

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

LUCAS TEDESCO BOLZAN

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE UM SISTEMA  
DE BLINDAGEM MULTICAMADA COM COMPÓSITO DE POLIÉSTER  
REFORÇADO COM FIBRA E TECIDO DE SISAL

Rio de Janeiro

2016

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**LUCAS TEDESCO BOLZAN**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE UM SISTEMA  
DE BLINDAGEM MULTICAMADA COM COMPÓSITO DE POLIÉSTER  
REFORÇADO COM FIBRA E 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 Ciências em Ciência dos Materiais.

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

Rio de Janeiro

2016

c2016

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(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

620.11 Bolzan, Lucas Tedesco

B694a Avaliação do comportamento balístico de um sistema de blindagem multicamada com compósito de poliéster reforçado com fibra e tecido de sisal / Lucas Tedesco Bolzan; orientado por Sérgio Neves Monteiro – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2016.

102p.: il.

Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.

1. Curso de Ciência dos Materiais – teses e dissertações. 2. Balística. 3. Blindagem . 4. Fibras naturais. I. Monteiro, Sérgio Neves. II. Título. III. Instituto Militar de Engenharia.

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**LUCAS TEDESCO BOLZAN**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE UM SISTEMA  
DE BLINDAGEM MULTICAMADA COM COMPÓSITO DE POLIÉSTER  
REFORÇADO COM FIBRA E 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 Ciências em Ciência dos Materiais.

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

Aprovada em 23 de Março de 2016 pela seguinte Banca Examinadora:

---

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

---

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

---

Prof. Luís Carlos da Silva– D.C. da faculdade SENAI

Rio de Janeiro

2016

## AGRADECIMENTOS

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

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

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

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

Ao colega e amigo Fábio Braga, pelas várias vezes que me ajudou nos processos laboratoriais, repassando seu conhecimento com paciência e atenção, e pelo auxílio durante os ensaios balísticos. Aos demais colegas do IME, dentre eles: Bruna, Renato, Fernanda, Cap. Lúcio, Noan, Artur, Foluke, Felipe Medeiros, Pedro Octavio, Rubens e Daniel, pela ajuda e pelos bons momentos de convívio.

Ao Flávio, pelo auxílio na operação do MEV, que possibilitou obter micrografias de qualidade.

Ao CAEx, por disponibilizar local, equipamentos e profissionais qualificados para a realização dos ensaios balísticos. Ao Cap. Édio, Cap. D'Mengeon, Sgt. Paiva, Sgt. Furiati, Sgt. Marcelo Alves, Sgt. Machado e todos os demais que ajudaram no suporte técnico.

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

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	9
LISTA DE TABELAS.....	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	12
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1 Justificativa do Trabalho.....	19
1.2 Objetivo do Estudo.....	20
1.2.1 Objetivo Geral.....	20
1.2.2 Objetivos Específicos.....	20
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
2.1 Blindagem Balística.....	21
2.2 Fibras Naturais Lignocelulósicas (FNLs).....	23
2.2.1 Fibras de Sisal.....	26
2.3 Polímeros.....	29
2.3.1 Poliéster.....	30
2.4 Compósitos Poliméricos Reforçados com FNLs.....	31
2.4.1 Reforço na Forma de Tecido.....	34
2.5 Cerâmica.....	36
2.5.1 Alumina.....	36
2.6 Comportamento Dinâmico dos Materiais.....	37
2.6.1 Propagação de Ondas de Choque.....	40
2.6.2 Interação e Reflexão de Ondas de Choque.....	43
2.7 Distribuição de Weibull.....	47

<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>48</b>
3.1	Aspectos Gerais.....	48
3.2	Fabricação da Cerâmica.....	49
3.3	Fabricação do Compósito Poliéster-Sisal.....	53
3.4	Camada Metálica.....	55
3.5	Colagem das Camadas.....	56
3.6	Ensaio Balístico.....	56
3.7	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	59
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>61</b>
4.1	Caracterização da Camada de Cerâmica.....	61
4.2	Caracterização da Camada de Compósito.....	63
4.3	Desempenho Balístico dos Sistemas de Blindagem Multicamada.....	63
4.4	Desempenho Balístico Individual da Camada de Compósito.....	74
4.5	Interação das Ondas de Choque nas Blindagens Multicamada.....	80
4.6	Custos Relativos aos Sistemas de Blindagem Multicamada.....	84
4.7	Análise das Micrografias Obtidas em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	86
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>92</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>94</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>95</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 2.1	Estrutura da parede celular da FNL (KALIA, KAITH e KAUR, 2011).....	26
FIG. 2.2	Fibras de sisal.....	27
FIG. 2.3	Planta <i>Agave sisalana</i> (LI, MAI e YE, 2000).....	27
FIG. 2.4	Curvas TG/DTG da fibra de sisal (Martin <i>et al.</i> , 2009).....	28
FIG. 2.5	Diferentes formas de tecidos (JOHN e THOMAS, 2008).....	35
FIG. 2.6	Curva tensão versus deformação (MEYERS, 1994).....	39
FIG. 2.7	Modelo simplificado da propagação de uma onda de choque: (a) antes da perturbação; (b) tempo $t=t_1$ ; (c) tempo $t=t_2$ , tal que $t_2>t_1$ (MEYERS, 1994).....	41
FIG. 2.8	Sequência de eventos em um impacto planar: (a) antes do impacto; (b) no instante do impacto; (c) Após o impacto (MEYERS, 1994).....	43
FIG. 2.9	Mudança de meio de uma onda de choque, de um meio de menor impedância (A) para um meio de maior impedância (B): (a) curva pressão versus velocidade de partícula; (b) sequência de perfis de tensão (MEYERS, 1994).....	45
FIG. 2.10	Mudança de meio de uma onda de choque, de um meio de maior impedância (A) para um meio de menor impedância (B): (a) curva pressão versus velocidade de partícula; (b) sequência de perfis de tensão (MEYERS, 1994).....	46
FIG. 3.1	Esquema da amostra do sistema de blindagem multicamada.....	48
FIG. 3.2	Moinho de bolas MARCONI de modelo MA 500.....	50
FIG. 3.3	(a) Matriz hexagonal; (b) Prensa hidráulica semi-automática NOWAK....	50
FIG. 3.4	Balança GEHAKA BK 300.....	51
FIG. 3.5	Forno INTI, modelo FE 1700.....	51
FIG. 3.6	Amostra de cerâmica.....	52
FIG. 3.7	(a) Fibras de sisal; (b) Tecido de sisal.....	53
FIG. 3.8	(a) Matriz metálica; (b) Prensa hidráulica SKAY.....	54
FIG. 3.9	Amostras de compósitos reforçados com: (a) Tecido de sisal; (b) Fibras de sisal.....	54
FIG. 3.10	Chapa de alumínio 5052 H34.....	55



FIG. 3.11	Adesivo de cura rápida ULTRAFLEX.....	56
FIG. 3.12	(a) Provette calibre 7,62 mm; (b) Dispositivo de fixação da amostra no bloco de massa.....	57
FIG. 3.13	Munição calibre 7,62 mm M1.....	57
FIG. 3.14	Esquema de funcionamento do ensaio balístico (DA SILVA, 2014).....	58
FIG. 3.15	Radar Doppler, Weibel, modelo SL-520P.....	59
FIG. 3.16	(a) Microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta FEG 250; (b) Equipamento de deposição de filme de alto vácuo, LEICA EM ACE600.....	60
FIG. 4.1	Amostras do sistema de blindagem multicamada com compósito de poliéster reforçado com 30% de sisal, no momento anterior ao impacto balístico: (a) Sisal na forma de tecido; (b) Sisal na forma de fibras.....	64
FIG. 4.2	Amostras do sistema de blindagem multicamada com compósito de poliéster reforçado com 20% de sisal, no momento anterior ao impacto balístico: (a) Sisal na forma de tecido; (b) Sisal na forma de fibras.....	64
FIG. 4.3	Amostras do sistema de blindagem multicamada com compósito de poliéster reforçado com 10% de sisal, no momento anterior ao impacto balístico: (a) Sisal na forma de tecido; (b) Sisal na forma de fibras.....	64
FIG. 4.4	Amostras do sistema de blindagem multicamada com compósito de poliéster reforçado com 30% de sisal, logo após o impacto balístico: (a) Sisal na forma de tecido; (b) Sisal na forma de fibras.....	67
FIG. 4.5	Amostras do sistema de blindagem multicamada com compósito de poliéster reforçado com 20% de sisal, logo após o impacto balístico: (a) Sisal na forma de tecido; (b) Sisal na forma de fibras.....	67
FIG. 4.6	Amostras do sistema de blindagem multicamada com compósito de poliéster reforçado com 10% de sisal, logo após o impacto balístico: (a) Sisal na forma de tecido; (b) Sisal na forma de fibras.....	67
FIG. 4.7	Amostra de poliéster reforçada com 30% de fibras de sisal, após sofrer impacto balístico. As setas indicam o mecanismo de delaminação.....	69
FIG. 4.8	Gráfico da distribuição de Weibull das indentações causadas na plastilina para a blindagem com compósito de poliéster reforçado com 30% de tecido de sisal.....	71
FIG. 4.9	Gráfico da distribuição de Weibull das indentações causadas na plastilina para a blindagem com compósito de poliéster reforçado com 30% de fibras de sisal.....	72

FIG. 4.10	Gráfico da distribuição de Weibull das indentações causadas na plastilina para a blindagem com compósito de poliéster reforçado com 20% de tecido de sisal.....	72
FIG. 4.11	Gráfico da distribuição de Weibull das indentações causadas na plastilina para a blindagem com compósito de poliéster reforçado com 20% de fibras de sisal.....	73
FIG. 4.12	Gráfico da distribuição de Weibull das velocidades limites para a blindagem com compósito de poliéster reforçado com 30% de tecido de sisal.....	77
FIG. 4.13	Gráfico da distribuição de Weibull das velocidades limites para a blindagem com compósito de poliéster reforçado com 30% de fibras de sisal.....	77
FIG. 4.14	Gráfico da distribuição de Weibull das velocidades limites para a blindagem com compósito de poliéster reforçado com 20% de tecido de sisal.....	78
FIG. 4.15	Gráfico da distribuição de Weibull das velocidades limites para a blindagem com compósito de poliéster reforçado com 20% de fibras de sisal.....	78
FIG. 4.16	Pontos experimentais do ensaio de velocidade residual obtidos a partir do espectro de radar.....	80
FIG. 4.17	Micrografia eletrônica da superfície de fratura de um fragmento cerâmico (10000x).....	86
FIG. 4.18	Micrografia eletrônica da delaminação entre fibra de sisal e matriz de poliéster (1000x).....	87
FIG. 4.19	Micrografia eletrônica da delaminação das fibras de sisal em fibrilas mais finas (1000x).....	88
FIG. 4.20	Micrografia eletrônica da retenção de fragmentos pela fibrila de sisal (5000x).....	88
FIG. 4.21	Micrografia eletrônica da retenção de fragmentos pelo compósito de poliéster-sisal.....	89
FIG. 4.22	Espectro de EDS de um dos fragmentos retidos pelo compósito poliéster-sisal.....	90
FIG. 4.23	Micrografia eletrônica da fratura frágil da matriz de poliéster (2500x)....	90
FIG. 4.24	Micrografia eletrônica da fratura frágil da matriz de poliéster (5000x)....	91

## LISTA DE TABELAS

TAB. 2.1	Níveis de proteção do sistema de blindagem (ABNT NBR 15000, 2005).....	22
TAB. 2.2	Propriedades de algumas FNLs (MONTEIRO <i>et al.</i> , 2011).....	24
TAB. 2.3	Composição química de algumas FNLs (FARUK <i>et al.</i> , 2012).....	25
TAB. 2.4	Propriedades da fibra de sisal (MONTEIRO <i>et al.</i> , 2011).....	28
TAB. 3.1	Composição de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> obtida em análise química (TRINDADE, 2012)...	49
TAB. 3.2	Composição de Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> obtida em análise química (TRINDADE, 2012)...	49
TAB. 3.3	Propriedades do alumínio 5052 H34 (BRAGA, 2015).....	55
TAB. 3.4	Composição química do alumínio utilizado (BRAGA, 2015).....	56
TAB. 4.1	Espessura, massa específica e densificação das amostras cerâmicas..	61
TAB. 4.2	Espessura e massa específica dos compósitos de poliéster-sisal.....	63
TAB. 4.3	Tipo de camada intermediária, profundidade de deformação, velocidade de impacto, energia de impacto e espessura da camada intermediária.	65
TAB. 4.4	Valores médios obtidos na caracterização das camadas intermediárias das blindagens multicamada e nos ensaios balísticos.....	68
TAB. 4.5	Parâmetros de Weibull dos resultados balísticos das blindagens multicamada com compósitos poliéster-sisal.....	73

TAB. 4.6	Velocidades médias inicial e residual, energia absorvida e velocidade limite para cada componente do sistema de blindagem multicamada.....	75
TAB. 4.7	Parâmetros de Weibull dos resultados dos ensaios de velocidade residual dos compósitos de poliéster-sisal.....	79
TAB. 4.8	Parâmetros utilizados nos cálculos do casamento de impedâncias.....	81
TAB. 4.9	Valores máximos e mínimos de massa específica, módulo de elasticidade e velocidade da onda elástica dos materiais da camada intermediária do sistema de blindagem.....	82
TAB. 4.10	Resultados obtidos através do casamento de impedâncias.....	83
TAB. 4.11	Relação de custo dos componentes utilizados na blindagem.....	85
TAB. 4.12	Peso e custo total das blindagens multicamada.....	85

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

### ABREVIATURAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	-	American Society for Testing of Materials
ASM	-	Aerospace Specification Metals
CBMM	-	Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração
CONAB	-	Companhia Nacional de Abastecimento
DTG	-	Termogravimetria Derivada
MEV	-	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	-	Norma Brasileira
NIJ	-	National Institute of Justice
FNL	-	Fibra Natural Lignocelulósica
PEG	-	Polietileno Glicol
SBM	-	Sistema de Blindagem Multicamada
TG	-	Termogravimetria

### SÍMBOLOS

$S$	-	Constante da equação de estado
$\rho$	-	Massa específica
$\rho_{teórico}$	-	Massa específica teórica
$\rho_{sinterizado}$	-	Massa específica da amostra sinterizada
$\rho_m$	-	Massa específica da matriz
$\rho_f$	-	Massa específica da fibra
$\rho_{CP}$	-	Massa específica do compósito
$\rho_{min}$	-	Massa específica mínima

$\rho_{max}$	-	Massa específica máxima
$E_{ABS}$	-	Energia absorvida
$\% E_{ABS}$	-	Porcentagem de energia absorvida
$V$	-	Volume específico
$d\sigma/d\epsilon$	-	Inclinação da curva tensão <i>versus</i> deformação
$\gamma$	-	Índice adiabático
$E$	-	Módulo de elasticidade
$E_{min}$	-	Módulo de elasticidade mínimo
$E_{max}$	-	Módulo de elasticidade máximo
$E_m$	-	Módulo de elasticidade da matriz
$E_f$	-	Módulo de elasticidade da fibra
$E_{CP}$	-	Módulo de elasticidade do compósito
$V_m$	-	Fração volumétrica da matriz
$V_f$	-	Fração volumétrica da fibra
$C_0$	-	Velocidade da onda elástica
$V_p$	-	Velocidade da onda plástica
$P$	-	Pressão
$U_s$	-	Velocidade da onda de choque
$U_p$	-	Velocidade de partícula
$\beta$	-	Módulo de Weibull
$R^2$	-	Ajuste da curva de Weibull
$\theta$	-	Unidade característica de Weibull
$\sigma$	-	Tensão
$\sigma_T$	-	Tensão de ruptura
$\sigma_e$	-	Tensão de escoamento
$\epsilon$	-	Deformação

$\Delta L/L_0$ (%)	-	Ductilidade em termos de alongamento percentual
$V_{50}$	-	Velocidade limite - 50% de probabilidade de perfuração
$V_L$	-	Velocidade limite
$V_0$	-	Velocidade inicial
$V_R$	-	Velocidade residual
$\bar{V}_0$	-	Média das velocidades iniciais
$\bar{V}_R$	-	Média das velocidades residuais
$m$	-	Massa
$t$	-	Tempo
$Z$	-	Impedância de Choque
$e$	-	Espessura

## RESUMO

No atual cenário social, em que conflitos armados são cada vez mais recorrentes, a segurança urbana fica comprometida. Pesquisadores tentam reduzir esse problema através do desenvolvimento de sistemas de blindagem multicamada (SBMs), que associam diferentes materiais com objetivo de promover bom desempenho e leveza. Normalmente um SBM é composto por 3 camadas: uma cerâmica frontal, um compósito e um metal dúctil. A função da cerâmica é dissipar energia cinética de impacto através da fragmentação. A segunda camada, por sua vez, tem como principal objetivo conter os fragmentos resultantes do impacto do projétil com a primeira. Por fim, o metal absorve a energia residual através da deformação plástica. Este trabalho avalia SBMs que contém como camada intermediária compósitos de poliéster reforçado com 10%, 20% e 30% vol. de tecido e fibras de sisal, e compara com SBMs que utilizam outros materiais, como o laminado de aramida, por exemplo, que atualmente é um dos materiais mais utilizados na fabricação de coletes de proteção balística. Os ensaios balísticos foram realizados com munição de calibre 7,62 mm e obedeceram critérios da norma NIJ 0101.06. Os SBMs avaliados se mostraram igualmente eficientes em termos de eficiência balística. Através de análises das micrografias, obtidas em microscópio eletrônico de varredura, foi possível identificar mecanismos que caracterizam a fratura dos SBMs e contribuem para a dissipação de energia após o impacto balístico, como por exemplo: contenção de fragmentos pela camada intermediária, delaminação do compósito e das camadas das fibras, e fratura frágil da matriz polimérica. Adicionalmente, concluiu-se que SBMs que contém como camada intermediária compósitos de poliéster reforçado com sisal são consideravelmente mais baratos do que aqueles que contém laminado de aramida, sendo que a redução de custo pode chegar 38,58%.



