sinterização

O processo de sinterização dos corpos verdes foi realizado no forno INTI modelo FE 1700 (FIG. 3.14) do Laboratório de Materiais Cerâmico do IME. Este processo seguiu a rota de sinterização elaborada por Trindade e colaboradores (2013).

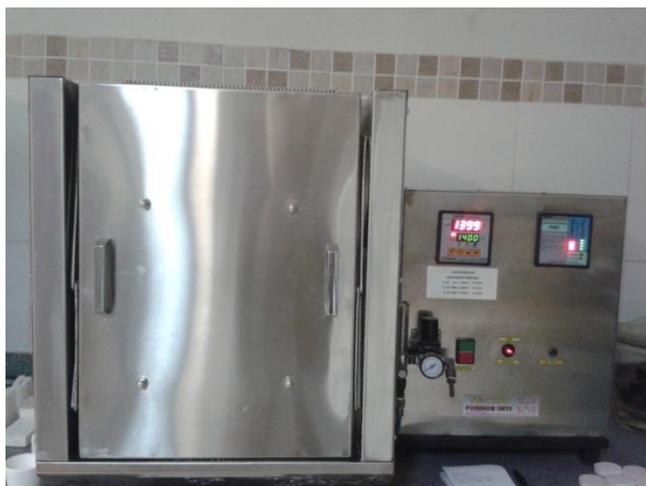


FIG. 3.14: Forno para sinterização INTI modelo FE 1700.

- i) Aquecimento de 25°C até 158°C, utilizando uma taxa de 1°C/min;
- ii) Patamar de aquecimento de 158°C por 1h;
- iii) Aquecimento de 158°C até 375°C a uma taxa de 1°C/min;
- iv) Aquecimento de 375°C até 1000°C a uma taxa de 8°C/min;
- v) Aquecimento de 1000°C até 1400°C a uma taxa de 5°C/min;
- vi) Patamar de sinterização a 1400°C por 3h.

As três primeiras etapas dessa rota são responsáveis pela eliminação do ligante orgânico de forma a obter um menor diâmetro médio de poros, o que favorece uma melhor densificação na sinterização (TRINDADE, GOMES e LOURO, 2013).

O produto final é a pastilha cerâmica em formato hexagonal sinterizada (FIG. 3.15).

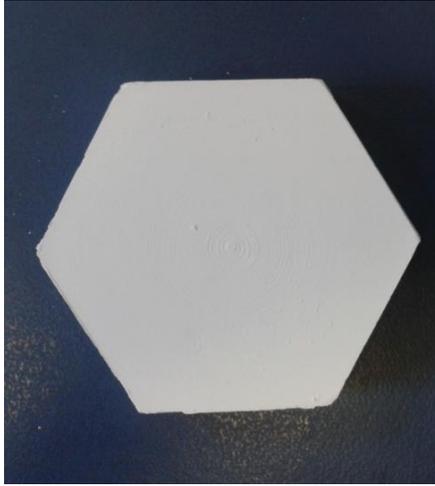


FIG. 3.15: Pastilhas cerâmicas em formato hexagonal sinterizada.

### 3.2.2 Medições dos corpos cerâmicos

Para determinar a densidade dos corpos cerâmicos sinterizados foram feitos cálculos da razão massa/volume (EQ. 3.1). Quando essa relação é apresentada em termos percentuais da densidade teórica da mistura (alumina + nióbia), conforme EQ. 3.2, ela é conhecida por densificação. Essa densidade teórica foi calculada pela regra das misturas a qual considera a quantidade de cada componente presente na mistura resultando em  $4,0049 \text{ g/cm}^3$ .

$$\rho_{verde} = \frac{m}{v} \quad \text{EQ. 3.1}$$

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

Onde  $\rho$  é a densidade teórica;  $\rho_{sinterizado}$  é densidade do corpo cerâmico sinterizado,  $m$  é a massa da amostra (g) e  $V$  volume da amostra ( $\text{cm}^3$ ).

Como a dimensão de maior relevância é a espessura do corpo cerâmico, o cálculo de retração linear ( $R_L$ ) foi feito apenas nessa dimensão, conforme a EQ. 3.3.

$$R_L = \left( \frac{e_{verde} - e_{sinterizado}}{e_{verde}} \right) \times \quad \text{EQ. 3.3}$$

Onde  $e_{verde}$  é a espessura do corpo verde e  $e_{sinterizado}$  é a espessura da amostra sinterizada.

### 3.3 CONFECÇÃO DAS AMOSTRAS DE COMPÓSITO EPÓXI-SISAL

Os corpos de prova compósitos foram confeccionados em uma matriz metálica retangular (FIG. 3.16) com dimensões 15,0 cm x 11,9 cm, objetivando uma espessura final da placa de 1,0 cm. Ao todo foram confeccionados 24 corpos de prova, sendo 12 utilizando 30% em volume de fibra de sisal, e 12 utilizando 30% em volume de tecido de sisal.



FIG. 3.16: Matriz metálica para confecção das placas compósitas.

As fibras e o tecido foram cortados de acordo com o espaço interno da matriz (FIG. 3.17) e levadas à estufa ELKA, por 24 horas, a uma temperatura de 80° C, para que a umidade fosse retirada.

Após esse período o sisal (em forma de fibras ou tecido) foi pesado, de forma que fosse obtido um volume de 30% da matriz metálica, neste caso a densidade do sisal considerada, obtida na literatura, foi de 1,26 g/cm<sup>3</sup> (MONTEIRO et al, 2011), assim para obter a proporção de 30% em volume foram necessários aproximadamente 67 g de sisal para cada placa compósita, e conseqüentemente 139,86 g de resina epóxi com endurecedor, que corresponde a 70% em volume da matriz metálica.

O preparo da resina é realizado por meio da mistura do epóxi com o endurecedor, numa proporção de 13% em peso de endurecedor (MARGEM, 2013).



FIG. 3.17: Fibras de sisal secas com comprimento de aproximadamente 15 cm.

Após a mistura tornar-se homogênea, esse fluído é vertido no molde. Para a confecção do compósito seguem-se as seguintes etapas: coloca-se uma camada de resina (FIG. 3.18) e depois uma camada de fibra sobre a resina (FIG. 3.19); esse ciclo se repete até a deposição de todo o material dentro da matriz (FIG. 3.20).



FIG. 3.18: Primeira camada de resina na matriz metálica.



FIG. 3.19: Deposição da camada de fibras de sisal alinhadas sobre a resina.



FIG. 3.20: Última camada de resina sobre as fibras de sisal.

Após essa sequência é colocada a tampa superior do molde e o conjunto é transportado para a prensa. O material é submetido à pressão durante o tempo de cura da resina, que é de 24 horas (FIG. 3.21).



FIG. 3.21: Placa compósita submetida à pressão para a cura.

Após esse tempo o material é retirado do molde. As FIG. 3.22 e FIG. 3.23 demonstram as placas compósitas após o processamento.



FIG. 3.22: Resultado final da placa compósita epóxi-fibra de sisal.



FIG. 3.23: Resultado final da placa compósita epóxi-tecido de sisal.

### 3.4 ENSAIOS BALÍSTICOS

Os ensaios balísticos foram realizados no Campo de Prova da Marambaia – Rj, na linha de ensaios para armas leves. Para estes ensaios foi utilizado um provete com calibre 7,62 mm dotado de mira laser, conforme FIG. 3.24 e 3.25 respectivamente, uma

barreira óptica modelo B471 da HIP, um radar WEIBEL DOPPER, dispositivo de fixação do alvo (FIG. 3.26) e munição calibre 7,62 mm comum.



FIG. 3.24: Provete com calibre 7,62mm dotado de mira laser.



FIG. 3.25: Mira laser do provete calibre 7,62mm.



FIG. 3.26: Dispositivo de fixação do alvo na plastilina.

Para garantir que a densidade da plastilina estivesse de acordo com a especificada pela norma NIJ 0101.04, a plastilina foi deixada em uma câmara quente, WEISS, por aproximadamente 2 horas. Após esse período, foi verificada a densidade da plastilina seguindo o procedimento especificado na seção 5.7.5 da norma NIJ 0101.04, medindo-se a profundidade da indentação provocada por uma esfera de aço.

As condições do ensaio foram:

- Munição: calibre 7,62 mm M1 (comum), conforme é fornecida comercialmente ao Exército Brasileiro;
- Distância ao alvo (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;
- Ângulo de incidência no alvo: ortogonal;
- Local de realização dos testes: Centro de Avaliações do Exército (CAEx), na linha de tiro IV.

Este ensaio foi realizado em corpos de prova de blindagem multicamadas, compostos por 3 camadas: pastilha cerâmica hexagonal, placa compósita epóxi-fibra de sisal ou epóxi-tecido de sisal, e por fim a placa de alumínio. Após a montagem a blindagens multicamadas ficaram como os exemplos da FIG. 3.27 e FIG. 3.28.

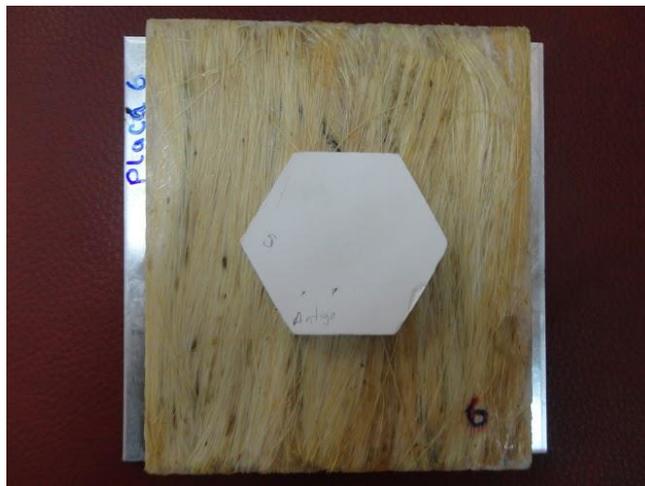


FIG. 3.27: Blindagem multicamadas com compósito de fibra de sisal.