## ABSTRACT

In the current social scenario, in which armed conflicts are increasingly recurrent, urban safety is compromised. Researchers try to reduce this problem by developing Multilayered Armor Systems (MAS), which combine different materials in order to promote good performance and lightness. Typically one MAS is composed of three layers: a front ceramic, composite and ductile metal. The function of ceramics is to dissipate kinetic energy of impact by fragmentation. The second layer, in turn, aims to contain the fragments resulting from the bullet impact with the first layer. Finally, the metal absorbs the residual energy by plastic deformation. This study evaluates MAS containing as intermediate layer polyester composite reinforced with 10%, 20% and 30% vol. fabric and sisal fibers, and compares with MAS that use other materials, such as aramid laminate, for example, which is currently one of the most widely used materials in the manufacture of ballistic protective vests. Ballistic tests were conducted with 7.62 mm caliber ammunition and obeyed criteria of the standard NIJ 0101.06. The evaluated MAS were equally efficient in terms of ballistic efficiency. Through analysis of micrographs, obtained by scanning electron microscope, it was possible to identify mechanisms that characterize the fracture of MAS and contribute to the dissipation of energy after the ballistic impact, such as: containment of the fragments by intermediate layer, delamination of the composite and the fiber layers, and brittle fracture of the polymeric matrix. In addition, it was concluded that MAS which contains as intermediate layer composites reinforced by polyester-sisal are considerably cheaper than those containing aramid laminate, and the cost reduction can reach 38.58%.

## 1 INTRODUÇÃO

A tecnologia da blindagem é fundamental, seja na guerra moderna ou nas guerrilhas urbanas que se alastram pelas diversas cidades do mundo todo (JUNIOR *et al.*, 2006). Atualmente armas letais, como fuzis de calibre 7,62 mm, por exemplo, são de fácil acesso para traficantes e isso constitui sério risco a segurança urbana.

O desenvolvimento nos processos tecnológicos vem acarretando armamentos cada vez mais potentes e com alto poder destrutivo, no entanto, contribui também com correspondentes sistemas de proteção balística. É necessário aumentar a eficiência das blindagens, visto que as ameaças com armamentos modernos são crescentes (WANG *et al.*, 2014). A busca por estruturas de proteção é interminável, uma vez que está associada com ameaças que colocam em risco vidas humanas (SERJOUEI *et al.*, 2015).

A composição das blindagens até a Segunda Guerra Mundial consistia basicamente em metais, porém, as blindagens começaram a ficar grandes e pesadas a medida que novos projéteis iam sendo desenvolvidos. Como alternativa, materiais leves e com maior desempenho começaram a ser utilizados (BÜRGER *et al.*, 2012).

Atualmente já se sabe que um único material não consegue conter as tensões mecânicas que resultam do impacto de um projétil calibre 7,62 mm ou superior, exceto em casos de grande espessura, que se mostram inadequados. Materiais cerâmicos, embora possuam alta resistência a compressão, normalmente apresentam baixa resistência a tração, e durante um impacto balístico sofrem esforços de tração na superfície oposta ao impacto. Blindagens metálicas, por sua vez, promovem excesso de peso, elas são muito utilizadas em veículos, mas não são recomendadas para proteções pessoais (DA SILVA *et al.*, 2014). Isso explica a utilização de mais de uma camada de proteção nos chamados sistemas de blindagem multicamada (SBMs), associando diferentes materiais, como cerâmicas, polímeros, compósitos reforçados com fibras e metais. Segundo Da Silva e coautores (2014), elas podem ser aplicadas em coletes, veículos, aeronaves e até mesmo em satélites, por exemplo.

Para a primeira camada geralmente se escolhe um material cerâmico, que ao receber o impacto inicial vai erodir e romper a ponta do projétil (DA SILVA *et al.*, 2014; SHOKRIEH e JAVADPOUR, 2008), dissipando energia cinética de impacto através da fragmentação (MEDVEDOVSKI, 2010), que envolve nucleação, crescimento e coalescência de microfissuras (LOURO e MEYERS, 1989).

A segunda camada pode fazer uso de materiais compósitos ou poliméricos, como poliéster, poliamida, aramida, polietileno e polipropileno (LOPES, GONÇALVES e DE MELO, 2007). Ela possui a função de absorver energia proveniente dos fragmentos do projétil e da cerâmica (MONTEIRO *et al.*, 2015). Dentre os materiais mais utilizados convencionalmente destaca-se o laminado fabricado a partir das fibras de aramida (comercialmente conhecido como Kevlar®, Twaron® ou Gold Shield®, por exemplo). Recentemente verificou-se que fibras naturais em compósitos poliméricos também são efetivas (MONTEIRO *et al.*, 2015). A influência dessa segunda camada é melhor explicada em estudo de Monteiro e coautores (2014), que compararam o desempenho do laminado de aramida em ensaio balístico com munição calibre 7,62 mm, quando associado a uma primeira camada de cerâmica, com o mesmo laminado individual. Na presença da cerâmica o laminado dissipa cerca de 36% da energia de impacto, porém, individualmente dissipa menos de 2%. Isso pode ser explicado devido a absorção de energia cinética e contenção de fragmentos após o impacto balístico. A captura de fragmentos por incrustação mecânica, devido a forças de Van der Waals e atração eletrostática, funciona melhor em uma blindagem multicamada contendo uma primeira camada cerâmica. Segundo Da Luz e coautores (2015), o fato da segunda camada ser composta por um material de elevada resistência a tração, como a aramida, não é tão importante quanto sua capacidade de coletar fragmentos.

A terceira camada, quando existir, deve ser composta por um metal dúctil e leve. Nesse caso a deformação plástica atua na absorção da energia residual do projétil, reduzindo o trauma causado no usuário (MEDVEDOVSKI, 2010).

As fibras naturais lignocelulósicas (FNLs), que desde a última década vem sendo avaliadas em artigos científicos, tem se tornado interessantes na fabricação de compósitos para fins de blindagem balística. Segundo Nabi Sahed e Jog (1999), seu uso vem ganhando destaque, visto que elas são baratas, biodegradáveis, possuem baixa massa específica, não são abrasivas e suas propriedades são

comparáveis com as propriedades dos outros tipos de fibras utilizadas como reforço. Carvalho e Cavalcanti (2006) ressaltam a importância dessas fibras nas questões ambientais, uma vez que seu descarte não gera problemas e elas não são tóxicas, além do fato de serem neutras com relação ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), conforme menciona Crocker (2008).

A substituição de materiais sintéticos (como aramida) por naturais reduz o gasto energético, emissões de gases poluentes, custos associados aos processos de fabricação e gera reaproveitamento de material. A aplicação das FNLs em sistemas de blindagem balística, além de promover todas as vantagens citadas anteriormente pode suprir necessidades do militarismo, possibilitando a produção de blindagens leves e eficientes, contribuindo com a segurança nacional e os avanços da pesquisa científica.

Este trabalho avalia SBMs compostos por: cerâmica frontal de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) com adição de nióbia (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), compósitos de poliéster reforçado com tecido ou fibras unidirecionais de sisal, e camada metálica de alumínio.

## 1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Esse estudo está inserido em um linha de pesquisa que já vem sendo desenvolvida no Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais do Instituto Militar de Engenharia (IME), visando otimizar SBMs através da utilização de compósitos poliméricos reforçados com FNLs como alternativa aos sistemas convencionais, que atualmente utilizam somente materiais sintéticos, como aramida e polietileno de ultra alto peso molecular, por exemplo.

O tema do trabalho está relacionado com interesses do exército brasileiro e dá continuidade a estudos anteriores (BRAGA, 2015; DA CRUZ, 2015; DA LUZ, 2014; DA SILVA, 2014; DE ARAÚJO, 2015; MILANEZI, 2015), servindo como base e diretriz para novas pesquisas visando descobertas e conclusões a respeito do assunto.

## 1.2 OBJETIVO DO ESTUDO

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência de SBMs que possuem como camada intermediária compósitos poliméricos de poliéster reforçado com sisal, disposto na forma de tecido e fibras, com três composições distintas: 10%, 20% e 30% em volume.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Verificar a eficiência balística dos SBMs testados neste trabalho. A avaliação é feita com base no critério descrito pela norma internacional NIJ 0101.06 (2008);
2. Comparar o desempenho balístico dos SBMs testados neste trabalho e verificar qual foi a composição e forma de sisal que resultou na maior eficiência balística;
3. Comparar o desempenho balístico individual dos compósitos de poliéster-sisal com compósitos de poliéster-curauá (BRAGA, 2015), epóxi-sisal (DE ARAÚJO, 2015) e laminado de aramida (BRAGA, 2015), através da estimativa da velocidade limite;
4. Relacionar o desempenho balístico dos SBMs que contém compósitos de poliéster-sisal e laminado de aramida com a impedância de choque desses materiais;
5. Comparar custos dos SBMs testados neste trabalho com SBM equivalente, que contém laminado de aramida como camada intermediária;
6. Verificar os mecanismos de fratura dos materiais que compõem os SBMs testados neste trabalho através de micrografias.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BLINDAGEM BALÍSTICA

Antigamente a balística era dividida em balística forense e balística especial ou militar, que abordava somente armas de guerra. Entretanto, atualmente, em virtude da violência urbana, não existe mais essa separação (DE MIRANDA, 2014).

Os estudos sobre balística compreendem: balística interna, balística externa, balística de efeitos e balística final. A balística interna estuda os processos que ocorrem no interior da arma até o momento do disparo. A balística externa analisa a trajetória do projétil pelo meio externo até atingir o alvo. Os fenômenos que ocorrem quando o projétil atinge o alvo são estudados pela balística de efeitos. Por fim, a balística final se ocupa do estudo do projétil após o mesmo perfurar o alvo, caso isso aconteça (DE MIRANDA, 2014).

Segundo o Regulamento para a Fiscalização de Produtos Controlados (norma identificada como R105), anexo ao decreto nº 3.665 da Presidência da República, blindagem balística é definida como: "artefato projetado para servir de anteparo a um corpo de modo a deter o movimento ou modificar a trajetória de um projétil contra ele disparado, protegendo-o, impedindo o projétil de produzir seu efeito desejado" (BRASIL, 2000).

O desempenho de um sistema de blindagem balística é baseado em especificações da norma americana 0101.06 do Instituto Nacional de Justiça dos Estados Unidos (NIJ - *National institute of Justice*) publicada em 2008. No Brasil quem dita as diretrizes para os ensaios balísticos é a ABNT NBR 15000. Segundo ela, um sistema está apto a oferecer resistência à penetração, quando atingido por um projétil, se respeitar os níveis e condições apresentados na TAB 2.1. O presente trabalho objetiva avaliar a eficiência de SBMs classificados como nível III (calibre 7,62 x 51 mm).

**TAB. 2.1** Níveis de proteção do sistema de blindagem.

Nível de proteção	Calibre/munição	Massa (g)	Velocidade de disparo (m/s)	Energia cinética (J)
I	.22 LRHV Chumbo	2,6 ± 0,1	320 ± 10	133
	.38 Special RN Chumbo	10,2 ± 0,1	254 ± 15	329
IIA	9 FMJ	8,0 ± 0,1	332 ± 12	441
	357 Magnum JSP	10,2 ± 0,1	381 ± 12	740
II	9 FMJ	8,0 ± 0,1	358 ± 15	513
	357 Magnum JSP	10,2 ± 0,1	425 ± 15	921
IIIA	9mm FMJ	8,0 ± 0,1	426 ± 15	726
	.44 Magnum SWC GC	15,6 ± 0,1	426 ± 15	1416
III	7.62 x 51 FMJ	9,7 ± 0,1	838 ± 15	3406
IV	.30 – 06 AP	10,8 ± 0,1	868 ± 15	4068

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15000, 2005.

A NIJ-0101.06 (2008) determina que durante o ensaio balístico, a amostra a ser ensaiada deve ficar na frente de um bloco de massa a base de óleo, que simula a consistência do corpo humano. Após o impacto do projétil na amostra, deve ser medida a profundidade da deformação (indentação) causada no bloco de massa. O valor máximo aceitável é 44 mm de profundidade.

Há outras maneiras de se avaliar sistemas de blindagem balística, que se utilizam da energia cinética do projétil no ponto de impacto. Como a velocidade é o fator chave na determinação da energia cinética, ela é a variável primária e independente obtida nos ensaios balísticos (WANG *et al.*, 2014). Um dos parâmetros importantes é a velocidade limite  $V_L$ , definida por Morye e coautores (2000) como a máxima velocidade para a qual o projétil é retido no sistema de blindagem. É possível estimar  $V_L$  através do  $V_{50}$ , que é a velocidade em que a probabilidade da blindagem ser perfurada pelo projétil é 50%.

Existem situações em que o cálculo do  $V_{50}$  se torna impraticável, como no caso de disparos com calibre 7,62 mm, pois mesmo ajustando a quantidade de propelente, a velocidade de disparo será sempre alta o suficiente para perfurar a blindagem, ou seja, nesse caso o projétil nunca ficará retido.

Morye e coautores (2000) utilizaram um modelo para estimar  $V_L$  com base na energia cinética absorvida pela blindagem ( $E_{ABS}$ ), que pode ser obtida pela EQ. 2.1.

$$E_{ABS} = \frac{1}{2}m(V_0^2 - V_R^2) \quad \text{EQ. 2.1}$$

Onde  $m$  é a massa do projétil e  $V_0$  e  $V_R$  são as velocidades inicial (de impacto) e residual (após a perfuração) do mesmo, respectivamente. Para estimar  $V_L$  considera-se que  $V_R = 0$ , uma vez que nesse caso o projétil não possui velocidade residual, pois fica retido na blindagem. Portanto,  $V_L$  pode ser obtido a partir da EQ. 2.1, que é o caso em que a blindagem absorve toda a energia cinética.

$$V_L = \sqrt{\frac{2E_{ABS}}{m}} \quad \text{EQ. 2.2}$$

Os SBMs avaliados neste trabalho utilizam como segunda camada compósitos com matriz de poliéster reforçado com sisal. Assim, a próxima seção apresenta uma revisão sobre as FNLs.