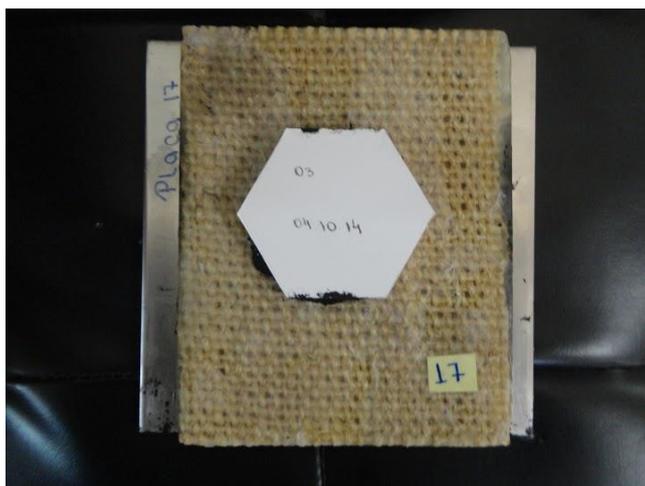


FIG. 3.28: Blindagem multicamadas com compósito de tecido de sisal.

Os ensaios balísticos foram divididos em quatro grupos, sendo o primeiro grupo composto pela placa do compósito de epóxi reforçado com fibras de sisal, sem a plastilina como material de apoio. O segundo grupo, também foi composto apenas pela placa do compósito epóxi-sisal, porém, com o sisal na configuração de tecido. Os dois primeiros grupos tiveram por finalidade avaliar a energia cinética de absorção das placas isoladas em relação ao projétil 7,62 mm através de sua velocidade residual. O terceiro grupo foi formado pela blindagem multicamadas com o compósito epóxi reforçado fibras de sisal. E o quarto grupo constituído pela blindagem multicamadas com o compósito epóxi reforçado com tecido de sisal. Nestes dois últimos grupos o conjunto da blindagem foi fixado na plastilina.

Dessa forma a proteção balística é avaliada como eficiente se, após o impacto da munição com a blindagem, a medida da maior profundidade de deformação na massa de plastilina (FIG. 3.29) for igual ou inferior a 44 mm, conforme prevê a Norma NIJ 0101.04. Para a medição da indentação na plastilina foi utilizado o paquímetro de profundidade modelo *Absolute*, série 571, da MITUTOYO.



FIG. 3.29: Medição da profundidade da indentação gerada na plastilina após os ensaios balísticos.

Através do ensaio de velocidade residual, também foi possível estimar o limite balístico, ou seja, a velocidade crítica ( $V_L$ ) que o material suporta. Como não é possível determinar a  $V_{50}$  para projéteis de alta velocidade, como o de calibre 7,62 mm, utilizado no presente trabalho, a estimativa dessa velocidade crítica foi feita através da aplicação da energia absorvida pelo material na EQ. 2.10, conforme descrito anteriormente.

Para todos os dados coletados, com o propósito de realizar uma investigação prévia sobre a probabilidade estatística, foi utilizada a análise de distribuição de Weibull para correlacionar o desempenho balístico, através da profundidade da indentação na plastilina, e também a energia absorvida, com o tipo de compósito usado como camada intermediária no sistema de blindagem multicamadas.

### 3.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Após os ensaios balísticos as áreas fraturas foram observadas no microscópio de varredura eletrônico, a fim de analisar a interação do compósito epóxi-sisal com os fragmentos da placa cerâmica frontal e os mecanismos de absorção de energia dos compósitos.

O microscópio eletrônico de varredura utilizado foi do modelo Quanta FEG 250, da FEI (FIG. 3.30), e o equipamento de deposição de platina foi da marca LEICA, modelo EM ACE600, como mostra a FIG 3.31.



FIG. 3.30: Microscópio eletrônico de varredura modelo Quanta FEG 250.

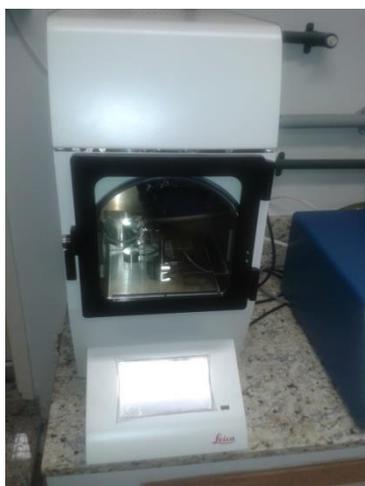


FIG. 3.31: Equipamento de deposição de platina marca LEICA, modelo EM ACE600

Foram capturadas imagens da região danificada após o impacto de amostras dos corpos cerâmicos e das placas compósitas nas configurações de tecido e fibras.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS CERÂMICOS

Para garantir a real eficiência da blindagem multicamadas é necessário atestar que os corpos cerâmicos de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dopados com nióbia ( $\text{Nb}_2\text{O}_3$ ) foram confeccionados corretamente. Em vista disso, os resultados de densificação média e densidade média, obtidos neste trabalho, foram comparados com os resultados obtidos por Trindade (2012) e Luz (2014), uma vez que os parâmetros de confecção dos corpos de prova do presente trabalho foram os mesmos dos trabalhos citados.

Os valores medidos da espessura dos corpos cerâmicos sinterizados, bem com os valores calculados de densificação, retração linear e densidade estão apresentados na tabela TAB. 4.1.

TAB. 4.1: Valores de espessura, densidade, retração linear e densificação dos cerâmicos sinterizados.

| <b>Blindagem</b>   | <b>Espessura</b> | <b>Densidade</b>          | <b>Retração</b> | <b>Densificação</b> |
|--------------------|------------------|---------------------------|-----------------|---------------------|
| <b>Multicamada</b> | <b>(mm)</b>      | <b>(g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>(%)</b>      | <b>(%)</b>          |
| 1                  | 10,45            | 3,53                      | 12,92           | 88,06               |
| 2                  | 10,40            | 3,55                      | 13,33           | 88,60               |
| 3                  | 10,50            | 3,51                      | 12,50           | 87,55               |
| 4                  | 10,50            | 3,53                      | 12,50           | 88,23               |
| 5                  | 10,45            | 3,52                      | 12,92           | 87,96               |
| 6                  | 10,62            | 3,49                      | 11,50           | 87,16               |
| 7                  | 10,60            | 3,50                      | 11,67           | 87,46               |
| 8                  | 10,65            | 3,48                      | 11,25           | 87,01               |
| 9                  | 10,90            | 3,40                      | 9,17            | 84,93               |
| 10                 | 10,60            | 3,50                      | 11,67           | 87,38               |
| 11                 | 10,62            | 3,51                      | 11,50           | 87,65               |

|                              |                       |  |                                     |  |                     |  |                         |  |
|------------------------------|-----------------------|--|-------------------------------------|--|---------------------|--|-------------------------|--|
| 12                           | 10,82                 |  | 3,43                                |  | 9,83                |  | 85,72                   |  |
| <b>Blindagem Multicamada</b> | <b>Espessura (mm)</b> |  | <b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b> |  | <b>Retração (%)</b> |  | <b>Densificação (%)</b> |  |
| 13                           | 10,70                 |  | 3,46                                |  | 10,83               |  | 86,40                   |  |
| 14                           | 10,90                 |  | 3,40                                |  | 9,17                |  | 84,97                   |  |
| 15                           | 10,80                 |  | 3,44                                |  | 10,00               |  | 85,83                   |  |
| 16                           | 10,51                 |  | 3,53                                |  | 12,42               |  | 88,15                   |  |
| 17                           | 10,52                 |  | 3,53                                |  | 12,33               |  | 88,08                   |  |
| 18                           | 10,46                 |  | 3,55                                |  | 12,83               |  | 88,76                   |  |
| 19                           | 10,91                 |  | 3,40                                |  | 9,08                |  | 84,97                   |  |
| 20                           | 10,56                 |  | 3,53                                |  | 12,00               |  | 88,07                   |  |
| <b>Média</b>                 | 10,62 0,16            |  | 3,49 0,05                           |  | 11,47 1,36          |  | 87,15 1,24              |  |

De acordo com os dados apresentados na TAB. 4.1, pode-se atestar que o processamento realizado para confecção dos corpos cerâmicos foi adequado, uma vez que os valores médios de densificação e densidade possuem boa aproximação dos valores encontrados nos trabalhos anteriores. A densificação calculada neste trabalho possui média de 87,15% e a densidade de 3,49 g/cm<sup>3</sup>, já os valores obtidos por Trindade (2012) e Luz (2014) são 88,2% e 3,53 g/cm<sup>3</sup>, e 87,65% e 3,51 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Além disso, a espessura média obtida, no presente trabalho, foi de 10,62 mm e a retração linear média foi de 11,47%.

#### 4.2 DESEMPENHO BALÍSTICO DA BLINDAGEM MULTICAMADA

Os testes balísticos foram realizados com a finalidade de verificar o desempenho balístico das blindagens confeccionadas neste trabalho. Ao todo foram confeccionadas blindagens com duas camadas intermediárias distintas: compósito epóxi-fibra de sisal (FIG. 4.1) e compósito epóxi-tecido de sisal (FIG. 4.2).



FIG. 4.1: Blindagem multicamada com compósito epóxi-fibra de sisal antes do impacto balístico.



FIG. 4.2: Blindagem multicamada com compósito epóxi-tecido de sisal antes do impacto balístico.

Já nas imagens a seguir (FIG. 4.3 e FIG. 4.4) é possível observar a forma final das blindagens após o impacto do projétil 7,62 x 51 mm.

Foi constatado que em nenhum dos ensaios balísticos realizados houve perfuração da blindagem, portanto, toda a energia cinética inerente ao projétil foi dissipada no interior da blindagem multicamada em associação com a indentação gerada na plastilina (LUZ, 2014). Foi possível observar também que a blindagem com camada intermediária de compósito de epóxi-fibra de sisal, (FIG. 4.3), apresentou, após o impacto, intensa delaminação na direção das fibras, a ponto de proporcionar a ruptura total da camada de compósito. Esse é um mecanismo típico de fratura de compósitos reforçados com fibras unidirecionais.



FIG. 4.3: Blindagem multicamada com compósito epóxi-fibra de sisal após o impacto balístico.



FIG. 4.4: Blindagem multicamada com compósito epóxi-tecido de sisal após o ensaio balístico.

O desempenho balístico dos corpos de prova foi avaliado conforme a profundidade do trauma provocado na plastilina, após o impacto balístico, para cada tipo de configuração das blindagens confeccionadas.

A TAB. 4.2 apresenta os valores obtidos para a profundidade de indentação, medida na plastilina, velocidade de impacto do projétil, energia de impacto, tipo de camada intermediária e a espessura desta camada, das blindagens confeccionadas neste trabalho em comparação com os resultados obtidos por Luz (2014) para as blindagens de aramida.

TAB. 4.2: Tipo de camada intermediária, valores de indentação, velocidade de impacto do projétil, energia de impacto e a espessura desta camada.

| <b>Blindagem</b> | <b>Tipo</b> | <b>Indentação<br/>(mm)</b> | <b>Espessura<br/>camada<br/>(mm)</b> | <b>Velocidade<br/>de impacto<br/>(m/s)</b> | <b>Energia de<br/>impacto (kJ)</b> | <b>Referência</b> |
|------------------|-------------|----------------------------|--------------------------------------|--|------------------------------------|-------------------|
| 1                | Fibra       | 21,84                      | 9,87                                 | 835,62                                     | 3,39                               | *PT               |
| 2                | Fibra       | 18,24                      | 11,66                                | 840,87                                     | 3,43                               | *PT               |
| 3                | Fibra       | 19,26                      | 11,86                                | 822,83                                     | 3,28                               | *PT               |
| 4                | Fibra       | 20,87                      | 12,06                                | 824,03                                     | 3,29                               | *PT               |
| 5                | Fibra       | 16,94                      | 11,28                                | 798,25                                     | 3,09                               | *PT               |
| 6                | Fibra       | 17,69                      | 11,52                                | 811,67                                     | 3,20                               | *PT               |
| 7                | Fibra       | 18,55                      | 11,44                                | 821,08                                     | 3,27                               | *PT               |
| 8                | Fibra       | 15,94                      | 12,70                                | 827,91                                     | 3,32                               | *PT               |
| 9                | Fibra       | 17,17                      | 11,68                                | 810,64                                     | 3,19                               | *PT               |
| 10               | Fibra       | 15,25                      | 12,26                                | 829,20                                     | 3,33                               | *PT               |
| 11               | Tecido      | 16,21                      | 11,94                                | 833,60                                     | 3,37                               | *PT               |
| 12               | Tecido      | 13,83                      | 11,54                                | 820,17                                     | 3,26                               | *PT               |
| 13               | Tecido      | 19,26                      | 11,27                                | 829,67                                     | 3,34                               | *PT               |
| 14               | Tecido      | 14,49                      | 11,78                                | 810,57                                     | 3,19                               | *PT               |
| 15               | Tecido      | 12,09                      | 11,81                                | 828,24                                     | 3,33                               | *PT               |
| 16               | Tecido      | 15,43                      | 11,82                                | 830,00                                     | 3,34                               | *PT               |
| 17               | Tecido      | 13,76                      | 11,75                                | 828,99                                     | 3,33                               | *PT               |
| 18               | Tecido      | 19,78                      | 11,79                                | 825,54                                     | 3,31                               | *PT               |
| 19               | Tecido      | 19,27                      | 11,53                                | 838,98                                     | 3,41                               | *PT               |
| 20               | Tecido      | 16,16                      | 12,11                                | 833,78                                     | 3,37                               | *PT               |
| 21               | Aramida     | 17,56                      | 10,00                                | 840,45                                     | 3,43                               | LUZ, 2014         |
| 22               | Aramida     | 21,07                      | 10,00                                | 814,01                                     | 3,21                               | LUZ, 2014         |
| 23               | Aramida     | 21,79                      | 10,00                                | 842,78                                     | 3,44                               | LUZ, 2014         |
| 24               | Aramida     | 23,16                      | 10,00                                | 849,90                                     | 3,50                               | LUZ, 2014         |
| 25               | Aramida     | 24,98                      | 10,00                                | 831,69                                     | 3,35                               | LUZ, 2014         |
| 26               | Aramida     | 25,04                      | 10,00                                | 842,07                                     | 3,44                               | LUZ, 2014         |
| 27               | Aramida     | 25,11                      | 10,00                                | 829,15                                     | 3,33                               | LUZ, 2014         |

\*PT: Presente Trabalho

Os materiais testados como camada intermediária do sistema de blindagem multicamadas atenderam as especificações da norma NIJ 0101.04 (2000), que especifica que para que a blindagem seja eficiente e não cause danos, que possam ser letais aos seus usuários, é necessário que a medida da indentação, causada pelo impacto do projétil, não ultrapasse o limite de 44 mm. De acordo com a TAB. 4.2 nenhum dos valores de indentação observados ultrapassaram esse valor.

Já na TAB. 4.3 são apresentadas as médias dos valores obtidos no ensaio balístico e na caracterização das camadas intermediárias das blindagens multicamadas testadas neste trabalho em comparação com os resultados da aramida obtidos por Luz (2014).

TAB. 4.3: Valores médios obtidos na caracterização das camadas intermediárias das blindagens multicamadas e nos ensaios balísticos.

| Camada intermediária | Espessura  |                            | Indentação | Velocidade             | Energia de         | Referência |
|----------------------|------------|----------------------------|------------|------------------------|--------------------|------------|
|                      | média (mm) | média (g/cm <sup>3</sup> ) | média (mm) | de impacto média (m/s) | impacto média (kJ) |            |
| Fibra                | 11,63      | 1,100                      | 18,17      | 822,21                 | 3,28               | *PT        |
| Tecido               | 11,73      | 1,140                      | 16,03      | 827,95                 | 3,32               | *PT        |
| Aramida              | 10,00      | 1,400                      | 22,67      | 835,72                 | 3,39               | LUZ, 2014  |

\*PT: Presente Trabalho

Como pode ser observado nesta tabela (TAB. 4.3) as placas compósitas reforçadas com tecido de sisal apresentaram a menor indentação média, 16,03 mm, se comparado aos demais materiais relacionados, demonstrando melhor desempenho balístico. Dessa forma, em comparação com as blindagens confeccionadas com sisal, o tecido de aramida foi a camada de material intermediária que apresentou pior desempenho balístico, com profundidade de indentação média de 22,67 mm (LUZ, 2014). Isto representa uma profundidade de indentação 41,42 % maior que a indentação média da blindagem com compósito de tecido de sisal e 24,76 % maior que a blindagem com compósito de fibra de sisal.

De acordo com Luz (2014) uma possível justificativa para esse comportamento pode ser atribuída às menores densidades dos compósitos comparadas ao tecido de aramida, uma vez que, quanto menor a densidade, maior deve ser a redução da energia de impacto, pois a baixa impedância de choque da camada intermediária transmitirá menos

energia do pulso de compressão. Porém, mesmo os compósitos de tecido de sisal apresentando uma densidade média um pouco superior a dos compósitos confeccionados com fibras de sisal, a indentação média dos compósitos epóxi-tecido é menor, pois para estes materiais existem mecanismos adicionais que auxiliam na absorção de energia.

Os resultados obtidos na TAB. 4.3 também podem ser comparados com os de outros compósitos, como os compósitos de epóxi- juta (LUZ, 2014) e epóxi-curauá (SILVA, 2014a). Dessa forma, os compósitos reforçados com tecido e fibra de sisal apresentaram melhor desempenho balístico do que o compósito de epóxi reforçado com 30% em volume de tecido de juta (indentação média de 20,67 mm). Já para os compósitos de epóxi reforçados com 30% em volume de manta de juta (indentação média de 17,51 mm) e o compósito reforçado com 30% em volume de fibra de curauá (indentação média de 16,42 mm), apenas o compósito de epóxi com tecido de sisal apresentou resultado superior.

Uma possível explicação para o fato da blindagem multicamadas com camada intermediária de compósito epóxi-tecido de sisal apresentar melhor desempenho balístico é devido à propagação de fendas ao longo do padrão ondulante dos fios do tecido, que cria uma grande área de superfície de fratura, proporcionando a distribuição das tensões em varias frentes de trincas de delaminação, e por consequência maior absorção da energia de impacto (HOSUR et al, 2004).

Para os resultados de indentação referentes às blindagens multicamadas confeccionadas neste trabalho, foi aplicado o método estatístico de Weibull. Os gráficos obtidos para as multiblindagens com os compósitos reforçados com fibra de sisal e tecido de sisal, como camada intermediária, são representados pelas FIG. 4.5 e FIG. 4.6 respectivamente.

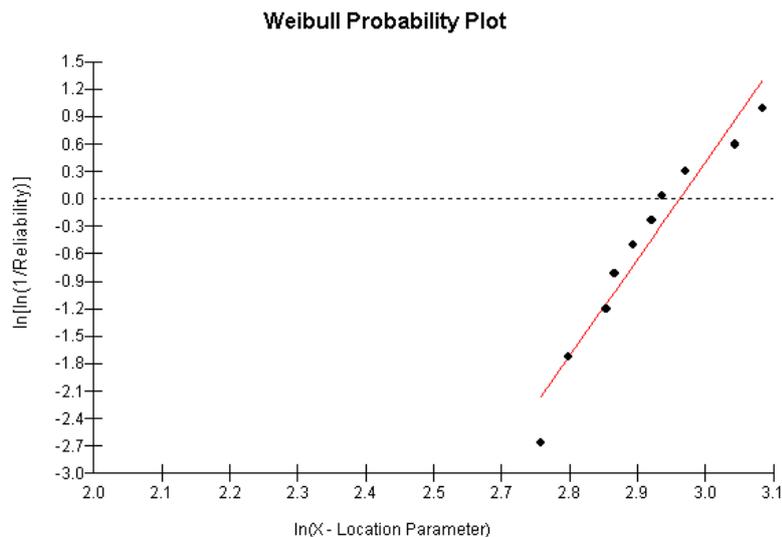


FIG. 4.5: Gráfico de distribuição de Weibull das indentações para as placas compósitas de epóxi reforçado com fibra de sisal.

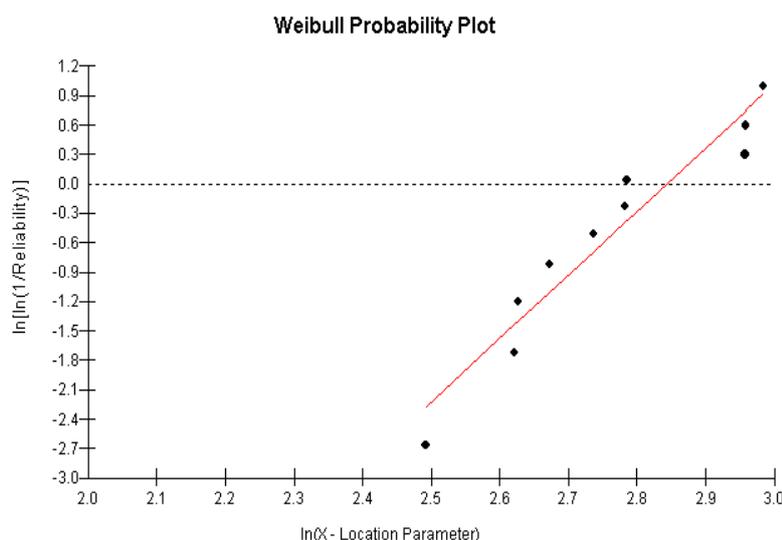


FIG. 4.6: Gráfico de distribuição de Weibull das indentações para as placas compósitas de epóxi reforçado com tecido de sisal.