## 2.2 FIBRAS NATURAIS LIGNOCELULÓSICAS (FNLs)

É notável o interesse que as fibras naturais tem despertado na indústria, mesmo após décadas de desenvolvimento tecnológico relacionado com as fibras artificiais, como carbono, aramida e vidro (MOHANTY, MISRA e DRZAL, 2002). Ao contrário das fibras artificiais, as fibras naturais possuem uma variedade significativa nas propriedades mecânicas (SUMMERSCALES *et al.*, 2010a), uma vez que elas podem ser obtidas a partir de diferentes variedades da mesma espécie de planta, com diferentes estágios de crescimento e sob diferentes condições meteorológicas e de solo (FRANCK, 2005).

As fibras naturais são classificadas com base em sua origem, podendo ser animal, mineral ou vegetal (comumente conhecidas como FNLs) (BLEDZKI e GASSAN, 1999; EICHHORN *et al.*, 2001; JOHN e THOMAS, 2008). Todas as fibras vegetais possuem celulose, as de origem animal, por sua vez, são compostas por proteínas (JOHN e THOMAS, 2008).



As FNLs são atrativas para os fabricantes de materiais (FARUK *et al.*, 2012), elas são muito mais baratas que as fibras sintéticas, em várias situações é possível realizar essa substituição (JOSEPH *et al.*, 1996). A TAB. 2.2 relaciona propriedades de algumas FNLs e fibras sintéticas, para fins comparativos.

**TAB. 2.2** Propriedades de algumas FNLs.

<b>FNL</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência à tração <math>\sigma</math> (MPa)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>
Bambu	1,03 - 1,21	106 - 204	-
Banana	0,67 - 1,50	700 - 800	27 - 32
Curauá	0,57 - 0,92	117 - 3000	27 - 80
Cânhamo	1,07	389 - 690	35
Juta	1,30 - 1,45	393 - 800	13 - 27
Linho	1,30 - 1,50	344 - 1035	26 - 28
Rami	1,5	400 - 1620	61 - 128
Sisal	1,26 - 1,50	287 - 913	9 - 28
Carbono	1,78 - 1,81	2500 - 6350	70 - 73
Aramida	1,44	3000 - 4100	63 - 131

Fonte: Adaptado de MONTEIRO, *et al.*, 2011.

As FNLs exibem uma superfície complexa com detalhes micro-morfológicos que variam dependendo do tipo da fibra (MONTEIRO *et al.*, 2009). Sua composição é basicamente: celulose, lignina, hemicelulose, pectinas e ceras. Ela pode ser considerada um compósito, onde fibrilas de celulose ficam aderidas em uma matriz composta por lignina e hemicelulose (JOHN e THOMAS, 2008). A TAB. 2.3 relaciona algumas FNLs com base em suas composições químicas.

**TAB. 2.3** Composição química de algumas FNLs.

FNL	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Ceras (%)
Bambu	26 - 43	30	21 - 31	-
Juta	61 - 71	14 - 20	12 - 13	0,5
Kenaf	72	20,3	9	-
Linho	71	18,6 - 20,6	2,2	1,5
Sisal	65	12	9,9	
Cânhamo	68	15	10	0,8
Rami	68,6 - 76,2	13 - 16	0,6 - 0,7	0,3
Banana	56 - 63	20 - 25	7 - 9	3

Fonte: Adaptado de FARUK, *et al.*, 2012.

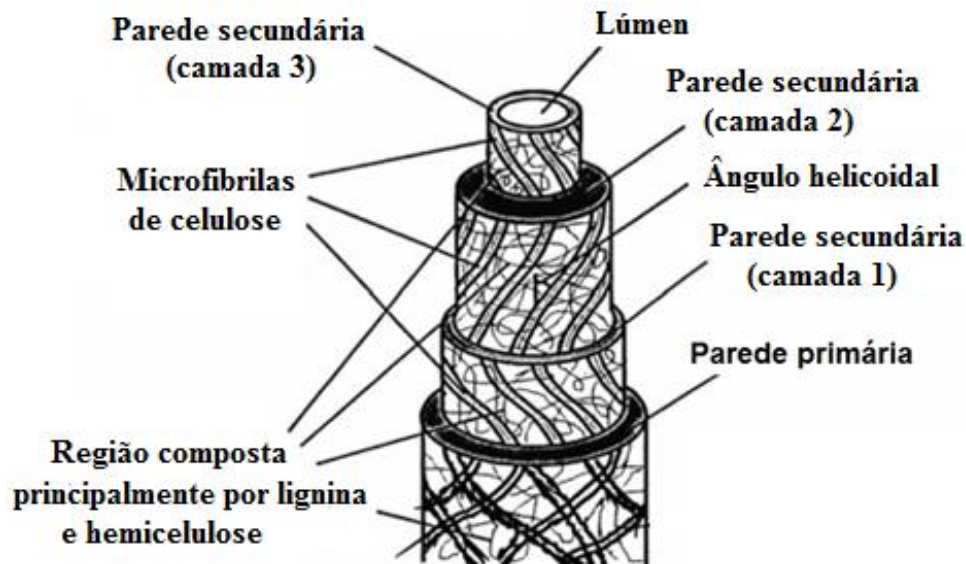
A celulose é composta de carbono, hidrogênio e oxigênio, sua quantidade pode variar dependendo do tipo e idade da fibra. Ela é um polímero glucano hidrófilo que possui grupos hidroxilo alcoólicos, que se ligam entre si dentro da própria molécula de celulose e entre moléculas diferentes, através de ligações de hidrogênio. Os grupos hidroxilo alcoólicos no interior de moléculas também se ligam com grupos de mesma natureza presentes no ar, e isso explica a natureza hidrofílica das FNLs, ou seja, elas tem afinidade por moléculas de água. A estrutura química da celulose é a mesma, independentemente do tipo de FNL, mas o grau de polimerização varia, e ele está diretamente relacionado com as propriedades mecânicas das fibras (MOHANTY, MISRA e HINRICHSEN, 2000).

A lignina é um composto fenólico, geralmente resistente a degradação de microorganismos. Ela possui alto teor de carbono e baixo teor de hidrogênio, e isso sugere que ela é altamente insaturada ou de caráter aromático. Esse composto possui função estrutural em plantas, uma vez que fornece sustentação a parede celular. A lignina preenche os espaços entre a celulose e hemicelulose, que são estabelecidas primeiramente no processo de síntese, e dessa maneira age como um ligante (MOHANTY, MISRA e HINRICHSEN, 2000).

As moléculas de hemicelulose agem como uma matriz de cimentação, sustentando as microfibrilas de celulose e formando uma rede, que possui uma enorme influência estrutural na FNL (KALIA, KAITH e KAUR, 2011).

A estrutura da parede celular de uma FNL não é homogênea, ela é dividida em diferentes partes, como ilustrado na FIG. 2.1. A primeira parede é uma membrana fina que é depositada sobre a segunda durante o crescimento celular. A segunda

parede, por sua vez, e composta por três camadas, e é a camada do meio quem determina as propriedades mecânicas da fibra. Essa camada é composta por microfibrilas celulares enroladas em forma de hélice, que são formadas por longas cadeias moleculares de celulose. O ângulo entre o eixo da fibra e as microfibrilas é chamado de ângulo microfibrilar, e seu valor varia dependendo do tipo da FNL (JOHN e THOMAS, 2008).



**FIG. 2.1** Estrutura da parede celular de uma FNL.

Fonte: Adaptado de KALIA, KAITH e KAUR, 2011.

Como a fibra diretamente investigada neste trabalho é o sisal, a seguir é feita uma revisão sobre a mesma.

### 2.2.1 FIBRAS DE SISAL

O sisal é muito cultivado em países tropicais da África, América e Extremo Oriente, sendo o Brasil e a Tanzânia os dois principais produtores (MOHANTY, MISRA e DRZAL, 2005). A fibra de sisal provem da folha da planta *Agave sisalana* e é a principal fibra dura produzida no mundo, correspondendo a aproximadamente 70% da produção comercial de todas as fibras desse tipo (MARTIN *et al.*, 2009). As

fibras de sisal e a planta *Agave sisalana* estão ilustradas nas FIG. 2.2 e FIG. 2.3 respectivamente.



**FIG. 2.2** Fibras de sisal.



**FIG. 2.3** Planta *Agave sisalana*.

Fonte: LI, MAI e YE, 2000.

Segundo Mukherjee e Satyanarayana (1984), cada folha da planta *Agave sisalana* é composta da seguinte maneira: 4% fibra, 0,75% cutícula, 8% outros tipos de matéria seca e 87,25% umidade. A extração da fibra pode ocorrer através de métodos manuais ou mecânicos. Após a extração, as fibras são lavadas com água para que se possa remover clorofila, sucos provenientes da folha e sólidos indesejáveis. Martin e coautores (2009) relatam que aquilo que não é aproveitado na forma de fibra (cerca de 95 a 97%) é utilizado como adubo orgânico, ração animal e pela indústria farmacêutica.

No cultivo da planta de sisal predomina o trabalho familiar de pequenos produtores. De certa forma, essa atividade valoriza a região semi-árida do nordeste brasileiro e é uma fonte de renda e emprego importante para um grande número de trabalhadores (MARTIN *et al.*, 2009).

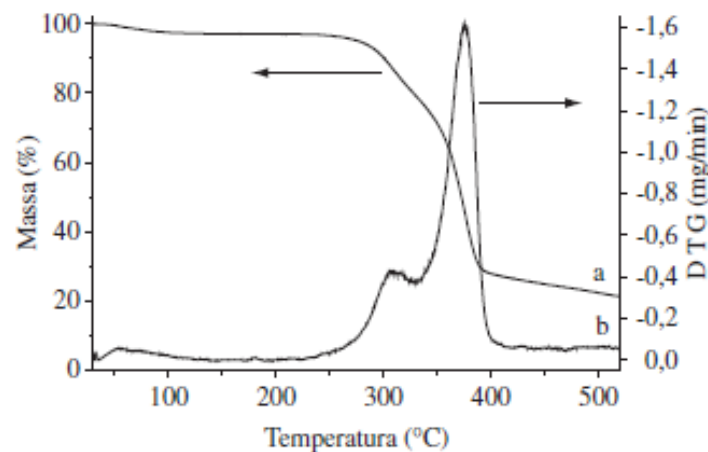
O sisal pode ser usado para reforçar algumas peças plásticas com diferentes aplicações na indústria automobilística. Seu uso também é comum na construção civil em formulações com argamassas e substituição de placas de madeira. Essa FNL se destaca entre as fibras foliares em qualidade e aplicação comercial (MATTOSO *et al.*, 1996). A TAB. 2.4 fornece algumas propriedades da fibra de sisal.

**TAB. 2.4** Propriedades da fibra de sisal.

Propriedade	Valor
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,26 - 1,50
Resistência a tração (MPa)	287 - 913
Módulo de Young (GPa)	9 - 28
$\sigma/\rho_{máximo}$ (MPa.cm <sup>3</sup> /g)	725

Fonte: Adaptado de MONTEIRO *et al.*, 2011.

Em estudo realizado por Martin e coautores (2009) concluiu-se que a fibra de sisal é adequada para o uso em compósitos poliméricos, além de outras aplicações. Ela mostrou-se estável termicamente até cerca de 250 °C, como está ilustrado na curva TG/DTG (FIG. 2.4).



**FIG. 2.4** Curvas TG/DTG da fibra de sisal.

Fonte: Martin *et al.*, 2009.

A fibra de sisal tem sido estudada visando sua aplicação em novas áreas, seu uso em materiais compósitos ganhou destaque e despertou o interesse de cientistas e engenheiros. De acordo com Li, Mai e Ye (2000), os principais estudos a cerca do sisal durante os últimos anos estão relacionados com: propriedades térmica, mecânica e dielétrica da fibra, estudos sobre a interface entre fibra e matriz em um material compósito, propriedades de compósitos reforçados com fibras de sisal e compósitos híbridos que contém uma parcela de fibras de sisal.

Uma vez que o presente trabalho utiliza compósitos com matriz polimérica de poliéster, será feita uma breve revisão sobre polímeros seguida de revisão específica sobre poliéster.

### 2.3 POLÍMEROS

Polímeros são materiais orgânicos, em sua grande maioria hidrocarbonetos, ou seja, compostos por hidrogênio e carbono. Suas moléculas possuem ligações internas do tipo covalente e por serem relativamente grandes são chamadas com frequência de macromoléculas. Uma macromolécula polimérica é formada a partir de várias unidades que se repetem, denominadas *mero*, do grego *mero*, que significa parte. Eles são sintetizados a partir de pequenas moléculas denominadas monômeros (CALLISTER e RETHWISCH, 2012).

Os polímeros podem ser classificados em duas classes: termoplásticos ou termofixos. Os termoplásticos são relativamente macios, ficam moles (eventualmente se liquefazem) quando aquecidos e duros quando resfriados, esse processo é reversível e pode ser repetido. Já os termofixos, são duros e não amolecem em função da temperatura (CALLISTER e RETHWISCH, 2012). Segundo Sanchez e coautores (2010), polímeros termofixos são muito utilizados como matrizes em compósitos, e isso se dá devido às várias vantagens que esse material proporciona, como por exemplo: baixo custo, estabilidade térmica e dimensional, resistência química em temperaturas elevadas e facilidade na moldagem de peças com grandes dimensões. Porém, os autores destacam que é importante associar polímeros com materiais de reforço, pois eles possuem baixa resistência a fratura.

A indústria e o processamento moderno de polímeros, que surgiram na segunda metade do século 20, são frutos da nova revolução científico-tecnológica, e estão, portanto, associados com alta tecnologia, assim como eletrônica, microeletrônica e biotecnologia, por exemplo. Os diversos métodos sofisticados de processamento de polímeros que existem hoje estão relacionados com análises de engenharia, processos de simulação e inovação, que possibilitaram melhorias e desenvolvimento (TADMOR e GOGOS, 2006).

Na maioria das vezes, uma vez concebido como um produto, o polímero deve se manter estável, ou seja, manter sua estrutura e morfologia sob diferentes temperaturas e condições durante a vida útil do produto (MARK, 2007).

### 2.3.1 POLIÉSTER

Poliéster é um polímero obtido a partir da ligação éster, os materiais desse tipo são muito diversificados e é a ligação éster quem define a característica comum entre eles. Isso muitas vezes compreende apenas uma pequena parte da molécula (BRYDSON, 1999).

As resinas de poliéster podem ter características diferentes dependendo da composição química, podendo variar de líquidos altamente viscosos até sólidos quebradiços (BRYDSON, 1999). Elas podem ser divididas em duas grandes classes: saturadas e insaturadas. No primeiro caso os poliésteres geralmente se encontram sob a forma de filme, fibras ou resinas termoplásticas, por exemplo. As resinas de poliéster insaturado, por sua vez, são mais utilizadas como matrizes termofixas em materiais compósitos, uma vez que possuem baixo custo, facilidade de processamento e promovem boas propriedades mecânicas, elétricas e químicas. Elas exigem adição de catalisadores para que o material entre em processo de cura, que envolve duas etapas: na primeira a resina líquida vai ganhando consistência até atingir um aspecto gelatinoso, ao passo que na segunda o material é completamente endurecido através de um processo exotérmico. O tempo de cura depende de fatores como: reatividade da resina, teor de catalisador e condições ambientais (DE MOURA, DE MORAIS e DE MAGALHÃES, 2011).

As resinas de poliéster insaturado dividem-se com base na resistência química que oferecem: as ortoftálicas são as que possuem menor resistência, portanto são indicadas para uso geral; As isoftálicas, mais resistentes que as ortoftálicas, são indicadas para ambientes levemente agressivos, úmidos ou sujeitos a condições ambientais desfavoráveis; As bisfenólicas, por sua vez, são usadas em meios particularmente agressivos, sobretudo com características ácidas, pois são as mais resistentes quimicamente (DE MOURA, DE MORAIS e DE MAGALHÃES, 2011).

Ratna (2009) propõe outra classificação para as resinas de poliéster, de acordo com sua composição e aplicação: resinas para uso geral e para uso especial. Resinas para uso geral são fabricadas com matérias primas de baixo custo. Elas devem ser oferecidas com um preço competitivo e proporcionar estruturas com propriedades físicas razoáveis em um tempo razoável. De um modo geral, para esse tipo de resina o custo de fabricação é o fator mais importante e a performance do material fica em segundo plano. Essas resinas exigem uma menor quantidade de diluente reativo para alcançar a viscosidade desejada. As resinas especiais são fabricadas com matérias primas selecionadas cuidadosamente para melhorar as propriedades e desempenho. Elas possuem alta resistência mecânica, térmica, a substâncias químicas e à corrosão. Esse tipo de resina pode ser indicado para substituir materiais metálicos em aplicações industriais, como tubos, tanques e painéis, por exemplo, caso os materiais estejam sob ambiente corrosivo (RATNA, 2009).

A associação da fibra natural com a matriz polimérica caracteriza o material compósito, cujos aspectos gerais são revisados a seguir.

## 2.4 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FNLs

De um modo geral, pode-se definir um compósito como um material que possui mais de uma fase e consegue expressar de forma significativa as propriedades das fases presentes. Partindo desse princípio, as propriedades das fases são associadas de modo a fornecer a combinação mais vantajosa para o fim ao qual o compósito se destina (CALLISTER e RETHWISCH, 2012). A utilização de



compósitos é prática antiga. No Egito, por exemplo, a argila era reforçada com palha e aplicada em paredes (BLEDZKI, SPERBER e FARUK, 2002). Esse tipo de material sofreu desenvolvimento significativo nos últimos anos e novos materiais e métodos de processamento estão sendo testados e utilizados.

O desenvolvimento de materiais compósitos é um fator motivador para os cientistas, além de ser oportunidade de fonte de renda para várias pessoas em todo o mundo (SATYANARAYANA, ARIZAGA e WYPYCH, 2009). Eles podem ser aplicados como reforços estruturais ou simplesmente para fins estéticos, exigindo portanto *design* e técnicas construtivas específicos para cada situação (SHAH, 2013). A utilização desse tipo de material como substituto de plásticos comuns em produtos de consumo, por exemplo, é interessante, uma vez que pode haver ganho de desempenho e redução de peso e custo (NETRAVALI e CHABBA, 2003).

Compósitos poliméricos reforçados com fibras são muito promissores. Eles podem ser desenvolvidos usando polímeros termoplásticos (como polietileno, poliamida e policarbonato), ou termofixos (como epóxi e poliéster) como matrizes e fibras naturais ou sintéticas como reforços, e têm um potencial tremendo devido à sua alta relação resistência-peso, adaptação ao desgaste, corrosão e impacto (CHAND e FAHIM, 2008). Para tornar viável sua utilização, principalmente quando eles são reforçados com fibras pouco avaliadas, e garantir sua competição com os materiais que já são tradicionais, seja por critérios de custo ou especificações de projeto, é muito importante o conhecimento sobre suas propriedades químicas e mecânicas (SANCHEZ *et al.*, 2010).

Os recentes avanços na engenharia genética e na ciência associada a compósitos e fibras naturais oferecem oportunidades para o desenvolvimento de materiais a base de recursos renováveis, que podem ser recicláveis e biodegradáveis, contribuindo com a sustentabilidade global (WOOL e SUN, 2005). A aplicação de compósitos reforçados com fibras naturais aumentou e está ganhando preferência sobre aqueles reforçados com fibras de vidro e carbono, por exemplo. A importância desse tipo de compósito é refletida pelo número crescente de publicações, patentes e comentários a respeito do assunto durante os últimos anos (FARUK *et al.*, 2014), uma vez que esse material compreende tanto aplicações científicas quanto comerciais (THAKUR, THAKUR e GUPTA, 2014).

Geralmente, os compósitos poliméricos reforçados com FNLs são fabricados a partir de técnicas tradicionais, como extrusão, injeção e moldagem seguida por compressão, por exemplo (FARUK *et al.*, 2012). Deve-se tomar cuidado com a estabilidade térmica das FNLs durante o processamento do compósito, principalmente no caso de matrizes poliméricas termoplásticas, que na maioria das vezes são processadas em altas temperaturas. A estabilidade térmica das FNLs pode ser estudada por análise termogravimétrica (TG), sua degradação compreende duas etapas: a primeira fica entre 220 e 280 °C e está associada a degradação da hemicelulose, ao passo que a segunda, que ocorre entre 280 e 300 °C, está relacionada com a degradação da lignina. A degradação térmica das FNLs pode gerar produtos voláteis, causando poros na matriz polimérica e comprometendo as propriedades mecânicas do compósito, além de diminuir sua massa específica (NABI SAHED e JOG, 1999).

Um problema associado a compósitos poliméricos reforçados com FNLs é a natureza hidrofílica desse tipo de fibra (KU *et al.*, 2011; SUMMERSCALES *et al.*, 2010b), pois ao serem incorporadas em matrizes poliméricas hidrofóbicas, tem-se como resultado sistemas heterogêneos de propriedades prejudicadas, uma vez que a adesão fibra/matriz fica comprometida. Existem tratamentos capazes de melhorar essa adesão, como: branqueamento, enxerto de monômeros, acetilação, entre outros (NABI SAHED e JOG, 1999). De acordo com Mattoso e coautores (1996), a adição de grupos polares na matriz polimérica, que é apolar, também contribui no processo de adesão.

Quando um compósito polimérico reforçado com FNLs é utilizado como camada intermediária em um SBM (DA CRUZ *et al.*, 2015; DA LUZ *et al.*, 2015; MONTEIRO *et al.*, 2015; ROHEN *et al.*, 2015), ele contribui consideravelmente na absorção de energia proveniente do impacto balístico. Segundo Morye e coautores (2000), a absorção se dá por diferentes mecanismos, tais como: tensão de ruptura das fibras, deformação elástica do compósito, cisalhamento das camadas e delaminação entre as mesmas. De acordo com Da Luz (2014), a delaminação entre fibra e matriz consiste na separação das fases dando origem a novas superfícies, uma vez que a adesão na interface é menor do que o esforço que resultou do impacto do projétil.

Rohen e coautores (2015) avaliaram a eficiência balística de um SBM com compósito de epóxi reforçado com fibras de sisal, onde após o impacto foi possível

observar o rompimento das fibras e sua separação em fibrilas mais finas, bem como a fratura frágil da matriz polimérica, ambos contribuindo na absorção de energia.

Existem várias maneiras de ordenar FNLs no interior de uma matriz polimérica, elas podem inclusive se encontrar sob forma de tecido, que pode ser fabricado em diferentes configurações. O capítulo a seguir comenta a respeito dos principais tipos de tecidos que podem ser usados para reforçar matrizes poliméricas em materiais compósitos.

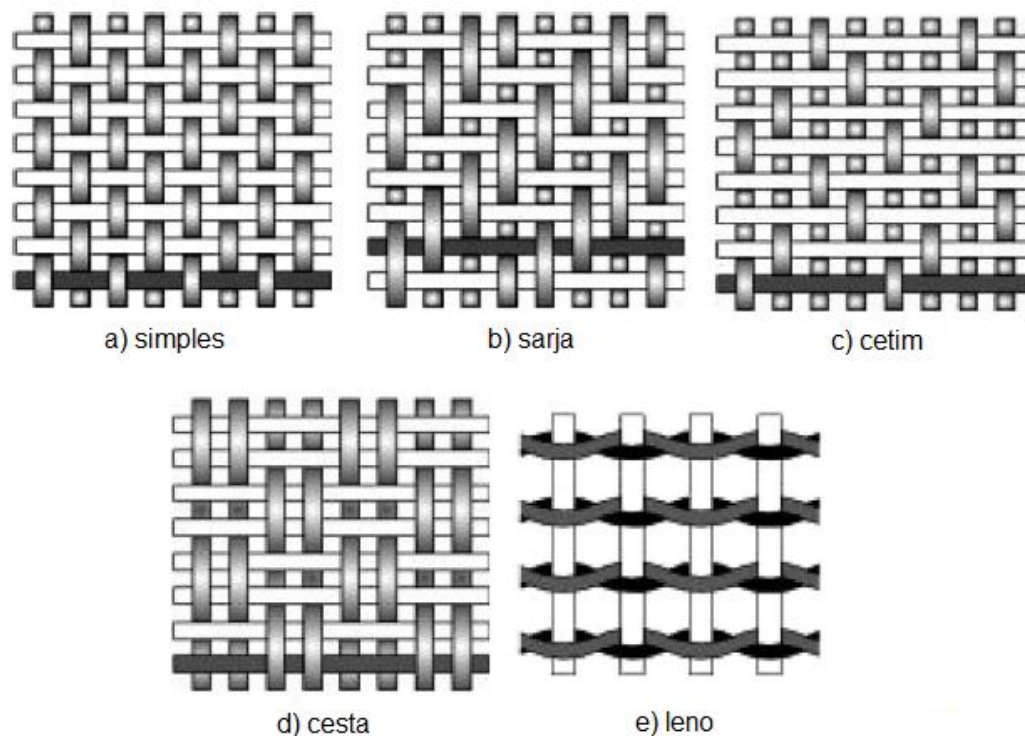
#### 2.4.1 REFORÇO NA FORMA DE TECIDO

Ao reforçar uma matriz polimérica com FNLs, as mesmas podem estar dispostas aleatoriamente, alinhadas em uma única direção ou na forma de tecido. Reforços aleatórios podem ser utilizados em situações onde as solicitações mecânicas no compósito não possuem uma direção preferencial, como em contrações volumétricas por variações térmicas, por exemplo. Os arranjos de fibras unidirecionais são convenientes quando são conhecidas as direções dos esforços que atuarão sobre o compósito (CARVALHO, 2005). Compósitos reforçados com tecidos tem sido muito utilizados por agências militares e outros órgãos em sistemas de blindagem, onde o objetivo é impedir que o projétil atravesse totalmente a blindagem, reduzindo o dano causado ao usuário (GOPINATH, ZHENG e BATRA, 2012).

Os tecidos são formados a partir de fios unidos por forças de contato e travados uns aos outros através de diferentes métodos de confecção (CARVALHO, 2005). A tecnologia têxtil associada aos processos de fiação e tecelagem, possibilita a fabricação de compósitos com melhores propriedades mecânicas (JOHN e THOMAS, 2008). Compósitos reforçados com fibras unidirecionais sofrem danos consideráveis por delaminação no sentido das fibras, isso pode ser reduzido utilizando o reforço na forma de tecido, resultando em compósitos com maior resistência à fratura, uma vez que o tecido promove aspereza, regiões ricas em resina entre fios e tecidos, criam uma grande área de superfície de fratura e

distribuem as tensões em várias frentes de trincas de delaminação (HOSUR *et al.*, 2004).

Os tecidos para reforço podem estar sob diferentes formas: simples, sarja, cetim, cesta e leno (FIG. 2.5). Tecidos simples possuem simetria, pois cada fio passa de maneira repetitiva por baixo e depois por cima de outro fio, conferindo boa estabilidade e porosidade razoável, no entanto possuem propriedades mecânicas relativamente baixas em comparação com os outros tipos; Tecidos sob a forma de sarja são caracterizados por um ou mais fios passando por baixo e em seguida por cima de dois ou mais fios, sua superfície é lisa e ele possui propriedades mecânicas ligeiramente superiores; Os tecidos do tipo cetim são basicamente os sarjas modificados, onde existem menos interseções entre os fios, promovendo uma boa malhabilidade; Tecidos do tipo cesta são parecidos com os simples, onde dois ou mais fios se entrelaçam alternadamente; O formato leno é semelhante ao simples, porém existe uma torção entre fios, formando uma espécie de espiral (JOHN e THOMAS, 2008).



**FIG. 2.5** Diferentes formas de tecidos.

Fonte: Adaptado de JOHN e THOMAS, 2008.

Como a primeira camada do sistema de blindagem avaliado neste trabalho é uma cerâmica de alumina, as seções a seguir comentam a respeito das principais cerâmicas utilizadas em sistemas de blindagem, seguida de revisão específica sobre alumina.

## 2.5 CERÂMICA

A maioria dos materiais cerâmicos são formados a partir de elementos metálicos e não metálicos, que se ligam através de ligações iônicas ou predominantemente iônicas com uma parcela covalente. Na temperatura ambiente as cerâmicas possuem fratura do tipo frágil, ou seja, rompem antes que ocorra deformação plástica (CALLISTER e RETHWISCH, 2012).

A busca por sistemas de blindagem mais leves fez crescer o interesse pelas cerâmicas. Elas possuem baixa massa específica, alta dureza, rigidez e resistência a compressão (YADAV e RAVICHANDRAN, 2003). Dentre as cerâmicas mais utilizadas em blindagem balística pode-se citar: alumina, carbetto de silício e o carbetto de boro. O carbetto de boro apresenta as melhores propriedades mecânicas: dureza, módulo de elasticidade, tenacidade a fratura e menor massa específica. O carbetto de silício é um pouco inferior ao carbetto de boro com relação as propriedades mecânicas (DA SILVA *et al.*, 2014). A alumina é muito utilizada apesar de ser relativamente densa, pois possui vantagens, como por exemplo: baixo custo, variedade de métodos de fabricação sem a utilização de equipamentos caros e propriedades físicas e desempenho relativamente bons (MEDVEDOVSKI, 2010).

### 2.5.1 ALUMINA

A alumina ou óxido de alumínio é um material cerâmico que possui a fórmula química  $Al_2O_3$  e estrutura cristalina do tipo coríndon. De acordo com Louro, Gomes e Costa (2001), o fato desse material ser barato e ter boa disponibilidade faz dele a

cerâmica preferida para utilização em sistemas de blindagem. Segundo Da Silva e coautores (2014), ela é o material estrutural de engenharia com a melhor relação custo/benefício das cerâmicas avançadas.

As propriedades da alumina dependem dos parâmetros de processamento, como temperatura e atmosfera de sinterização, impurezas, tamanho de grão e outros fatores extrínsecos e intrínsecos (DA SILVA *et al.*, 2014).

O ponto de fusão da alumina é de 2050 °C e ela necessita de uma temperatura de sinterização por volta de 1650 °C. É possível reduzir essa temperatura através do uso de aditivos, que irão resultar na formação de uma fase vítrea no interior da alumina. A adição de pequenas quantidades de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tem promovido uma alta massa específica e boa resistência mecânica em temperaturas de sinterização tão baixas quanto 1450 °C (GOMES, 2004).

A presença de aditivos na alumina pode alterar significativamente alguns parâmetros através da geração de precipitados nos contornos de grão, promovendo dessa maneira um aumento na absorção de energia durante um impacto balístico, como comprovado em estudo de Louro, Gomes e Costa (2001). De acordo com Gomes (2004), o ganho na absorção de energia ocorre devido à predominância de fratura do tipo intergranular, ou seja, entre os grãos. Segundo o autor, adicionar de 4 a 6% de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na alumina resulta na formação de precipitados de AlNbO<sub>4</sub> nos contornos de grãos, favorecendo o mecanismo de fratura citado anteriormente.

Uma vez que a interação de um projétil com a blindagem acarreta efeitos dinâmicos, estes serão agora revisados.

## 2.6 COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS MATERIAIS

Um processo que envolve aplicação de carga sobre o material pode ser tratado como estático ou dinâmico, isso depende da taxa com que uma força externa é aplicada no corpo: o processo estático está relacionado com taxas de deformações lentas, o processo dinâmico, por sua vez, depende de taxas elevadas (MEYERS, 1994).

Durante um processo estático, ou seja, quando o corpo é submetido a um carregamento lento, o resultado da aplicação da carga é percebido pelo corpo todo, pois há tempo suficiente para toda a estrutura relaxar, compreendendo uma sequência de estados de equilíbrio onde o somatório das forças e dos momentos é zero em todos os pontos (TRINDADE, 2012; MEYERS, 1994).