Os parâmetros de Weibull obtidos dos gráficos das FIG. 4.5 e FIG. 4.6 estão apresentados na TAB. 4.4. Nesta situação o parâmetro  $\theta$  representa a profundidade da indentação mais característica, ou seja, a profundidade de indentação que melhor representa o grupo de amostra. O parâmetro de ajuste  $R^2$  indica o grau de precisão da análise estatística, e quanto maior o valor de  $\beta$ , maior a confiabilidade dos resultados.

TAB. 4.4: Parâmetros de Weibull obtidos dos resultados balísticos das blindagens multicamadas com placa compósita reforçada com fibra e tecido de sisal.

| Camada intermediária | Módulo de Weibull ( $\beta$ ) | Unidade característica ( $\theta$ ) | Coefficiente de correlação ( $R^2$ ) | Desvio Padrão |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------|
| Fibra                | 9,627                         | 19,08                               | 0,9382                               | 2,26          |
| Tecido               | 6,787                         | 17,16                               | 0,9280                               | 2,88          |

De acordo com a TAB. 4.4 os compósitos confeccionados com fibra de sisal apresentaram maior confiabilidade dos dados (9,627), uma vez que possuem maior valor de  $\beta$  se comparado com os compósitos de tecido de sisal; da mesma forma o compósito de fibra de sisal apresentou menor desvio padrão (2,26). Além disso, os dois grupos de camadas intermediárias exibiram excelentes ajustes, com  $R^2$  superiores a 0,9.

Nota-se também que os gráficos (FIG. 4.5 e FIG. 4.6) apontam um comportamento unimodal, ou seja, com apenas uma linha reta para todos os pontos de indentação, isso indica que as blindagens de fibra e tecido de sisal pertencem a um mesmo grupo de desempenho balístico (LUZ, 2014).

#### 4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS TESTES DE VELOCIDADE RESIDUAL

Cabe também nessa discussão avaliar o comportamento balístico individual de cada camada intermediária utilizada nos sistemas de blindagem multicamadas; para isso foram realizados testes onde as placas de compósito de sisal foram alvejadas isoladamente, sem a condição de possuírem o apoio na camada de plastilina. Dessa forma, por meio do radar Doppler, foi possível capturar a velocidade de impacto do projétil ( $V_i$ ) e a velocidade residual ( $V_r$ ), velocidade que o projétil possui após a perfuração do alvo.

Tais testes foram realizados para gerar uma base de dados comparativa em relação a trabalhos anteriores, para compósitos de curauá (SILVA, 2014a), compósitos de juta e tecido de aramida (LUZ, 2014).

Por meio dos dados obtidos nesse ensaio foi possível calcular a energia absorvida pelas camadas intermediárias da blindagem multicamadas individualmente, com o

auxílio das EQ. 2.9 e EQ. 2.10. A TAB. 4.5 apresenta esses valores juntamente com os valores das velocidades médias de impacto e velocidades residuais.

TAB. 4.5: Valores das velocidades médias de impacto e residual, energia absorvida e velocidade limite para cada componente do sistema de blindagem multicamada.

| <b>Componente da blindagem</b> | <b>Média <math>V_i</math> (m/s)</b> | <b>Média <math>V_r</math> (m/s)</b> | <b><math>E_{abs}</math> (J)</b> | <b>% <math>E_{abs}</math></b> | <b><math>V_L</math> (m/s)</b> | <b>Referência</b> |
|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Fibra de sisal                 | 845,06 ± 3,54                       | 823,86 ± 5,10                       | 171,58                          | 5,0                           | 188,09                        | *PT               |
| Tecido de sisal                | 844,91 ± 6,04                       | 817,46 ± 4,82                       | 221,33                          | 6,4                           | 213,62                        | *PT               |
| Alumínio 6061                  | 842,30 ± 5,75                       | 811,36 ± 6,48                       | 248,10                          | 7,2                           | 226,18                        | LUZ, 2014         |
| Cerâmica                       | 847,52 ± 5,51                       | 566,67 ± 4,32                       | 1920,41                         | 55,1                          | 629,25                        | SILVA, 2014a      |
| Aramida                        | 848,13 ± 3,44                       | 840,99 ± 6,99                       | 58,48                           | 1,7                           | 109,81                        | SILVA, 2014a      |
| Tecido de juta                 | 841,45 ± 6,50                       | 822,81 ± 6,41                       | 150,50                          | 4,4                           | 176,16                        | LUZ, 2014         |
| Manta de juta                  | 843,80 ± 4,78                       | 819,18 ± 7,19                       | 198,54                          | 5,7                           | 202,33                        | LUZ, 2014         |
| Curauá                         | 848,30 ± 6,36                       | 835,29 ± 6,17                       | 106,16                          | 3,0                           | 147,95                        | SILVA, 2014a      |

\*PT: Presente Trabalho

Baseado nos valores encontrados na TAB. 4.5 é possível observar que dentre todos os componentes da blindagem multicamadas, a cerâmica apresentou a maior absorção da energia de impacto (55,1 %), já o tecido de aramida a menor absorção (1,7 %). Esses dados mostram que o tecido de aramida não é uma barreira muito eficaz contra a munição 7,62 x 51 mm, em comparação com os materiais compósitos. Isso pode ser explicado pelo fato dos compósitos possuírem uma matriz frágil, capaz de dissipar mais energia através da fragmentação (LUZ, 2014).

Conforme esperado o compósito de epóxi reforçado com tecido de sisal foi o compósito que apresentou a maior absorção de energia (6,4%), seguido do compósito com manta de juta (5,7 %) e do compósito com fibra de sisal (5,0 %). Porém ao fazer o comparativo com o trabalho de Silva (2014a), foi constatado que mesmo o compósito de curauá apresentado a menor porcentagem de energia absorvida (3,0 %), dentre os compósitos relacionados, ele apresentou baixos valores de indentação média (16,42 mm), perdendo apenas para o compósito com tecido de sisal (16,03 mm). Uma possível explicação pode ser atribuída às propriedades mecânicas dessa fibra lignocelulósica, que

apresenta elevados valores de resistência à tração e módulo de elasticidade (SATYANARAYANA et al, 2007; MONTEIRO et al, 2011).

Para os resultados de velocidade limite também foi aplicado o método estatístico de Weibull, cujos gráficos gerados estão apresentados nas FIG. 4.7 e FIG. 4.8 para o compósito de fibra de sisal e compósito de tecido de sisal respectivamente.

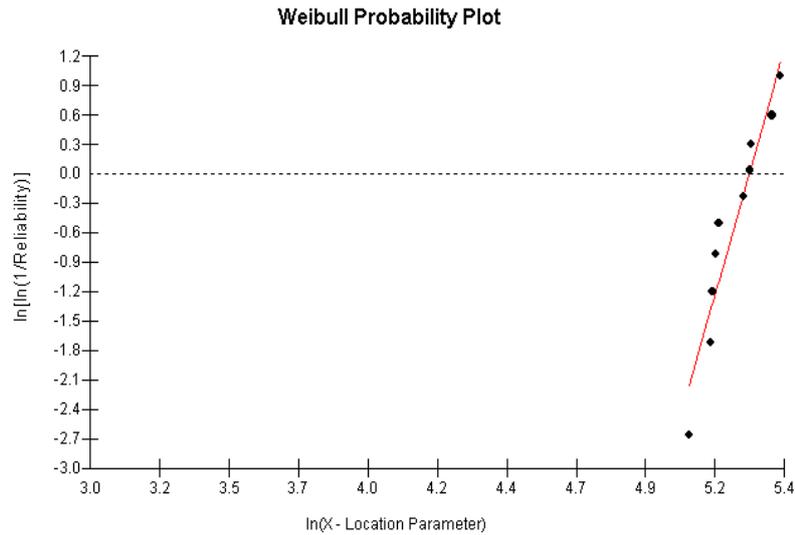


FIG. 4.7: Gráfico de distribuição de Weibull das velocidades limites para as placas compósitas de epóxi reforçadas com fibra de sisal.

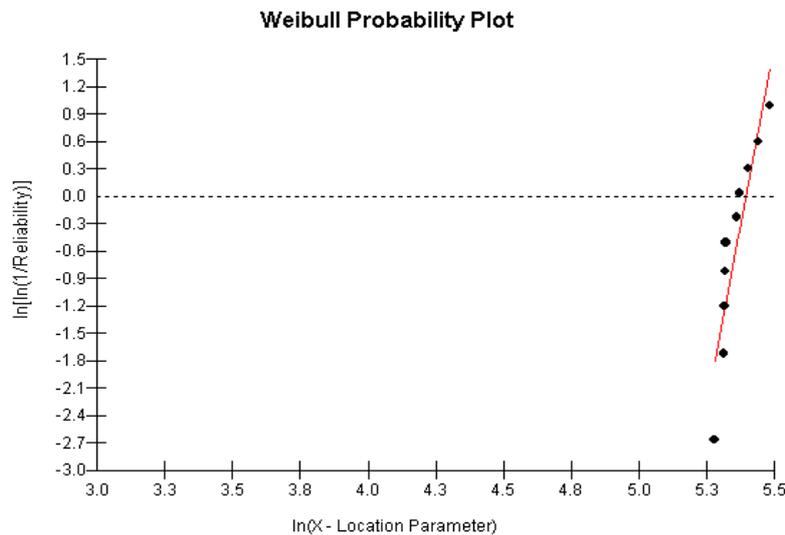


FIG. 4.8: Gráfico de distribuição de Weibull das velocidades limites para as placas compósitas de epóxi reforçadas com tecido de sisal.

Para esta situação o parâmetro  $\theta$  representa a velocidade limite ( ) mais característica, ou seja, a velocidade limite que melhor representa o grupo de amostra.

Dessa forma, os parâmetros de Weibull obtidos dos gráficos da FIG. 4.7 e FIG. 4.8 estão apresentados na TAB. 4.6.

TAB. 4.6: Parâmetros de Weibull obtidos dos resultados dos ensaios de velocidade residual para a placa compósita reforçada com fibra e tecido de sisal.

| <b>Material</b>              | <b>Módulo de Weibull (<math>\beta</math>)</b> | <b>Unidade característica (<math>\theta</math>)</b> | <b>Coefficiente de correlação (<math>R^2</math>)</b> | <b>Desvio Padrão</b> |
|------------------------------|---|---|--|----------------------|
| Compósito de fibra de sisal  | 10,46   | 195,8   | 0,9119   | 21,52                |
| Compósito de tecido de sisal | 15,59   | 220,01  | 0,8259   | 16,77                |

De acordo com a TAB. 4.6 o compósito de tecido de sisal apresentou maior velocidade limite ( ) característica (220,01 m/s), isso indica que este compósito é capaz de absorver uma maior quantidade de energia, em comparação com o compósito de fibra de sisal, pois o compósito com tecido cria uma grande área de superfície de fratura devido às características da trama do tecido. Além do mais, de acordo com a estatística o compósito de fibra de sisal apresentou maior precisão estatística (0,91), indicando resultados mais homogêneos se comparado ao compósito com tecido de sisal.

A coleta dos dados experimentais para determinar a velocidade limite ( ) se deu por meio de gráficos, conforme FIG. 4.9, onde os pontos representam os dados de velocidade experimentalmente obtidos a partir do espectro de radar de um alvo de compósito de tecido de sisal com uma curva polinomial contínua ajustada. A queda abrupta da velocidade indica o momento do impacto do projétil com o compósito de tecido de sisal. O impacto aconteceu quando o projétil tinha aproximadamente 841 m/s de velocidade ( ) já a velocidade mínima atingida nessa queda é a velocidade residual ( ), que neste caso foi aproximadamente 816 m/s. Para todos os ensaios de velocidade residual foram obtidos gráficos semelhantes a este.

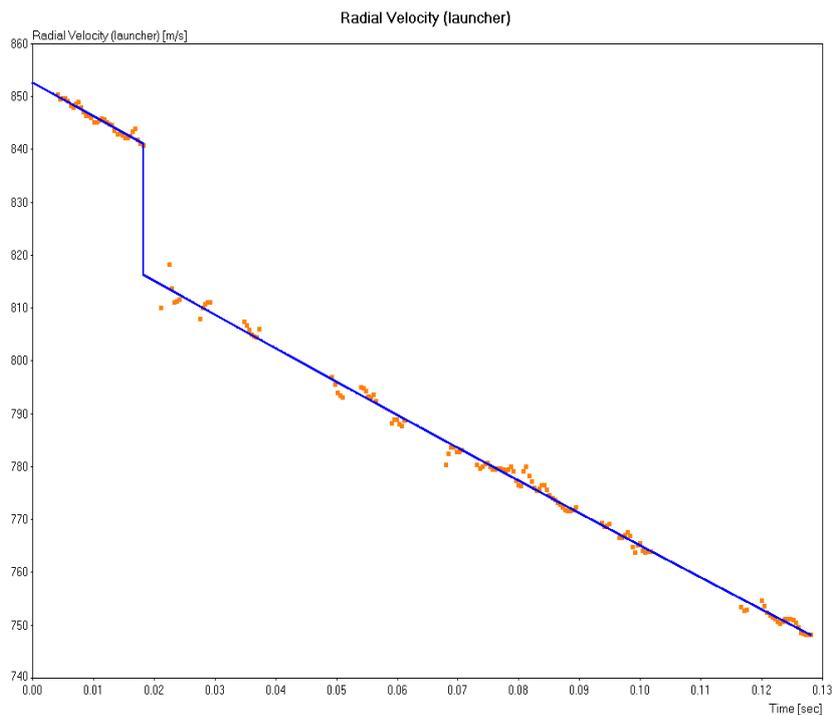


FIG. 4.9: Gráfico de pontos experimentais do ensaio de velocidade residual do compósito de tecido de sisal.

#### 4.4 INTERAÇÃO DAS ONDAS DE CHOQUE NAS BLINDAGENS MULTICAMADAS

Foram realizados cálculos de impedância de choque, velocidade de partícula, e pressão de interface para as blindagens multicamadas confeccionadas neste trabalho, também com o objetivo também fazer um comparativo com resultados obtidos em trabalhos anteriores. Para tais cálculos aplicou-se o método de casamento de impedâncias e as equações de conservação descritas anteriormente (EQ.2.4, EQ.2.5 e EQ.2.6).

A TAB. 4.7 apresenta os parâmetros característicos dos materiais utilizados nesses cálculos.

TAB. 4.7: Valores da velocidade da onda de choque e dos parâmetros característicos de cada material.

| Material | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | C (m/s) | S     | Us (m/s)          | Referência   |
|----------|-----------------------------|---------|-------|-------------------|--------------|
| Chumbo   | 11300                       | 2066    | 1,517 | $2066 + 1,517U_s$ |              |
| Aramida  | 1440                        | 1180    | 2,420 | $1180 + 2,420U_s$ | MEYERS, 1994 |
| Alumínio | 2700                        | 5328    | 1,338 | $5328 + 1,338U_s$ |              |
| Alumina  | 3530                        | -       | -     | 10375,39          | SILVA, 2014a |

Para a alumina foi utilizada a velocidade da onda elástica como velocidade da onda de choque, anteriormente adotada por Silva (2014a) e Luz (2014). Como também não foi possível obter na literatura os parâmetros específicos para o compósito epóxi-sisal, a velocidade da onda de choque ( $U_s$ ) foi substituída pela velocidade de onda elástica, expressa pela EQ 2.2. O módulo de elasticidade do compósito epóxi-sisal foi estimado a partir da regra das misturas, dada pela EQ. 4.1.

$$E_c = E_m V_m + E_f V_f \quad \text{EQ. 4.1}$$

Onde ( $E_c$ ) é módulo de elasticidade do compósito, ( $E_m$ ) e ( $E_f$ ) são os módulos de elasticidade da matriz e da fibra, respectivamente, ( $V_m$ ) representa a fração de volume da matriz e ( $V_f$ ) da fibra. Como as fibras lignocelulósicas apresentam propriedades muito variáveis, para o cálculo do módulo de elasticidade do compósito foram adotados os limites mínimo e máximo do módulo de elasticidade da fibra de sisal retirados da literatura (MONTEIRO et al, 2011).

Os valores calculados, mínimo e máximo, do módulo de elasticidade do compósito assim como da velocidade da onda elástica para o compósito epóxi-sisal constam na TAB. 4.8.

TAB. 4.8: Valores do módulo de elasticidade e da onda elástica do compósito epóxi-sisal

|      | $E_{sisal}$ (GPa) | $E_{epóxi}$ (GPa) | $E_c$ (GPa) | $C_0$ (m/s) |
|------|-------------------|-------------------|-------------|-------------|
| Mín. | 9,00              |                   | 4,39        | 1948,91     |
| Máx. | 28,00             | 2,41              | 10,09       | 2955,22     |

A velocidade de projétil adotada neste trabalho,  $863,63 \pm 9,46$  m/s, foi mesma adotada por Silva (2014a) e Luz (2014), para estabelecer a mesma base comparativa.

A TAB. 4.9 apresenta os valores obtidos nos cálculos das velocidades de onda de choque ( $U_S$ ) de partícula ( $U_P$ ) da pressão ( $P$ ) nas interfaces de cada componente da blindagem multicamada. Conforme estabelecido anteriormente, as interfaces envolvendo o compósito de epóxi-sisal apresentam valores de mínimo e máximo, uma vez que a velocidade de onda desse compósito foi calculada considerando os valores limites da fibra de sisal que constam na literatura.

TAB. 4.9: Valores da velocidade de partícula, pressão e velocidade de onda de choque nas interfaces de cada componente da blindagem multicamada e a natureza da onda de choque.

| <b>Interface</b>                              |      | <b>Up (m/s)</b> | <b>P(GPa)</b> | <b>Us(m/s)</b> | <b>Natureza da onda de choque</b> |
|---|------|-----------------|---------------|----------------|-----------------------------------|
| Pb-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>             |      | 398,14          | 14,58         | 10375,39       | Compressiva                       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(Epóxi/sisal) | Mín. | 750,17          | 1,69          | 1948,91        | Trativa                           |
|   | Máx. | 728,39          | 2,49          | 2955,22        | Trativa                           |
| (Epóxi/sisal)-Al                              | Mín. | 194,76          | 2,94          | 5588,59        | Compressiva                       |
|   | Máx. | 265,10          | 4,07          | 5682,71        | Compressiva                       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Aramida       |      | 714,55          | 2,99          | 2909,21        | Trativa                           |
| Aramida-Al                                    |      | 365,84          | 5,75          | 5817,49        | Compressiva                       |

Na TAB. 4.10 constam as impedâncias sônicas de cada componente da blindagem multicamada. De acordo com os resultados expressos nessa tabela, a aramida exibiu maior impedância dentre os materiais utilizados como camada intermediária. Esse valor justifica a menor redução de energia de impacto, verificada pela maior profundidade média de indentação (22,67mm) obtida em trabalhos anteriores, pois, em princípio, para uma maior impedância de choque da camada intermediária, maior a energia do pulso de compressão transmitida (LUZ, 2014)

TAB. 4.10: Valores de densidade, módulo de elasticidade, velocidade das ondas refletidas e impedância de choque nas interfaces da blindagem multicamada.

| <b>Material</b>    | <b>Densidade<br/>(kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>E<br/>(GPa)</b> | <b>Velocidade<br/>de onda (m/s)</b> | <b>Impedância<br/>(kg/(m<sup>2</sup>s))</b> |
|--------------------|---|--------------------|-------------------------------------|---|
| Aramida            | 1440                                    | 131                | 9.537,94                            | 13,73 x 10 <sup>6</sup>                     |
| Epóxi/Sisal (mín.) | 1155                                    | 9                  | 1.948,91                            | 2,25 x 10 <sup>6</sup>                      |
| Epóxi/Sisal (máx.) | 1155                                    | 28                 | 2.955,22                            | 3,41 x 10 <sup>6</sup>                      |
| Epóxi/Juta (mín.)  | 1167                                    | 13                 | 2.188,03                            | 2,55 x 10 <sup>6</sup>                      |
| Epóxi/Juta (máx.)  | 1167                                    | 27                 | 2.895,94                            | 3,38 x 10 <sup>6</sup>                      |
| Curauá 30%         | 1150                                    | 5,23               | 2.132,56                            | 2,45 x 10 <sup>6</sup>                      |
| Chumbo             | 11300                                   | 48,23              | 2.066,00                            | 23,35 x 10 <sup>6</sup>                     |
| Alumina            | 3530                                    | 380                | 10.375,39                           | 36,62 x 10 <sup>6</sup>                     |
| Alumínio           | 2700                                    | 69                 | 5.045,92                            | 13,62 x 10 <sup>6</sup>                     |

#### 4.5 CUSTOS

Além dos resultados apresentados até aqui, os compósitos de epóxi-sisal apresentam duas importantes características que os fazem serem atrativos, eles são mais leves e mais baratos do que o tecido de aramida, material normalmente utilizado em blindagens individuais. A TAB. 4.11 apresenta o custo de cada componente da blindagem multicamada, assim como, os parâmetros utilizados para esse cálculo. Os valores utilizados para o cálculo dos custos da TAB. 4.11 foram obtidos através da literatura (CALLISTER, 2010; CONAB, 2012; SILVA, 2014a e LUZ, 2014).