Em um processo dinâmico os esforços internos não são transmitidos instantaneamente, eles são transmitidos átomo a átomo com velocidades específicas. A onda de propagação de esforços pode ser considerada uma sucessão de impactos entre átomos adjacentes. Cada átomo que é acelerado com certa velocidade transmite toda ou parte dessa energia para seu vizinho, e isso ocorre sucessivamente. A massa, separação atômica e forças de atração e repulsão determinam o modo com que essa onda de tensão e deformação é transportada no interior do corpo (MEYERS, 1994).

Em diversas operações mecânicas e militares é de suma importância conhecer as propriedades mecânicas dos materiais e como os mesmos se comportam quando submetidos a elevados carregamentos. Projetos civis e militares podem ser otimizados quando é possível avaliar o comportamento dos materiais sob altas taxas de deformação (CARDOSO, 2005).

Quando um projétil atinge um sistema de blindagem em um impacto balístico tem-se altas taxas de deformações, ou seja, trata-se de um processo dinâmico onde ondas se propagam. Segundo Meyers (1994), as ondas podem ser de natureza elástica, plástica e de choque, dependendo da intensidade da tensão que é propagada por elas. Se as tensões transmitidas pela onda não excedem o limite de escoamento do material a onda será do tipo elástica e sua velocidade ( $C_o$ ) pode ser obtida através da EQ. 2.3.

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

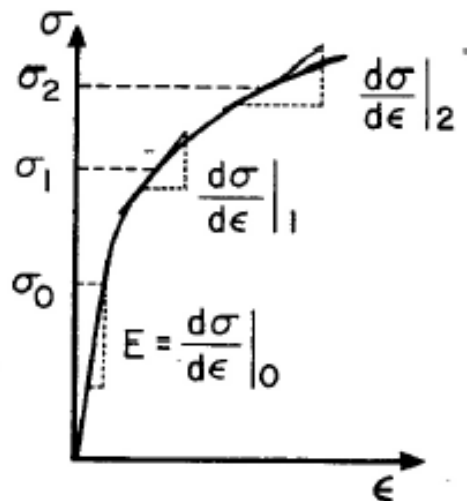
Onde  $E$  e  $\rho$  são o módulo de elasticidade e a massa específica do material, respectivamente.

Quando a onda transmite tensões maiores que o limite de escoamento do material o mesmo se deforma plasticamente e a onda pode ser dividida em duas

componentes: elástica e plástica. Através da EQ. 2.4 é possível calcular a velocidade ( $V_p$ ) da onda plástica (MEYERS, 1994).

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

Onde  $d\sigma/d\epsilon$  é a inclinação da curva tensão *versus* deformação do material. No regime elástico esse valor é igual ao módulo de elasticidade e a EQ. 2.4 resulta na EQ. 2.3. Essa situação está ilustrada graficamente na FIG. 2.6.



**FIG. 2.6** Curva tensão *versus* deformação.

Fonte: Adaptado de MEYERS, 1994.

Ao analisar a figura anterior percebe-se que a inclinação da curva é maior na região elástica. Conforme destacado por Meyers (1994), a onda elástica tem uma velocidade de propagação maior que a onda plástica, uma vez que:

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon_{elástico}} > \frac{d\sigma}{d\epsilon_{plástico}}$$

Por fim, Meyers (1994) descreve a situação onde a amplitude da onda de tensão excede o limite de escoamento dinâmico do material de forma bem expressiva e ele passa a agir como se fosse um fluido. Nesse caso as tensões cisalhantes são



desprezíveis em comparação com a componente hidrostática compressiva da tensão, e vale a EQ. 2.5.

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

Onde  $P$  é a pressão,  $V$  o volume específico e  $\gamma$  o índice adiabático. As ondas que se comportam segundo essa equação são chamadas de ondas de choque.

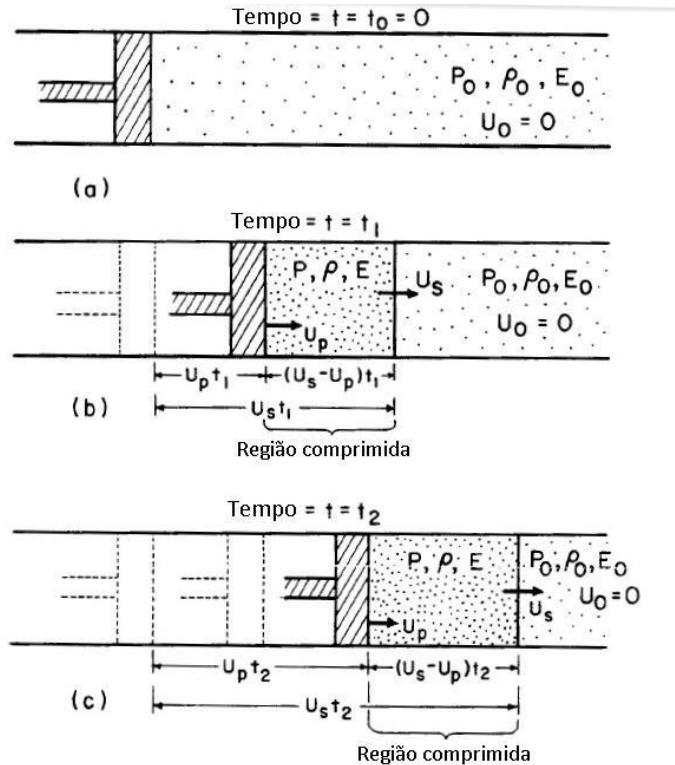
### 2.6.1 PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE CHOQUE

As ondas de choque estão inseridas no estudo do comportamento dinâmico dos materiais e sua análise é importante em eventos com altas velocidades de impacto (ZUKAS, 1990). De acordo com Meyers (1994) esse tipo de onda se propaga com velocidade maior que a onda elástica e pode ser tratada matematicamente pelas equações de Rankine-Hugoniot.

O mecanismo de propagação de uma onda de choque é descrito por Meyers (1994) por meio da estrutura simplificada da FIG. 2.7. Ela representa o corte longitudinal de um cilindro que contém um material compressível em seu interior, de pressão  $P_0$  e massa específica  $\rho_0$ . No interior do cilindro existe um pistão que é acelerado na direção do material com velocidade  $U_p$ . Após o tempo  $t = t_1$  a frente da região comprimida percorre uma distância  $U_s t_1$  com uma velocidade  $U_s$ , e o pistão percorre uma distância  $U_p t_1$ . A região comprimida possui pressão  $P$  e massa específica  $\rho$  e tanto a velocidade da frente de propagação quanto sua distância percorrida são maiores que as do pistão. Existe uma tendência dessa região ficar cada vez maior.

Quanto maior for a tensão provocada pelo carregamento externo, maior será a velocidade de propagação da onda de choque, diferente das ondas plásticas, que tem sua velocidade diminuída a medida que a tensão aumenta. Regiões de maior amplitude de uma onda de choque se propagam com velocidade maior do que regiões com menores amplitudes, e isso causa discontinuidades na pressão,

temperatura e massa específica (TRINDADE, 2012). De acordo com Meyers (1994), o principal requisito para que uma onda de choque se estabeleça é que a velocidade do pulso aumente com o aumento da pressão.



**FIG. 2.7** Modelo simplificado da propagação de uma onda de choque: (a) antes da perturbação; (b) tempo  $t = t_1$ ; (c) tempo  $t = t_2$ , tal que  $t_2 > t_1$ .

Fonte: Adaptado de MEYERS, 1994.

As relações de conservação de massa, momento e energia de Rankine-Hugoniot (EQ. 2.6, EQ. 2.7 e EQ. 2.8, respectivamente) podem ser usadas para descrever o movimento de uma onda de choque no interior de um gás, líquido ou sólido (MEYERS, 1994):

$$\rho_0 \cdot U_s = \rho \cdot (U_s - U_p) \quad \text{EQ. 2.6}$$

$$(P - P_0) = \rho_0 \cdot U_s \cdot U_p \quad \text{EQ. 2.7}$$

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

Para aplicar as equações anteriores é necessário assumir as seguintes considerações:

- a) O choque é uma superfície descontínua e não possui espessura aparente;
- b) O módulo de cisalhamento do material é zero e ele se comporta como um fluido;
- c) As forças de corpo (como a gravitacional) e a condução de calor na frente do choque são desprezíveis;
- d) Não há comportamento elastoplástico;
- e) O material não sofre transformações de fase.

Nas equações de Rankine-Hugoniot existem 5 variáveis: pressão ( $P$ ), velocidade das partículas ( $U_p$ ), velocidade do choque ( $U_s$ ), volume específico ( $V$ ) (ou massa específica,  $\rho$ ) e energia ( $E$ ). Portanto é necessário considerar mais uma equação para encontrar todos os parâmetros desejados. A quarta equação (EQ. 2.9) é chamada de equação de estado do material e é obtida através da relação entre a velocidade do choque e das partículas:

$$U_s = C_0 + S_1 \cdot U_p + S_2 \cdot U_p^2 + \dots \quad \text{EQ. 2.9}$$

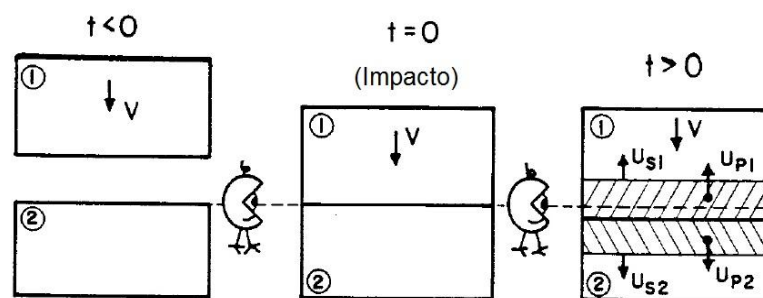
Onde  $S_1, S_2, \dots, S_n$  são parâmetros empíricos e  $C_0$  é a velocidade do som em um material onde a pressão é nula. Para a maioria dos materiais  $S_2 = S_3 = \dots = S_n = 0$  e a EQ. 2.9 se reduz a EQ. 2.10:

$$U_s = C_0 + S_1 \cdot U_p \quad \text{EQ. 2.10}$$

A EQ. 2.10 descreve razoavelmente bem como é a resposta ao choque em materiais que não sofrem transformação de fase. Geralmente  $C_0$  e  $S_1$  são tabelados e encontrados na literatura.

## 2.6.2 INTERAÇÃO E REFLEXÃO DE ONDAS DE CHOQUE

O impacto planar é a situação mais simples e o método de produção de ondas de choque mais comum. Segundo Meyers (1994), esse tipo de impacto ocorre em ensaios balísticos, por exemplo. Ele está associado a duas superfícies planas e paralelas, então o contato entre elas ocorre simultaneamente, ou seja, todos os pontos entram em contato ao mesmo tempo. Durante um impacto planar a direção do movimento do projétil é perpendicular ao alvo. A situação descrita está esquematizada na Figura 2.8. Inicialmente um projétil (1) se movimenta com velocidade  $V$ , na direção do alvo (2), que está em repouso. O impacto resulta em duas ondas de choque compressivas: uma se propaga para o interior do alvo, com velocidade  $U_{s2}$ , e a outra para o interior do projétil, com velocidade  $U_{s1}$ . A porção não comprimida do projétil ainda possui velocidade  $V$ , enquanto a porção não comprimida do alvo permanece em repouso.



**FIG. 2.8** Sequência de eventos em um impacto planar: (a) antes do impacto; (b) no instante do impacto; (c) Após o impacto.

Fonte: Adaptado de MEYERS, 1994.

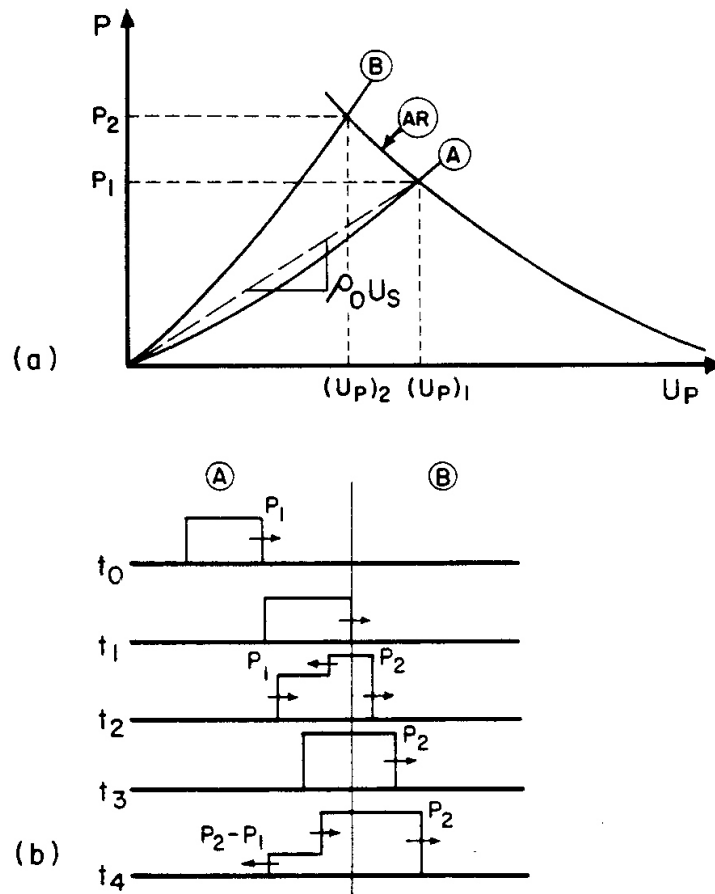
É necessário respeitar duas condições para que se possa estabelecer as equações que irão determinar a pressão no alvo e no projétil. O material deve ser contínuo em torno da interface de impacto, e como consequência toda região comprimida deve possuir a mesma velocidade, como está indicado na Figura 2.8(c). Se a velocidade das partículas de ambos os lados fossem diferentes, regiões de vazios ou superdensas iriam se formar. A segunda condição é que a pressão tem que ser a mesma, caso contrário outro pulso se formaria (MEYERS, 1994).

Durante o impacto a interface entre os dois materiais (projétil e alvo) irá se mover, enquanto a pressão permanece constante ( $P_1 = P_2$ ). O olho do observador e a linha tracejada na Figura 2.8(c) ajudam a exemplificar a situação. Antes do impacto todas as partículas do projétil possuem a mesma velocidade ( $V$ ). Como consequência do impacto, a velocidade de partícula na região comprimida do projétil é reduzida a  $U_{p1}$ , então a velocidade de partícula resultante é  $V - U_{p1}$ . No alvo, a velocidade de partícula na região comprimida é  $U_{p2}$ , então  $V - U_{p1} = U_{p2}$  e  $U_{p1} + U_{p2} = V$ . O referencial adotado por Meyers (1994) com relação a velocidade de partícula é a interface de impacto, que está em movimento e é definida pelo autor como referencial de Lagrangian. Para determinar a pressão, tanto no alvo, quanto no projétil, é necessário fazer uma série de deduções matemáticas. De acordo com Meyers (1994), a mesma solução pode ser obtida de forma mais rápida através de solução gráfica, chamada pelo autor de casamento de impedâncias.

Quando uma onda sofre mudança de meio ocorrem mudanças na pressão, velocidade e massa específica. Meyers (1994) define impedância como sendo o produto entre massa específica inicial ( $\rho_0$ ) e velocidade da onda de choque ( $U_s$ ), que nesse caso pode ser aproximado para a velocidade da onda sônica ( $C_0$ ). O autor ainda afirma que para materiais que possuem alta impedância, a melhor maneira de tratar a mudança de meios de uma onda de choque é por casamento de impedâncias.