Para fins de cálculo foi considerado que cada camada de material utilizado possui área de 225 cm<sup>2</sup>, área correspondente à superfície da placa de alumínio.

TAB. 4.11: Relação de custo dos componentes utilizados na blindagem.

| <b>Componente da blindagem</b>             | <b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Peso (kg)</b> | <b>Preço (US\$/kg)</b> | <b>Custo do componente (US\$)</b> |
|--|--------------------------------|-------------------------------------|------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Cerâmica (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 225                            | 3,53                                | 0,794            | 33,00                  | 26,20                             |
| Tecido de aramida                          | 225                            | 1,40                                | 0,315            | 63,60                  | 20,03                             |
| Compósito (0,30%v de fibras)               | Epóxi                          | 1,11                                | 0,175            | 2,80                   | 0,53                              |
|  | Sisal                          | 1,26                                | 0,085            | 0,41                   |                                   |
| Alumínio 6061                              | 112,5                          | 2,70                                | 0,304            | 8,50                   | 2,58                              |

Já a TAB.4.12 apresenta o comparativo do peso e dos custos totais entre a blindagem multicamadas utilizando o tecido de aramida e a blindagem multicamadas confeccionadas neste trabalho.

TAB. 4.12 – Comparativo de custo e peso total das blindagens multicamadas.

| <b>Camada intermediária</b> | <b>Peso total (kgf)</b> | <b>Redução de peso (%)</b> | <b>Custo total (US\$)</b> | <b>Redução de custo (%)</b> |
|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Aramida                     | 1,413                   | 3,89                       | 48,81                     | 39,95                       |
| Compósito epóxi-sisal       | 1,358                   |                            | 29,31                     |                             |

A incorporação do compósito de sisal a blindagem multicamadas representa uma redução de peso de 3,89% e uma redução de custos de 39,95%, em comparação com a blindagem tradicional utilizando tecido de aramida.

#### 4.6 ANÁLISE DAS MICROGRAFIAS OBTIDAS NO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV)

As fotos obtidas por microscopia eletrônica de varredura permitiram observar os mecanismos de fratura dos compósitos e os mecanismos de captura dos fragmentos cerâmicos, além de ressaltar algumas características importantes dos mesmos.

Na FIG. 4.10, obtida no MEV é possível observar a superfície típica de fratura do compósito de epóxi reforçado com fibra sisal. Nota-se a boa impregnação da resina

epoxídica às fibras de sisal, além do aspecto frágil da fratura da matriz, sendo este um dos mecanismos de dissipação de energia dos compósitos.

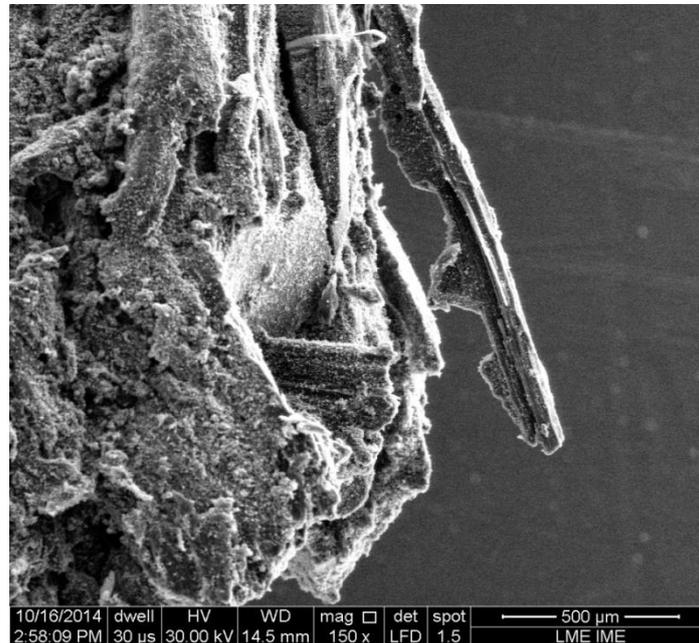


FIG. 4.10: Micrografia obtida no MEV da superfície típica de fratura do compósito de epóxi reforçado com fibras de sisal. Aumento de 150x.

Já na amostra analisadas na FIG. 4.11, foi possível observar o fenômeno de incrustação das partículas cerâmicas na camada superficial do compósito, descrito por Monteiro e colaboradores (2014b). Esse mecanismo é responsável pela dissipação de energia cinética, contribuindo ainda mais para o melhor desempenho balístico das blindagens. Os mecanismos de captura de fragmentos de material cerâmico estão provavelmente associados a incrustações mecânicas e forças de van der Waals. Tais fragmentos cerâmicos são os pontos brancos que recobrem o compósito, conforme observado na micrografia.

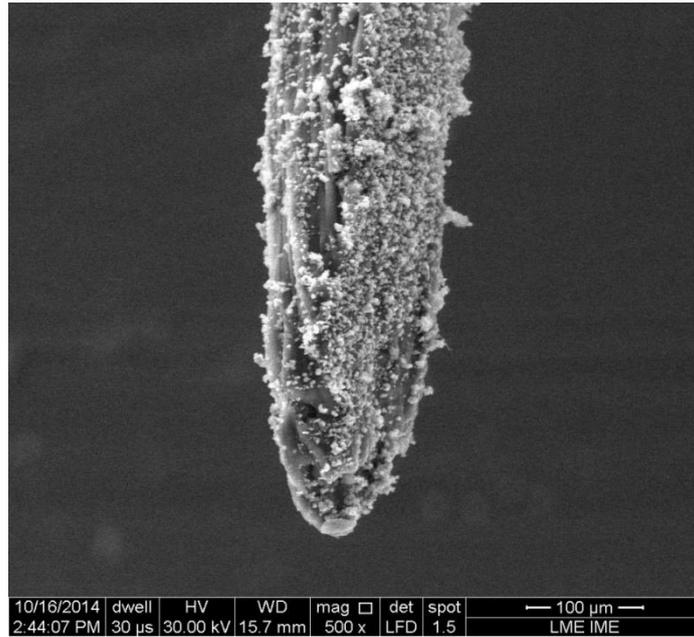


FIG. 4.11: Micrografia obtida no MEV da superfície do composto de epóxi reforçado com fibras de sisal recoberto por fragmentos cerâmicos. Aumento de 500x.

As blindagens que utilizaram como camada intermediária a camada de material composto reforçado com fibras de sisal, após os ensaios balísticos, apresentaram intensa delaminação no sentido da fibra de reforço (FIG. 4.12). Esse mecanismo de delaminação, juntamente com o rompimento das fibras, auxilia na dissipação de energia de impacto do projétil.



FIG. 4.12: Delaminação e rompimento das fibras do composto reforçado com fibras de sisal.

Já na FIG. 4.13 é possível observar a superfície típica de fratura do compósito de epóxi reforçado com tecido de sisal. Nesta micrografia é possível verificar a boa adesão da matriz às fibras do tecido. A boa adesão entre a fibra e matriz é responsável pela elevada resistência à propagação de trincas durante o ensaio balístico, conforme pode ser verificado na FIG. 4.14, que mesmo após o impacto balístico a placa compósita não se rompeu por completa.

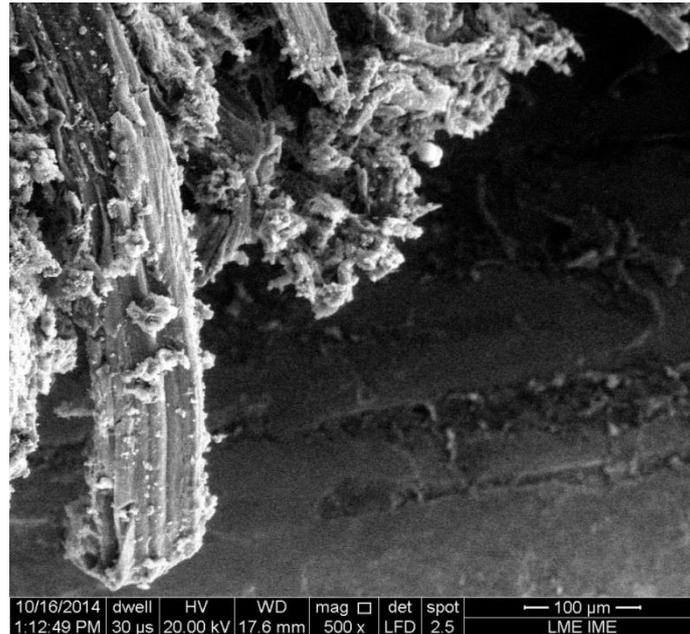


FIG. 4.13: Micrografia obtida no MEV da superfície típica de fratura do compósito de epóxi reforçado com tecido de sisal. Aumento de 500x.



FIG. 4.14: Blindagem de compósito reforçado com tecido de sisal após ensaio balístico.

A FIG. 4.15 indica que a fratura dos corpos cerâmicos foi predominantemente intergranular, conforme esperado. Madhu e colaboradores (2005) apontam que a mudança do mecanismo de fratura da alumina, devido à adição da nióbia, aumenta a absorção de energia de impacto.