Se a onda muda de um meio de menor impedância (A) para outro de maior impedância (B), a situação pode ser explicada com base na FIG. 2.9, que mostra a curva pressão *versus* velocidade de partícula nos dois meios. A inclinação da linha pontilhada no ponto de pressão  $P_1$  é a impedância do choque ( $\rho_0 U_s$ ). Para que o equilíbrio fique estabelecido é necessário que na interface entre os meios ocorra mudança na pressão  $P_1$ , e isso é alcançado pelo método de casamento de impedâncias, como demonstrado na FIG. 2.9(a). A pressão no meio de maior impedância (B) é  $P_2$ , ela pode ser obtida através da interseção da curva invertida do meio A (AR) com a curva referente ao meio B. Na FIG. 2.9(b) é possível visualizar a mudança da pressão (de  $P_1$  para  $P_2$ ) quando a frente de choque atinge a interface. Como consequência a onda se decompõe em duas frentes de pressão, uma para o interior de A e outra para o interior de B. A pressão do meio A reduz para  $P_2 - P_1$  e

a velocidade de partícula na região de alta pressão (tanto em A quanto em B) é  $U_{p2}$ , dessa forma a continuidade na pressão e velocidade de partícula são garantidas (MEYERS, 1994).

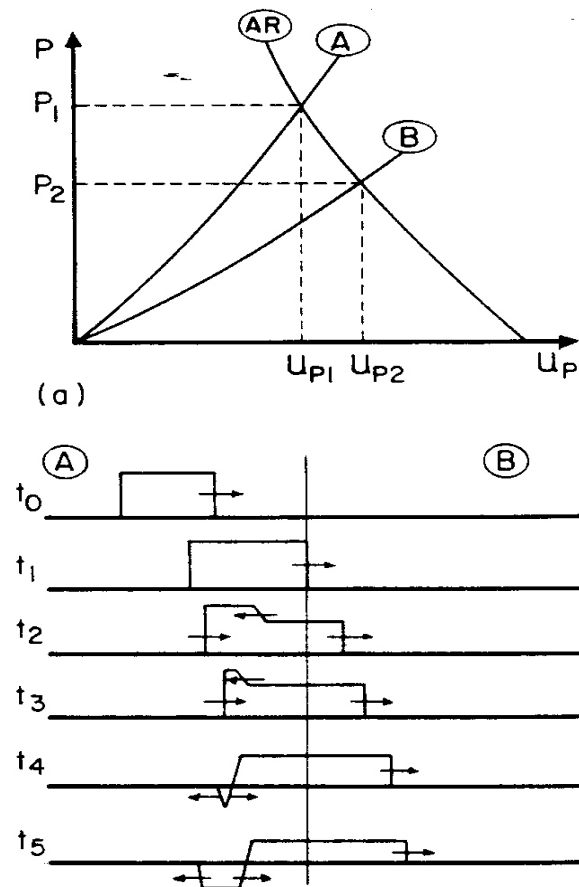


**FIG 2.9** Mudança de meio de uma onda de choque, de um meio de menor impedância (A) para um meio de maior impedância (B): (a) curva pressão *versus* velocidade de partícula; (b) seqüência de perfis de tensão.

Fonte: Adaptado de MEYERS, 1994.

Quando a onda de choque mudar de um meio de maior impedância (A) para outro de menor impedância (B), a análise pode ser feita através da FIG. 2.10. Na FIG. 2.10(a), inverte-se a curva do meio A no ponto correspondente a  $P_1$  e observa-se o ponto de interseção com a curva do meio B, dessa forma é possível encontrar  $P_2$  (que é menor que  $P_1$ ). A pressão proveniente do choque libera um pulso para o interior de A, é assumido que A e B são semi-infinitos e o pulso se propaga livremente até encontrar a frente de pulso primário, nesse momento um pulso de

tensão trativa é formado e se propaga em ambas as direções (no interior de A e B), como ilustrado em  $t_4$ , na FIG. 2.10(b). Se a amplitude dessa nova onda for suficientemente alta, o material irá se estilhaçar (MEYERS, 1994).



**FIG 2.10** Mudança de meio de uma onda de choque, de um meio de maior impedância (A) para um meio de menor impedância (B): (a) curva pressão *versus* velocidade de partícula; (b) seqüência de perfis de tensão.

Fonte: Adaptado de MEYERS, 1994.

No caso de um impacto balístico associado a um SBM, quanto menor a massa específica da segunda camada, menor sua impedância de choque em comparação com a primeira camada de cerâmica, isso faz com que a parcela de onda trativa que é refletida seja maior, potencializando a fragmentação da cerâmica e a dissipação de energia. De uma maneira geral, quanto menor a massa específica da segunda camada, mais eficaz é a dissipação de energia, como consequência disso a parcela de onda compressiva que prossegue no interior da blindagem é menor, reduzindo o trauma causado no usuário (DA LUZ *et al.*, 2015).

Na avaliação experimental do desempenho balístico, o método estatístico empregado foi a distribuição de Weibull, apresentada a seguir.

## 2.7 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

Segundo Rausand e Hoyland (2004), a distribuição de Weibull foi desenvolvida pelo professor sueco Waloddi Weibull (1887-1979) para modelar a resistência de materiais, e é um dos métodos mais utilizados na análise de confiabilidade de dados. Ela é muito flexível, e pode, através de uma escolha de parâmetros, avaliar várias situações, como por exemplo ensaios balísticos em SBMs (DA CRUZ *et al.*, 2015; DA LUZ *et al.*, 2015; MONTEIRO *et al.*, 2015; ROHEN *et al.*, 2015). Uma das vantagens do método é a possibilidade de obter soluções gráficas, mesmo que o número de amostras seja relativamente pequeno.

A distribuição de Weibull é definida matematicamente pela EQ. 2.11:

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

Onde  $\beta$  é chamado de módulo de Weibull e  $\theta$  de unidade característica. A equação anterior pode ser linearizada, dando origem a EQ. 2.12:

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

Comparando a equação anterior com a equação da reta ( $y = a \cdot x + b$ ), percebe-se que  $\beta$  e  $-[\beta \ln(\theta)]$  são o coeficiente angular e linear, respectivamente. Portanto esses parâmetros podem ser obtidos por análise gráfica.

O módulo de Weibull ( $\beta$ ) fornece um indicativo da reprodutibilidade dos dados. Quanto maior for o  $\beta$ , menor será a dispersão (PINHEIRO, ESTEVÃO e VITOR, 2014).

O capítulo de Materiais e Métodos é descrito a seguir. Ele tem como objetivo descrever as técnicas experimentais, os materiais utilizados e os ensaios balísticos.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 ASPECTOS GERAIS

A preparação das amostras compreende basicamente duas etapas: fabricação da primeira e segunda camada do SBM, ou seja, material cerâmico e compósito de poliéster-sisal, respectivamente. A terceira e última camada é uma fina chapa metálica, já fornecida nas dimensões adequadas. Quando as camadas estiverem prontas basta colar uma na outra. A FIG. 3.1 apresenta as dimensões em centímetros de uma amostra, posicionada em frente ao bloco de massa utilizado no ensaio balístico.

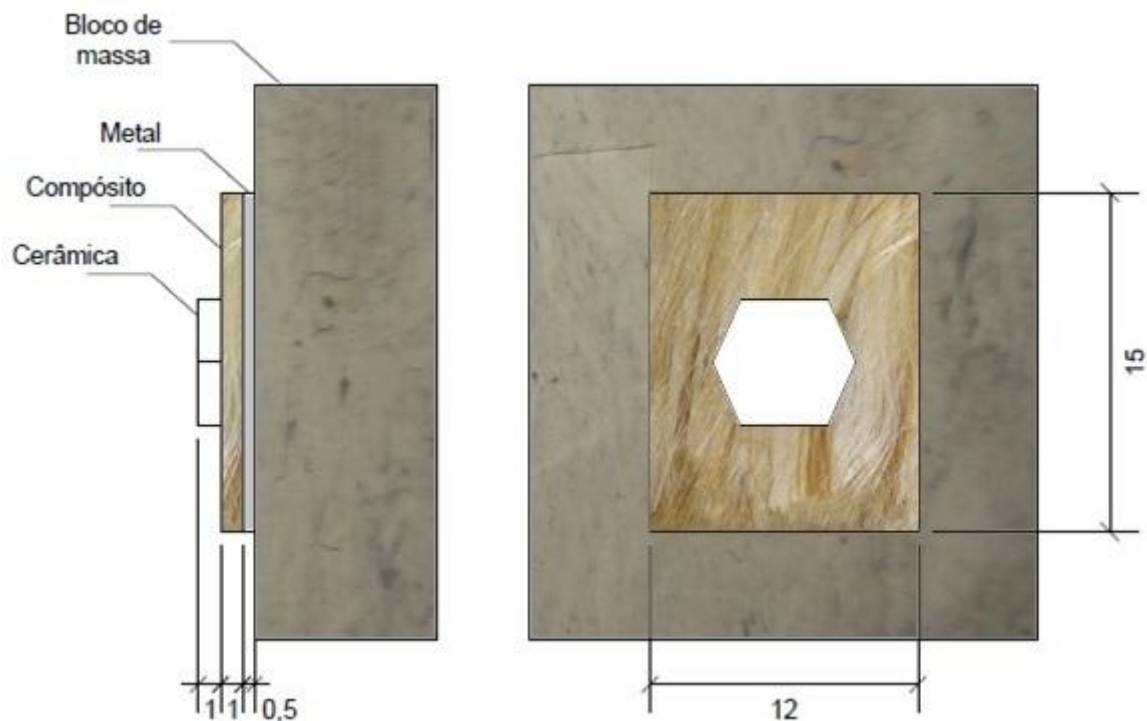


FIG. 3.1 Esquema da amostra do sistema de blindagem multicamada.

### 3.2 FABRICAÇÃO DA CERÂMICA

O processo de fabricação do material cerâmico tem início com a preparação de um pó composto por: 94,53% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 3,94% de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  e 1,53% de ligante orgânico Polietileno Glicol (PEG). Quando o ligante evapora a composição de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  passa a ser de 4%, que segundo Gomes (2004) foi a que apresentou melhores resultados em ensaios balísticos.

A obtenção dos materiais foi por meio das seguintes empresas: Treibacher Scheifmittel, Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) e VETEC, de onde foi possível adquirir  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  e PEG, respectivamente. As TAB. 3.1 e TAB. 3.2 informam composições obtidas em análises químicas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , informadas pelo fornecedor.

**TAB. 3.1** Composição de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  obtida em análise química.

Elemento	Análise química (%)	Especificação (%)
$\text{Al}_2\text{O}_3$	99.4	Min. 99.1
$\text{SiO}_2$	0.04	Máx. 0.06
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.04	Máx. 0.06
$\text{Na}_2\text{O}$	0.11	Máx. 0.15
MgO	0.03	---
Umidade a 300°C	0.2	Máx. 0.5
Outros	0.18	---

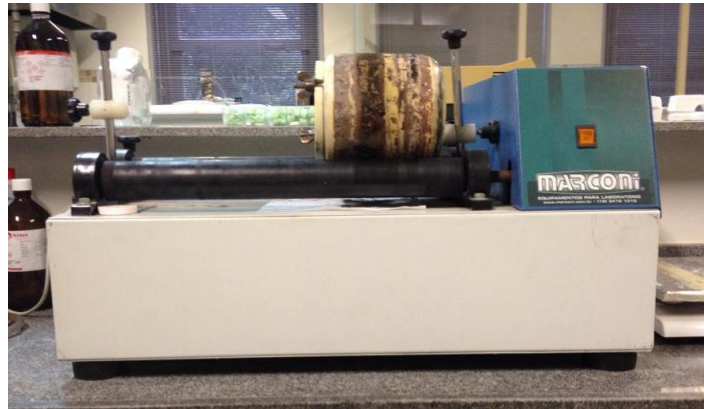
Fonte: Adaptado de TRINDADE, 2012.

**TAB. 3.2** Composição de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  obtida em análise química.

Elemento	Análise química
$\text{Nb}_2\text{O}_5$ (%)	99.5
Perda ao fogo (%)	0.1
Ta (ppm)	745
Ti (ppm)	240
Fe (ppm)	136
Si (ppm)	66

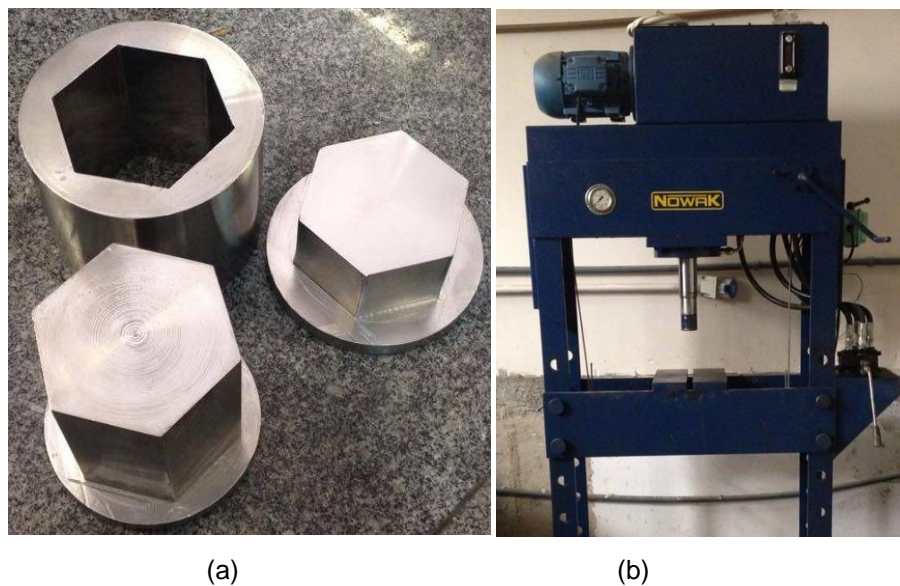
Fonte: Adaptado de TRINDADE, 2012.

A mistura é levada para um moinho de bolas MARCONI de modelo MA 500 (FIG. 3.2), onde deve permanecer por 8 horas, em seguida vai à estufa por 48 horas a 60 °C. Ao sair da estufa o pó é desaglomerado em um almofariz e peneirado em uma peneira com 0,355 mm de abertura.



**FIG. 3.2** Moinho de bolas MARCONI de modelo MA 500.

Após peneirado, é realizada a prensagem de 100g do material com uma carga de 12 toneladas em uma matriz hexagonal (FIG. 3.3a). A prensa utilizada é uma NOWAK hidráulica semi-automática (FIG. 3.3b) com capacidade para 30 toneladas, e a balança onde é pesado o material é da marca GEHAKA, modelo BK 300 (FIG. 3.4), e possui precisão de 0,001g.



**FIG. 3.3** (a) Matriz hexagonal; (b) Prensa hidráulica semi-automática NOWAK.



**FIG. 3.4** Balança GEHAKA BK 300.

Após a prensagem são obtidos os corpos verdes, que devem ser sinterizados no forno INTI, modelo FE 1700 (FIG 3.5).

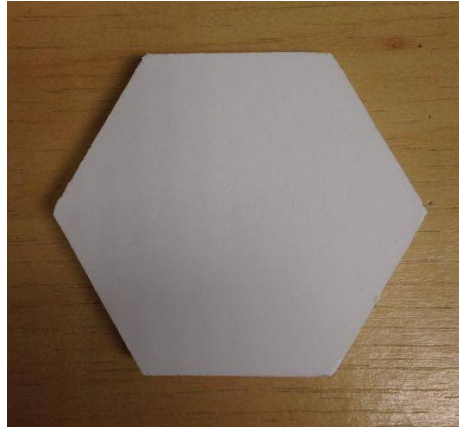


**FIG. 3.5** Forno INTI, modelo FE 1700.

O procedimento de sinterização compreende as seguintes etapas:

- a) Aquecimento de 25°C até 158°C, com taxa de 1°C/min;
- b) Patamar em 158°C por 1h;
- c) Aquecimento de 158°C até 375°C, com taxa de 1°C/min;
- d) Aquecimento de 375°C até 1000°C, com taxa de 8°C/min;
- e) Aquecimento de 1000°C até 1400°C a uma taxa de 5°C/min;
- f) Patamar de sinterização a 1400°C por 3h, e resfriamento no forno.