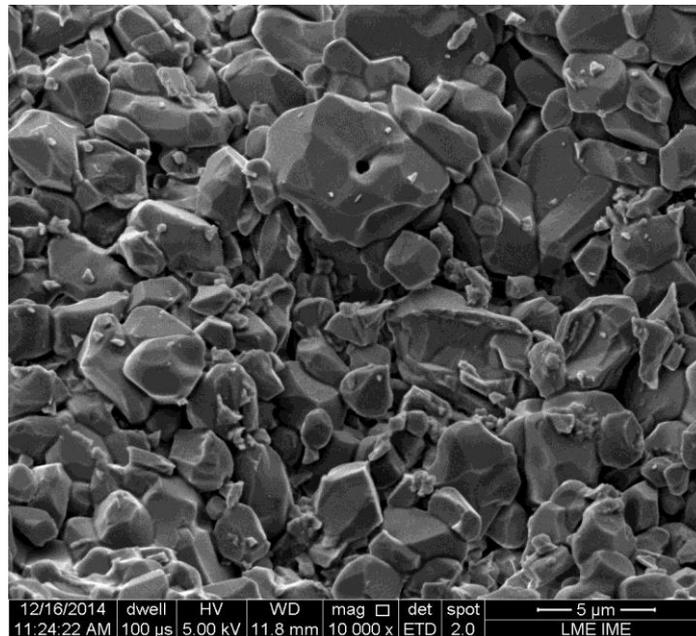


FIG. 4.15: Característica da fratura intergranular do corpo cerâmico. Aumento 10000x.

## 5 CONCLUSÕES

1) Os dois materiais utilizados como camada intermediária das blindagens multicamadas (compósito de epóxi reforçado com 30% em volume de fibra de sisal e compósito de epóxi reforçado com 30% em volume de tecido de sisal) atenderam as especificações propostas pela norma internacional NIJ 0101.04 (2000), ou seja, a profundidade de indentação foi abaixo do limite de 44 mm.

2) O compósito de epóxi reforçado com tecido de sisal, como camada intermediária do sistema de blindagem multicamadas, apresentou melhor desempenho balístico do que o compósito de epóxi reforçado com fibra de sisal. Nessa configuração a indentação média, medida na plastilina, foi de 16,03 mm. A aramida obteve o pior desempenho balístico, com profundidade média de indentação de 22,67 mm (LUZ, 2014). Além disso, comparativamente com os compósitos de outros trabalhos, a blindagem multicamadas com a camada intermediária de compósito de tecido de sisal obteve melhor desempenho balístico do que os compósitos de juta, indentações médias de 17,51 mm e 20,67 mm respectivamente para manta e tecido (LUZ, 2014), e curauá, indentação média de 16,42 mm (SILVA, 2014a). O melhor desempenho balístico da blindagem confeccionada com compósito de epóxi-tecido de sisal pode ser associado à maior absorção da energia de impacto do projétil devido à propagação de fendas ao longo do padrão ondulante dos fios do tecido, que cria uma grande área de superfície de fratura.

3) Para o desempenho individual de cada material utilizado como camada intermediária, o compósito com tecido de sisal apresentou maior velocidade limite, de 213,62 m/s, do que para o compósito com fibra de sisal, 188,09 m/s. Este melhor desempenho também está associado aos mecanismos de absorção da energia de impacto do projétil dos compósitos reforçados com tecido.

4) O compósito de epóxi reforçado com tecido de sisal apresentou absorção de energia de 6,4%, sendo essa a maior absorção de energia relacionada aos compósitos e a aramida utilizados como camada intermediária das blindagens multicamadas. Como já mencionado anteriormente, o melhor desempenho balístico está associado aos mecanismos de absorção de energia dos compósitos reforçados com tecido e a matriz

frágil dos compósitos. Outro fato relevante é que mesmo o compósito de epóxi-curauá, obtido por Silva (2014a), apresentando absorção de energia de 3%, obteve baixos valores de indentação (16,42 mm); a possível justificativa para isso pode ser atribuída às propriedades mecânicas da fibra de curauá, que apresenta elevada resistência à tração e elevado módulo de elasticidade.

5) Dentre os materiais utilizados como camada intermediária o tecido de aramida exibiu maior impedância,  $13,73 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ . Esse valor mais elevado justifica a menor redução de energia de impacto, verificada pela maior profundidade média de indentação obtida no ensaio balístico por Luz (2014).

6) A incorporação do compósito de sisal a blindagem multicamadas representa uma redução de peso de 3,89% ( $0,24\text{g}/\text{cm}^2$ ) e uma redução de custos de 39,95% ( $0,09\text{US}\$/\text{cm}^2$ ), em comparação com a blindagem tradicional utilizando tecido de aramida.

7) A da análise das superfícies fraturadas dos compósitos, indicou que a fibra de sisal contribuiu de maneira efetiva para aumentar a resistência da matriz de epóxi através dos mecanismos de delaminação e rompimento das fibras. Observou-se, também, que para todos os materiais testados como camada intermediária houve a incrustação partículas cerâmicas sobre a superfície das fibras. Logo todos os materiais avaliados como camadas intermediárias contribuem para a dissipação de energia através da captura dos fragmentos gerados pelo impacto do projétil.

## 6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o desempenho balístico de corpos de prova para blindagem multicamadas, com a camada intermediária confeccionadas com proporções variáveis em volume de fibras e tecido de sisal.
- Avaliar e comparar o desempenho balístico do compósito polimérico reforçado com 30% em volume de sisal utilizando outra matriz.
- Avaliar o comportamento balístico de uma blindagem multicamada utilizando apenas tecido de sisal colado e prensado.
- Avaliar o desempenho de uma blindagem multicamadas, com compósito epóxi-sisal, utilizando corpos cerâmicos com formatos côncavos e convexos.
- Avaliar o desempenho de uma blindagem multicamadas, com compósito epóxi-fibra de sisal, utilizando as fibras em direções diferentes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABERNETHY, R. B. **The new Weibull handbook**. Dr. Robert B. Abernethy, 2006.

AJDELSZTAJN, L.; BASTIAN, F. L. **Desenvolvimento de proteções balísticas compostas por resina epóxi reforçada por fibra de vidro e placas de alumina**. In: Congresso brasileiro de engenharia mecânica, XV , 1999 e São Paulo.

AMARAL, T. P.; BARRA, G. M.; BARCIA, F. L.; SOARES, B. G. **Estudo das propriedades de compósitos de polianilina e resina epoxídica**. *Polímeros*, v. 11, n. 3, p. 149-157, 2001.

ASKLAND, D.R.; PRADEEP P. PHULÉ. **The science and engineering of materials**. s.l. : PWS Pub. Co., 2008.

AVILA, M. G.; PORTANOVA, M.; RABIEI, A. **Ballistic performance of a composite metal foam-ceramic armor system**. *Procedia Materials Science*, v. 4, p. 151-156, 2014.

BELAADI, A.; BEZAZI, A.; MAACHE, M.; SCARPA, F. **Fatigue in Sisal Fiber Reinforced Polyester Composites: Hysteresis and Energy Dissipation**. *Procedia Engineering*, v. 74, p. 325-328, 2014.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. **Composites Reinforced with Cellulose Based Fibres**. *Progress in Polymer Science*, Vol. 4, 221-274, 1999.

BÜRGER, D.; DE FARIA, A. R.; DE ALMEIDA, S. F.; DE MELO, F. C.; DONADON, M. V. **Ballistic impact simulation of an armour-piercing projectile on hybrid ceramic/fiber reinforced composite armours**. *International Journal of Impact Engineering* 43, pp.63-77, 2012.

CALLISTER, W.D.; RETHWISH, D.G. **Materials Science and Engineering – An Introduction**. 8th edition, John Wiley & Sons, New York, NY, 2010.

CARVALHO, R. F. **Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

CHAGAS, C. F. de M. **Minimização do Efeito de Aresta em Blindagem Cerâmica à Base de Alumina**. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Sisal – Safra 2012/2013: comercialização – proposta de ações**. Disponível em <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12\\_10\\_29\\_11\\_45\\_31\\_sisal2012.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_10_29_11_45_31_sisal2012.pdf)>. Acesso em: 18 nov. 2014.

CORFIX. **Ficha de informação de segurança de produtos químicos**. 2011. Disponível em: <[http://www.corfix.com.br/produtos/i\\_ficha117-1.pdf](http://www.corfix.com.br/produtos/i_ficha117-1.pdf)>. Acesso em: 15 de agosto de 2014.

DAVID, N. V.; GAO, X. L.; ZHENG, J. Q. **Ballistic resistant body armor: contemporary and prospective materials and related protection mechanisms**. Applied Mechanics Reviews, v. 62, n. 5, p. 050802, 2009.

EICHHORN, S. J.; BAILLIE, C. A.; ZAFEIROPOULOS, N.; MWAIKAMBO, L. Y.; ANSELL, M. P.; DUFRESNE, A.; WILD, P. M. **Review: Current international research into cellulosic fibres and composites**. Journal of materials Science, Vol. 36 (9), 2107-2131, 2001.

ELMAHDY, E. E. **A new approach for Weibull modeling for reliability life data analysis**. Applied Mathematics and Computation, v. 250, p. 708-720, 2015.

FAVARO, S. L.; GANZERLI, T. A.; DE CARVALHO NETO, A. G. V.; DA SILVA, O. R. R. F.; RADOVANOVIC, E. **Chemical, morphological and mechanical analysis of sisal fiber-reinforced recycled high-density polyethylene composites**. Express Polym Lett, v. 4, n. 8, p. 465-473, 2010.

FROLLINI, E. **Lignina como substituta parcial do fenol em espumas e compósitos reforçados com fibras lignocelulósicas.** 2002. 238f. Tese (livre docência) - Instituto de química de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

GEORGE, J.; SREEKALA, M. S.; THOMAS, S. **A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites.** Polymer Engineering & Science, v. 41, n. 9, p. 1471-1485, 2001.

GOMES, A. V. **Comportamento balístico da alumina com adição de nióbia e variação da geometria do alvo.** Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2004.

GOPINATH, G.; ZHENG, J.Q.; BATRA, R.C. **Effect of matrix on ballistic performance of soft body armor.** Composite Structures 94; 2690–2696, 2012.

GRAM, H. E. **Durability of natural fibers in concrete.** Swedish Cement and Concrete Research Institute, Research Fo. 1:83, 225 pp, 1983.

HOSUR, M. V.; VAIDYA, U. K.; ULVEN, C.; JEELANI, S. **Performance of stitched/unstitched woven carbon/epoxy composites under high velocity impact loading.** Composite Structures, v.64, pp.455–466, 2004.

JACOBS, M.J.N.; J.L.J.V. DINGENEN. **Ballistic protection mechanisms in personal armour.** Journal of Materials Science 36, pp.3137 – 3142, 2001.

JOHN, M.J.; THOMAS, S. **Biofibers and Biocomposites.** Carbohydrate Polymers, Vol. 71, 343-364, 2008.