As etapas responsáveis por eliminar o ligante são as três primeiras, como consequência a composição de  $Nb_2O_5$  passa a ser 4% em peso, resultando em um aumento na massa específica da cerâmica através da diminuição do tamanho médio dos poros (TRINDADE, GOMES e LOURO, 2013). Na FIG. 3.6 é possível visualizar uma amostra de cerâmica já sinterizada.



**FIG. 3.6** Amostra de cerâmica.

Após a sinterização das amostras cerâmicas, a massa específica, densificação e espessura são medidas e registradas. A massa específica e densificação são obtidas pelas EQ. 3.1 e EQ 3.2.

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

$$densificação = \left( \frac{\rho_{sinterizado}}{\rho_{teórico}} \right) \times 100\% \quad \text{EQ. 3.2}$$

Onde:

$\rho_{teórico}$  : massa específica teórica;

$\rho_{sinterizado}$  : massa específica da amostra sinterizada;

$m$ : massa da amostra (g);

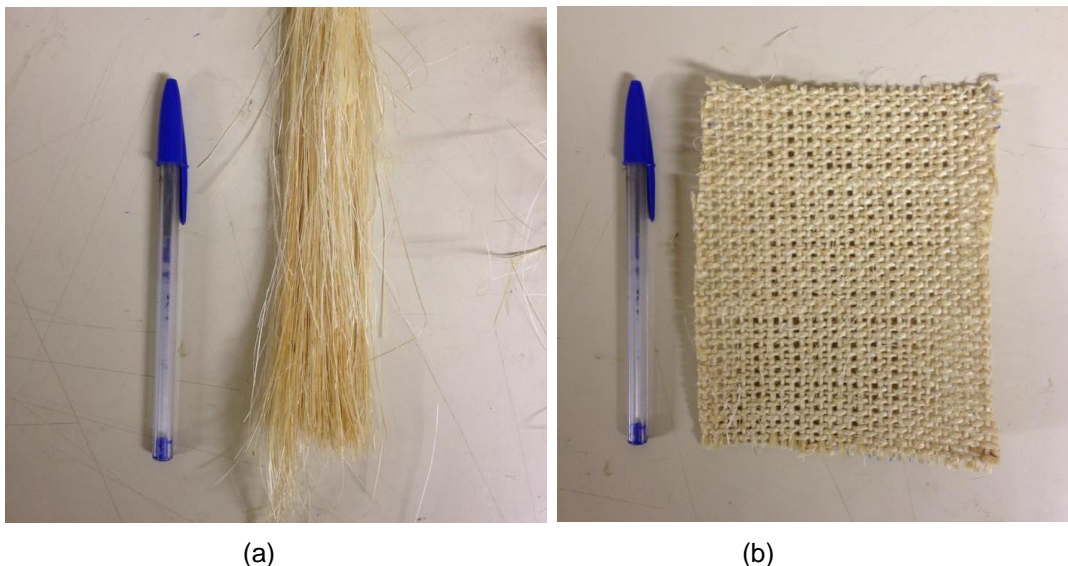
$V$ : volume da amostra ( $cm^3$ ).

A massa específica teórica foi calculada por Trindade (2012) em trabalho anterior através da regra das misturas, a qual considera a quantidade de cada componente presente na mistura ( $Al_2O_3$  e  $Nb_2O_5$ ), e o valor encontrado foi de  $4,0049 \text{ g/cm}^3$ .

### 3.3 FABRICAÇÃO DO COMPÓSITO POLIÉSTER-SISAL

Os compósitos foram produzidos nas seguintes composições: 20 amostras com 30% em volume de sisal (10 amostras com tecido e 10 com fibras), 20 amostras com 20% em volume de sisal (10 amostras com tecido e 10 com fibras) e 8 amostras com 10% em volume de sisal (5 amostras com tecido e 3 com fibras), totalizando 48 amostras. A massa específica do sisal considerada nos cálculos de porcentagem em volume foi de  $1,26 \text{ g/cm}^3$ , obtida na literatura (MONTEIRO *et al.*, 2011).

As fibras (FIG. 3.7a) foram fornecidas pela empresa Eletro Ferragens Santa Domênica em pacotes de 500g, já o tecido (FIG. 3.7b) foi adquirido por meio da empresa Sisalsul - Fibras Naturais, ele é composto por 100% sisal e está disposto na forma de rolo (1,5m x 30m).

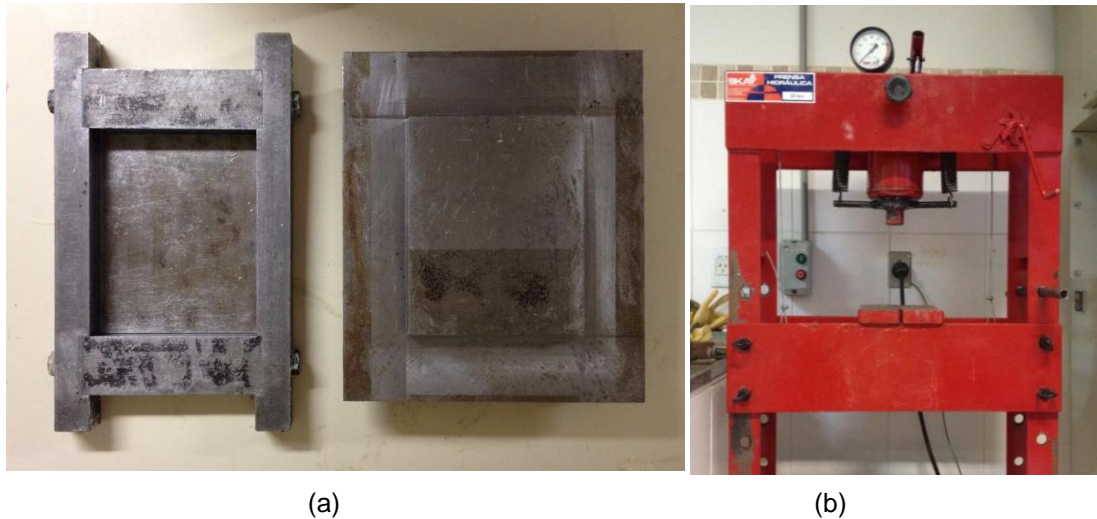


**FIG. 3.7** (a) Fibras de sisal; (b) Tecido de sisal.

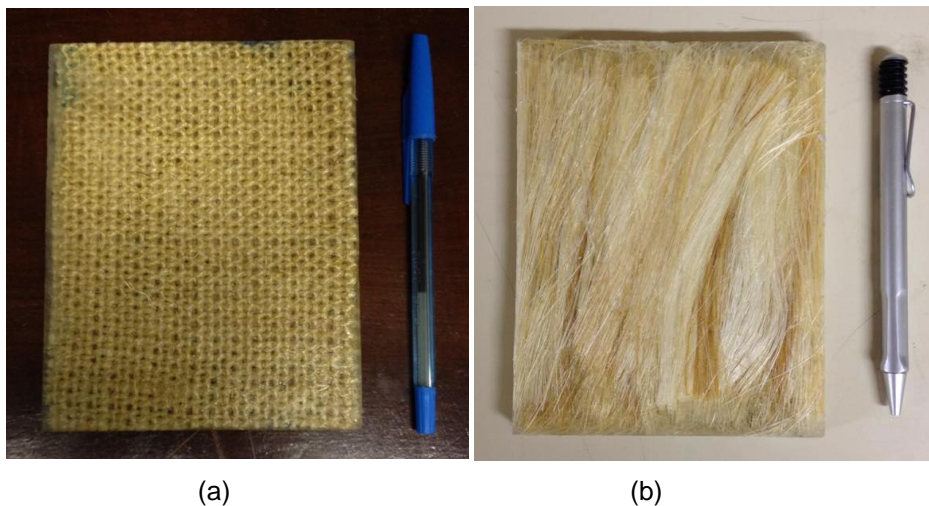
A resina utilizada foi de poliéster Cristal, fornecida pela empresa RESINPOXY. Ela deve ser misturada com um catalisador na proporção de 1% em peso. O tempo de mistura é de aproximadamente 2 minutos, até que o material comece a ficar viscoso.

O método de fabricação das amostras consiste na moldagem das mesmas em uma matriz metálica, cuja cavidade possui  $119 \times 150 \times 10 \text{ mm}$  (FIG. 3.8a), e posterior compactação. Inicialmente é feita a limpeza e lubrificação da matriz com

graxa de silicone, em seguida a mistura de poliéster e catalisador é colocada no molde metálico, onde são dispersas as fibras (ou tecido) de sisal, para que posteriormente seja realizada a prensagem uniaxial na prensa hidráulica SKAY (FIG. 3.8b) com 5 toneladas de carga. O tempo de cura é de aproximadamente 24 horas, as FIG. 3.9a e FIG. 3.9b ilustram as amostras contendo tecido e fibras de sisal, respectivamente.



**FIG. 3.8** (a) Matriz metálica; (b) Prensa hidráulica SKAY.



**FIG. 3.9** Amostras de compósitos reforçados com: (a) Tecido de sisal; (b) Fibras de sisal.

### 3.4 CAMADA METÁLICA

A terceira e última camada da amostra consiste em uma fina chapa fabricada com liga de alumínio 5052 H34 de dimensões 120 x 150 x 4.76 mm (FIG. 3.10) fornecida pela empresa METALAK METAIS. Esse material já foi utilizado em estudo anterior (BRAGA, 2015) devido sua boa resistência e disponibilidade no mercado. Suas propriedades e composição química são informadas nas TAB. 3.3 e TAB. 3.4, respectivamente.



**FIG. 3.10** Chapa de alumínio 5052 H34.

**TAB. 3.3** Propriedades do alumínio 5052 H34.

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>	<b>Especificação</b>
$\sigma_T$ (MPa)	249	Min. 235 Max. 285
$\sigma_e$ (MPa)	205	Min. 180
$\Delta L/L_0$ (%)	10	Min. 10

Fonte: Adaptado de BRAGA, 2015.



**TAB. 3.4** Composição química do alumínio utilizado.

Elemento	Concentração (%)	Especificação (%)
Mg	2.25	Min. 2.20 Max. 2.80
Fe	0.32	Máx. 0.40
Cr	0.16	Min. 0.15 Máx. 0.35
Si	0.20	Máx. 0.25
Cu	0.01	Máx. 0.10
Zn	0.01	Máx. 0.10
Ga	0.01	Máx. 0.05

Fonte: Adaptado de BRAGA, 2015.

### 3.5 COLAGEM DAS CAMADAS

A última etapa na preparação das amostras consistiu na colagem das três camadas. Para isso foi utilizado um adesivo de poliuretano de cura rápida ULTRAFLEX (FIG. 3.11), indicado para colar uma variedade de materiais.



**FIG. 3.11** Adesivo de cura rápida ULTRAFLEX.

### 3.6 ENSAIO BALÍSTICO

O nível de proteção dos SBMs foi avaliado com base nos resultados dos ensaios balísticos, que foram realizados no Centro de Avaliações do Exército (CAEx), no Campo de Prova da Marambaia – RJ, na linha de ensaios para armas leves.

A avaliação do nível de proteção balística dos SBMs foi feita com base na medida da profundidade da deformação (indentação) provocada pelo tiro de um provete calibre 7,62 mm (FIG. 3.12a) em um bloco de massa (plastilina CORFIX®) de 50 mm de espessura e massa específica de 1,7 g/cm<sup>3</sup>, onde a amostra é presa através de um dispositivo de fixação (FIG. 3.12b). O ensaio ocorreu segundo as condições:

- a) Munição: calibre 7,62 mm M1 (FIG. 3.13), conforme é fornecida comercialmente ao Exército Brasileiro;
- b) Distância ao alvo (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;
- c) Ângulo de incidência do projétil no alvo: 90°.

A FIG. 3.14 representa um esquema de funcionamento do ensaio balístico.



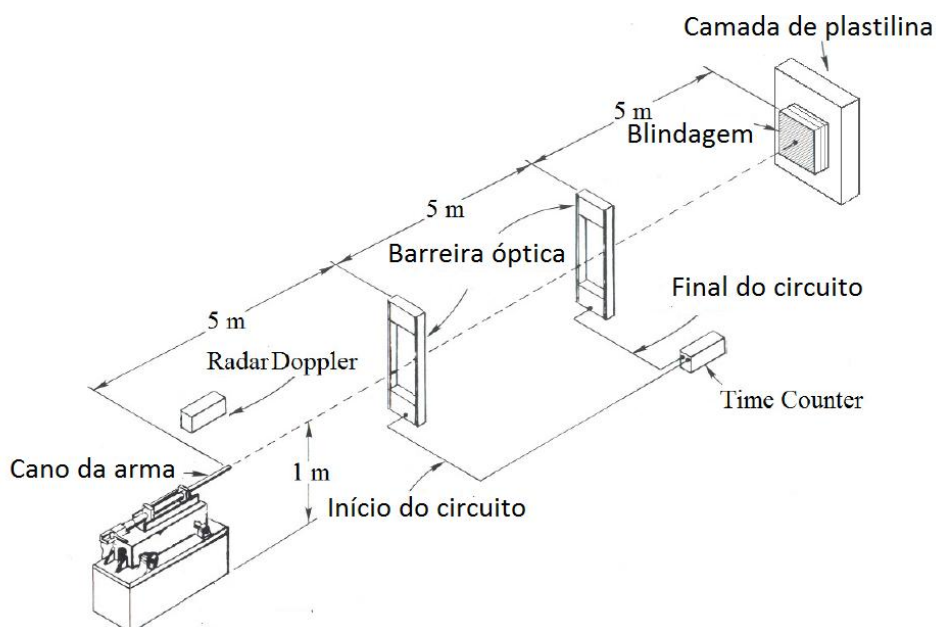
(a)

(b)

**FIG. 3.12** (a) Provete calibre 7,62 mm; (b) Dispositivo de fixação da amostra no bloco de massa.



**FIG. 3.13** Munição calibre 7,62 mm M1.



**FIG. 3.14** Esquema de funcionamento do ensaio balístico.

Fonte: Adaptado de DA SILVA, 2014.

Foram realizados 40 ensaios balísticos referentes à indentação na plastilina, sendo que 32 corresponderam às amostras contendo 30% e 20% de sisal, divididos igualmente em 16 ensaios para cada tipo de amostra (reforçadas com tecido e fibras). Os outros 8 ensaios foram referentes às amostras contendo 10% de sisal, 5 na forma de tecido e 3 na forma de fibras. Os SBMs foram considerados eficientes se a medida da indentação não excedeu 44 mm, conforme prevê a norma NIJ 0101.06 (2008).

Os compósitos de poliéster com 20% e 30% de sisal foram avaliados individualmente em ensaios de velocidade residual, onde cada tipo de compósito foi representado por 2 amostras, às quais foram submetidas a 4 disparos cada uma. Elas foram fixadas em um suporte e com o auxílio do radar Doppler (FIG. 3.15), modelo SL-520P, do fabricante Weibel, foram registradas as velocidades do projétil antes e após o impacto. Dessa forma foi possível calcular a energia cinética que foi absorvida pelas camadas e estimar sua velocidade limite. As condições para esse ensaio são as mesmas do ensaio de indentação na plastilina.