JOSEPH, K.; VARGHESE, S.; KALAPRASAD, G.; THOMAS, S.; PRASANNAKUMARI, L.; KOSHY, P.; PAVITHRAN, C. **Influence of interfacial adhesion on the mechanical properties and fracture behaviour of short sisal fibre reinforced polymer composites.** European Polymer Journal, v. 32, n. 10, p. 1243-1250, 1996.

JUNIOR, J. D. M. **Comportamento mecânico de compósitos com Poliéster e tecidos de sisal por moldagem manual. 2006.** Tese (Doutorado) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

KLASON, C.; KUBÁT, J.; STRÖMVALL, H.E. **The efficiency of cellulosic fillers in common thermoplastics. Part I. Filling without processing aids or coupling agents.** International Journal of Polymeric Materials. v.10, pp.159-187, 1984.

KRISHNAN, K.; SOCKALINGAM, S.; BANSAL, S.; RAJAN, S. D. **Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact.** Composites: Part B 41, pp.583–593, 2010.

LI, Y.; MAI, Y. W.; YE, L. **Sisal fibre and its composites: a review of recent developments.** Composites science and technology, v. 60, n. 11, p. 2037-2055, 2000.

LIPSON C. **Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments,** McGraw-Hill Inc., p.101-111; 1973.

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. da. **Avaliação do Comportamento Balístico de Blindagem Multicamada com Compósito de Epóxi Reforçado com Fibra de Juta.** Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, 2014.

MADHU, V.; RAMANJANEYULU, K.; BHAT, T. B.; GUPTA, N. K. **An experimental study of penetration resistance.** International Journal of Impact Engineering , v 32, p 337–350, 2005.

MARGEM, Jean Igor. **Estudo das características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de malva.** Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2013.

MARTIN, A. R.; MARTINS, M. A.; MATTOSO, L. H.; SILVA, O. R. R. F. **Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave sisalana**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 19, n. 1, p. 40-46, 2009.

MATTOSO, L. H. C.; FERREIRA, F. C.; CURVELO, A. A. S.; LEÃO, A. L.; CARVALHO, F. X.; FROLLINI, E. **Sisal fiber: morphology and applications in polymer composites**. Lignocellulosic-Plastics Composites, AL Leao, FX Carvalho, and E. Frollini (eds.), USP and UNESP, Brazil, 1997.

MEYERS, M.A. **Dynamic Behavior of Materials**. John Wiley & Sons, New York, 1994.

MOHANTY, A.K.; MISRA, M.; HINRICHSSEN, G. **Biofibres, Biodegradable Polymers and Bio-composites: An Overview**. Macromolecular Materials and Engineering, Vol. 276/277, 1–24, 2000.

MONTEIRO, S. N.; TERRONES, L. A. H.; CAMERINI, A. L.; PETRICCI, L.; D'ALMEIDA, J. R. M. **Propriedades de Compósitos de Tecido de Juta Descartado Reforçando Matriz de Polietileno Reciclado**. Revista Matéria, v. 11, n. 4, pp. 403 – 411, 2006a.

MONTEIRO, S. N.; AQUINO, R. C. M. P.; LOPES, F. P.; CARVALHO, E. A. D.; D'ALMEIDA, J. R. M. **Comportamento mecânico e características estruturais de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas e alinhadas de curauá**. Revista Matéria, v. 11, n. 3, p. 197-203, 2006b.

MONTEIRO, S. N.; LOPES, F. P. D.; FERREIRA, A. S.; NASCIMENTO, D. C. O. **Natural-Fiber Polymer-Matrix Composites: cheaper, tougher, and environmentally friendly – An overview**. JOM – A Publication of The Minerals, Metals & Materials Society; Vol. 61, nº1, pp.17-22, 2009.

MONTEIRO, S. N.; LOPES, F. P. D.; BARBOSA, A. P.; BEVITORI, A. B.; DA SILVA, I. L. A.; DA COSTA, L. L. **Natural Lignocellulosic Fibers as Engineering**

**Materials - An Overview.** Metallurgical And Materials Transactions A, Vol. 42A, pp.2963-2974, 2011.

MONTEIRO, S. N.; LOURO, L. H. L.; TRINDADE, W.; ELIAS, C. N.; FERREIRA, C. L.; LIMA, E. S.; WEBER, R. P.; SUAREZ, J. C. M.; FIGUEIREDO, A. B. H. da S.; PINHEIRO, W. A.; SILVA, L. C.; LIMA, E. P. **Natural Curaua Fiber Reinforced Epoxy Composite in Multilayered Ballistic Armor.** 6th Symposium on Dynamic Behavior of Materials, 2014, 2014a. (Submetido).

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

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.** Compos Sci Technol, vol. 60, pp. 2631-42, 2000.

MUKHERJEE, P. S.; SATYANARAYANA, K. G. **Structure and properties of some vegetable fibres.** Journal of materials science, v. 19, n. 12, p. 3925-3934, 1984.

NABI SAHED, D.; JOG J.P. **Natural Fiber Polymer composites a review.** Advances in Polymer Technology, Vol. 18(4), 351-363, 1999.

NETRAVALI, A. N.; CHABBA, S.. **Composites get greener.** Materials today, v. 6, n. 4, p. 22-29, 2003.

NIJ Standard 0101.04. **Ballistic Resistance of Personal Body Armor.** U.S. Department of Justice/Office of Justice Programs - National Institute of Justice, 2000.

OKSMAN, K.; WALLSTRÖM, L.; BERGLUND, L. **Morphology and mechanical properties of unidirectional sisal–epoxy composites.** Journal of Applied Polymer Science, v. 84, n. 13, p. 2358-2365, 2002.

OLIVEIRA, F. L. de. **A adição de fibras vegetais na composição dos Polímeros com ênfase no Polipropileno adicionado à Fibra de Sisal.** 48 f., 2003. Monografia - Faculdade de tecnologia da Zona Leste, São Paulo, 2009.

PAIVA, J. M. F.; FROLLINI, E. **Sugarcane bagasse reinforced phenolic and lignophenolic composites.** Journal of applied polymer science, v. 83, n. 4, p. 880-888, 2002.

Penteamento e estiragem das fibras (Disponível em: <[http://www.cosibra.com.br/processos\\_estrutura.php](http://www.cosibra.com.br/processos_estrutura.php)>. Acesso em 16 de dezembro de 2014).

PICANÇO, M. S. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá.** Rio de Janeiro, 2005. 101p. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

PINHEIRO, B. C. A.; ESTEVÃO, G. M.; VITOR, R. da R.. **Aplicação da Estatística de Weibull na Avaliação da Tensão de Ruptura a Flexão de Revestimento Cerâmico** (pp. 169-173). Revista da Estatística da Universidade Federal de Ouro Preto, v. 3, n. 3, 2014.

PIRES, G.; PEREIRA, D. S.; DIAS FILHO, N. L.; VECCHIA, G. D. **Caracterização físico-química e mecânica do sistema éster de Silsexquioxano/Resina Epóxi Dgeba/Dietilenotriamina.** Revista Matéria, v. 10, n. 2, p. 317-330, 2005.

Plantação de sisal (*Agave sisalana*) (Disponível em: <[http://www.cosibra.com.br/processos\\_estrutura.php](http://www.cosibra.com.br/processos_estrutura.php)>. Acesso em 16 de dezembro de 2014).

Raspagem mecânica das folhas de sisal por meio da máquina desfibradora (Disponível em: <[http://www.cosibra.com.br/processos\\_estrutura.php](http://www.cosibra.com.br/processos_estrutura.php)>. Acesso em 16 de dezembro de 2014).

RAUSAND, M.; HOYLAND, A. **System reliability theory: models, statistical methods, and applications.** John Wiley & Sons, 2004.

RONG, M. Z.; ZHANG, M. Q.; LIU, Y.; YANG, G. C.; ZENG, H. M. **The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites.** Composites Science and Technology, v. 61, n. 10, p. 1437-1447, 2001.

SAHEB, D. N.; JOG, J. P. **Natural fiber polymer composites: a review.** Advances in polymer technology, v. 18, n. 4, p. 351-363, 1999.

SANTOS, M. A. DOS; AMORIM JÚNIOR, W. F. DE; BASTIAN, F. L.; SUAREZ, J. C. M.; CARDOSO, A. L. DE V.; CHAVES, G. Q. **Comportamento sob Impacto Balístico de um Sistema Compósito para Blindagem.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 1, n. 1, 2006.

SATYANARAYANA, K.G.; GUIMARÃES, J.L.; WYPYCH, F. **Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications.** Composites: Part A, v. 38, p. 1694-1709, 2007.

Secagem ao ar das fibras de sisal (Disponível em: <[http://www.cosibra.com.br/processos\\_estrutura.php](http://www.cosibra.com.br/processos_estrutura.php)>. Acesso em 16 de dezembro de 2014).

SGRICCIA, N.; HAWLEY, M. C.; MISRA, M. **Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites.** Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 39, n. 10, p. 1632-1637, 2008.

SILVA, R. V. **Compósito de resina de poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais.** 157 f., 2003. Tese (Doutorado) – Universidade de São Carlos, São Carlos, 2003. São Carlos: USC, 2003.

SILVA, W. M. **Compósitos resina epóxi/nanotubos de carbono de paredes múltiplas: caracterização dos materiais de partida e avaliação das condutividades elétrica e térmica.** 2009. Dissertação (Mestrado) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Belo Horizonte. 2009.

SILVA, C. C.; CUNHA, R. A. D.; FELIPE, R. C. T. dos S.; FELIPE, R. N. B.; MEDEIROS, G. G. de. **Avaliação do desempenho mecânico de tecidos desenvolvidos de fibras de sisal para reforço em compósitos poliméricos.** In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, XV, 2010, Campina Grande - Paraíba.

SILVA, L. C. **Comportamento balístico do compósito epóxi–curauá em blindagem multicamada.** 2014. 142f. Tese (doutorado). Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro, 2014a.

SILVA, M. V. DA; STAINER, D.; AL-QURESHI, H. A.; HOTZA, D. **Ceramic armors for ballistic applications: a review.** Cerâmica, v. 60, n. 355, p. 323-331, 2014b.

TRINDADE, W. **Influência da geometria e da microestrutura no comportamento dinâmico da alumina aditivada com nióbia.** Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 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 / 4º Trimestre, pp. 71-79, 2013.

ZHONG, J. B.; LV, J.; WEI, C. **Mechanical properties of sisal fibre reinforced urea formaldehyde resin composites.** Express Polym Lett, v. 1, n. 10, p. 681-687, 2007.

ZUKAS, J. A. **Impact dynamics.** 1º editon ed. New York: John Wiley & Sons, 1982.