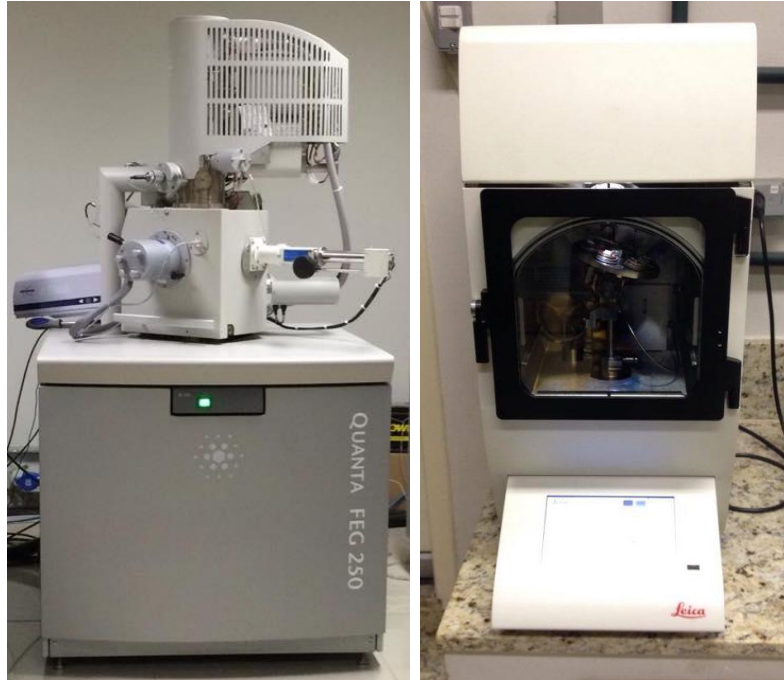
**FIG. 3.15** Radar Doppler, Weibel, modelo SL-520P.

Para relacionar os resultados obtidos nos ensaios foi utilizado o método estatístico de Weibull, que fornece informações inerentes à homogeneidade, confiabilidade e ajustabilidade dos dados.

### 3.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Após os ensaios balísticos, fragmentos provenientes das amostras foram coletados e analisados no microscópio eletrônico de varredura (MEV) FEI Quanta FEG 250 (FIG. 3.16a). O objetivo ao analisar as micrografias é entender como os materiais se comportaram durante o impacto balístico. O MEV pode fornecer informações importantes a respeito dos mecanismos de fratura dos materiais que compõem os SBMs.

Para possibilitar a análise em MEV foi necessário tornar as amostras condutoras de elétrons, portanto, os fragmentos foram recobertos com platina (Pt) através do equipamento de deposição de filme de alto vácuo, da marca LEICA, modelo EM ACE600 (FIG. 3.16b).



(a)

(b)

**FIG. 3.16** (a) Microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta FEG 250; (b) Equipamento de deposição de filme de alto vácuo, LEICA EM ACE600.

O capítulo a seguir apresenta os resultados obtidos neste trabalho, que foram discutidos e comparados com outros resultados disponíveis na literatura.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA CAMADA DE CERÂMICA

Foi necessário fabricar um total de 40 amostras de cerâmica, com base nos procedimentos descritos no item 3.2, referentes à primeira camada dos SBMs. São apresentados na TAB. 4.1: espessura, massa específica e densificação das amostras sinterizadas. No cálculo da densificação foi utilizada a massa específica teórica de  $4,0049 \text{ g/cm}^3$ , obtida através da regra das misturas e já utilizada em trabalho anterior (TRINDADE, 2012).

**TAB. 4.1** Espessura, massa específica e densificação das amostras cerâmicas.

Amostra	Espessura (mm)	Massa específica ( $\text{g/cm}^3$ )	Densificação (%)
1	10,78	3,29	82,23
2	10,95	3,27	81,57
3	10,89	3,29	82,26
4	10,88	3,31	82,54
5	10,91	3,26	81,30
6	10,89	3,33	83,13
7	10,92	3,33	83,24
8	10,74	3,41	85,17
9	10,93	3,30	82,35
10	10,35	3,32	83,02
11	10,38	3,33	83,07
12	10,75	3,38	84,40
13	10,52	3,26	81,30
14	10,97	3,35	83,70
15	10,55	3,29	82,05
16	10,32	3,31	82,57
17	10,83	3,32	82,85
18	10,36	3,31	82,71
19	10,60	3,36	83,93

Amostra	Espessura (mm)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Densificação (%)
20	10,49	3,29	82,27
21	10,78	3,37	84,07
22	11,03	3,21	80,22
23	10,49	3,27	81,75
24	11,14	3,20	79,86
25	10,35	3,33	83,07
26	10,48	3,31	82,54
27	10,84	3,34	83,38
28	11,03	3,20	80,01
29	10,94	3,27	81,56
30	10,96	3,26	81,37
31	11,02	3,18	79,40
32	10,71	3,30	82,45
33	10,90	3,29	82,14
34	10,88	3,32	82,83
35	10,86	3,34	83,23
36	10,85	3,27	81,69
37	10,82	3,27	81,54
38	10,65	3,24	80,85
39	10,43	3,28	81,91
40	10,41	3,30	82,42
<b>Média</b>	10,74 ± 0,23	3,30 ± 0,05	82,30 ± 1,22

Alguns autores encontraram resultados semelhantes para os parâmetros da TAB. 4.1. Gomes (2004) obteve 3,41 e 84,83 de massa específica e densificação, respectivamente. Trindade (2012), por sua vez, encontrou 3,53 g/cm<sup>3</sup> e 88,2%. Ambos os autores trabalharam nas mesmas condições deste trabalho, ou seja, amostras de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com adição de 4% de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, sinterizadas a 1400 °C por 3 horas.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DA CAMADA DE COMPÓSITO

A espessura e massa específica dos compósitos de poliéster-sisal foram medidas e seus valores médios se encontram na TAB. 4.2.

**TAB. 4.2** Espessura e massa específica dos compósitos de poliéster-sisal.

<b>Composição</b>	<b>Espessura média (mm)</b>	<b>Desvio padrão (mm)</b>	<b>Massa específica média (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Desvio padrão (g/cm<sup>3</sup>)</b>
30% Tecido	11,05	0,14	1,17	0,02
30% Fibras	11,09	0,08	1,16	0,01
20% Tecido	10,70	0,10	1,18	0,02
20% Fibras	10,92	0,05	1,13	0,01
10% Tecido	10,18	1,04	1,16	0,02
10% Fibras	10,79	0,13	1,14	0,02

Percebe-se que houve pouca variação nas propriedades relacionadas na TAB. 4.2, consequentemente a probabilidade desses parâmetros terem influenciado nos resultados dos ensaios balísticos é reduzida. De acordo com Da Luz (2014), uma possível explicação para a variação na espessura dos compósitos está no aprisionamento de ar durante a fabricação do material. Para uma mesma porcentagem de sisal, o fato do mesmo estar na forma de tecido ou fibras também se mostrou pouco relevante.

## 4.3 DESEMPENHO BALÍSTICO DOS SISTEMAS DE BLINDAGEM MULTICAMADA

Com a finalidade de verificar a eficiência dos SBMs avaliados neste trabalho, foram realizados ensaios balísticos com base em procedimentos descritos na norma NIJ 0101.06 (2008), já mencionados no item 3.6. Algumas amostras contendo sisal nas diferentes formas e composições podem ser visualizadas nas FIG. 4.1, FIG. 4.2 e FIG. 4.3, que correspondem ao momento anterior ao impacto balístico, quando elas estavam fixadas na plastilina.





(a)

(b)

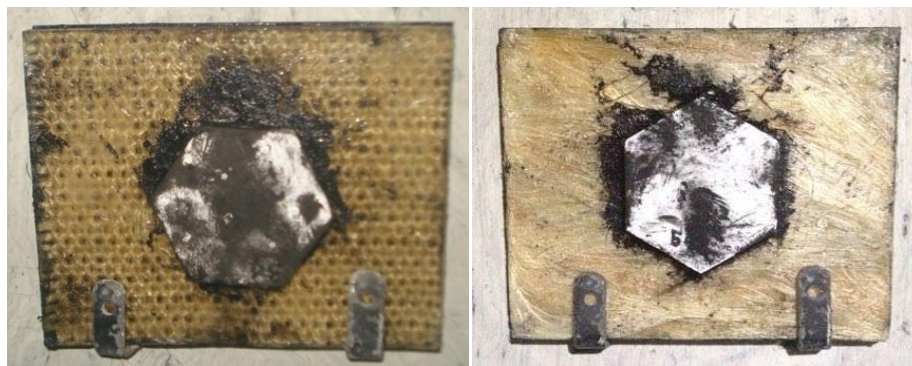
**FIG. 4.1** Amostras do sistema de blindagem multicamada com compósito de poliéster reforçado com 30% de sisal, no momento anterior ao impacto balístico: (a) Sisal na forma de tecido; (b) Sisal na forma de fibras.



(a)

(b)

**FIG. 4.2** Amostras do sistema de blindagem multicamada com compósito de poliéster reforçado com 20% de sisal, no momento anterior ao impacto balístico: (a) Sisal na forma de tecido; (b) Sisal na forma de fibras.



(a)

(b)

**FIG. 4.3** Amostras do sistema de blindagem multicamada com compósito de poliéster reforçado com 10% de sisal, no momento anterior ao impacto balístico: (a) Sisal na forma de tecido; (b) Sisal na forma de fibras.

Os resultados dos ensaios com relação à indentação causada na plastilina, velocidade e energia de impacto, bem como as características físicas de cada amostra no que diz respeito ao tipo e espessura da camada intermediária, podem ser visualizados na TAB. 4.3.

**TAB. 4.3** Tipo de camada intermediária, profundidade de deformação, velocidade de impacto, energia de impacto e espessura da camada intermediária.

<b>Amostra</b>	<b>Tipo</b>	<b><math>e</math> (mm)</b>	<b>Indentação (mm)</b>	<b><math>V_0</math> (m/s)</b>	<b><math>E_0</math> (KJ)</b>
1	30% Tecido	11,22	19,7	839,33	3,42
2	30% Tecido	11,05	29,1	835,09	3,38
3	30% Tecido	11,04	28,7	832,68	3,36
4	30% Tecido	11,04	24,2	839,8	3,42
5	30% Tecido	11,03	23,6	839,58	3,42
6	30% Tecido	10,86	22,1	837,78	3,40
7	30% Tecido	11,28	22,1	838,01	3,41
8	30% Tecido	11,15	24,9	837,84	3,40
9	30% Fibras	11,22	18,5	841,19	3,43
10	30% Fibras	11,10	23,5	836,98	3,40
11	30% Fibras	11,06	22,9	845,12	3,46
12	30% Fibras	11,10	20,5	846,14	3,47
13	30% Fibras	11,09	20,3	834,27	3,38
14	30% Fibras	10,92	26,7	839,91	3,42
15	30% Fibras	11,19	17,1	838,6	3,41
16	30% Fibras	11,14	23,7	846,02	3,47
17	20% Tecido	10,89	27,2	847,33	3,48
18	20% Tecido	10,80	25,2	845,92	3,47
19	20% Tecido	10,75	21,7	845,2	3,46
20	20% Tecido	10,69	26,6	835,56	3,39
21	20% Tecido	10,68	21,1	842,62	3,44
22	20% Tecido	10,67	18,5	844,93	3,46
23	20% Tecido	10,66	29,1	846,44	3,47
24	20% Tecido	10,64	22,3	853,22	3,53
25	20% Fibras	10,90	26,2	850,57	3,51
26	20% Fibras	10,93	21,1	852,56	3,53
27	20% Fibras	10,98	19,8	845,96	3,47
28	20% Fibras	10,92	28,1	843,21	3,45
29	20% Fibras	10,87	29,2	842,92	3,45

<b>Amostra</b>	<b>Tipo</b>	<b>e (mm)</b>	<b>Indentação (mm)</b>	<b><math>V_0</math> (m/s)</b>	<b><math>E_0</math> (KJ)</b>
30	20% Fibras	10,84	29,2	853,24	3,53
31	20% Fibras	10,97	28,3	843,74	3,45
32	20% Fibras	10,94	25,3	843,15	3,45
33	10% Tecido	10,92	22,5	859,92	3,59
34	10% Tecido	8,85	31,7	848,48	3,49
35	10% Tecido	9,25	18,9	845,88	3,47
36	10% Tecido	11,02	30,4	843,99	3,45
37	10% Tecido	10,88	21,8	858,74	3,58
38	10% Fibras	10,94	25,8	841,89	3,44
39	10% Fibras	10,76	23,9	837,84	3,40
40	10% Fibras	10,67	28,1	848,32	3,49

Após o impacto balístico, em todas as situações houve fragmentação total da primeira camada de cerâmica, como já era previsto, uma vez que o objetivo da mesma é dissipar energia cinética através desse mecanismo. As amostras conseguiram parar o projétil, ou seja, a blindagem não foi perfurada, indicando absorção de energia cinética pelo sistema. A parcela de energia não absorvida pela blindagem está intimamente ligada com o trauma que resultou na deformação da plastilina. Segundo o critério da norma NIJ 0101.06 (2008), a profundidade máxima dessa deformação não deve exceder 44 mm, essa exigência foi satisfeita por todas as amostras, indicando que os SBMs estudados neste trabalho se mostraram eficientes, independentemente da quantidade de sisal utilizado, e se o mesmo se encontrava na forma de tecido ou fibras. Algumas amostras, logo após sofrerem impacto balístico, estão ilustradas nas FIG. 4.4, FIG. 4.5 e FIG. 4.6.



(a)

(b)

**FIG. 4.4** Amostras do sistema de blindagem multicamada com compósito de poliéster reforçado com 30% de sisal, logo após o impacto balístico: (a) Sisal na forma de tecido; (b) Sisal na forma de fibras.



(a)

(b)

**FIG. 4.5** Amostras do sistema de blindagem multicamada com compósito de poliéster reforçado com 20% de sisal, logo após o impacto balístico: (a) Sisal na forma de tecido; (b) Sisal na forma de fibras.



(a)

(b)

**FIG. 4.6** Amostras do sistema de blindagem multicamada com compósito de poliéster reforçado com 10% de sisal, logo após o impacto balístico: (a) Sisal na forma de tecido; (b) Sisal na forma de fibras.

Estão apresentados na TAB. 4.4 os valores médios de indentação na plastilina, velocidade e energia de impacto, bem como as características físicas de cada tipo de amostra contendo compósitos de poliéster-sisal, incluindo também amostras contendo laminado de aramida (BRAGA, 2015), compósitos de epóxi-sisal (DE ARAÚJO, 2015) e compósitos de poliéster-curauá (BRAGA, 2015), para fins comparativos.

**TAB. 4.4** Valores médios obtidos na caracterização das camadas intermediárias das blindagens multicamada e nos ensaios balísticos.

Camada intermediária	<i>e</i> média (mm)	$\rho$ média (g/cm <sup>3</sup> )	Indentação média (mm)	$V_0$ média (m/s)	$E_0$ média (KJ)	Referência
Poliéster-Sisal - 30% <sup>2</sup> T	11,05	1,17	24,3 ± 3,3	837,51	3,40	<sup>1</sup> PT
Poliéster-Sisal - 30% <sup>3</sup> F	11,09	1,16	21,7 ± 3,1	841,03	3,43	<sup>1</sup> PT
Poliéster-Sisal - 20% <sup>2</sup> T	10,70	1,18	23,9 ± 3,6	845,15	3,46	<sup>1</sup> PT
Poliéster-Sisal - 20% <sup>3</sup> F	10,92	1,13	25,9 ± 3,7	846,92	3,48	<sup>1</sup> PT
Poliéster-Sisal - 10% <sup>2</sup> T	10,18	1,16	25,1 ± 5,7	851,40	3,52	<sup>1</sup> PT
Poliéster-Sisal - 10% <sup>3</sup> F	10,79	1,14	25,9 ± 2,1	842,68	3,44	<sup>1</sup> PT
Epóxi-Sisal - 30% <sup>2</sup> T	11,73	1,14	16,03 ± 2,65	827,95	3,32	DE ARAÚJO, 2015
Epóxi-Sisal - 30% <sup>3</sup> F	11,63	1,10	18,17 ± 2,06	822,21	3,28	DE ARAÚJO, 2015
Poliéster-Curauá - 30% <sup>3</sup> F	10,61	1,13	21,95 ± 2,05	862,69	3,61	BRAGA, 2015
Poliéster-Curauá - 20% <sup>3</sup> F	10,55	1,15	19,84 ± 2,31	859,04	3,58	BRAGA, 2015
Poliéster-Curauá - 10% <sup>3</sup> F	10,51	1,17	21,50 ± 5,77	859,26	3,58	BRAGA, 2015
Laminado de Aramida	9,68	1,44	20,2 ± 4,9	864,74	3,63	BRAGA, 2015

<sup>1</sup>PT: Presente Trabalho

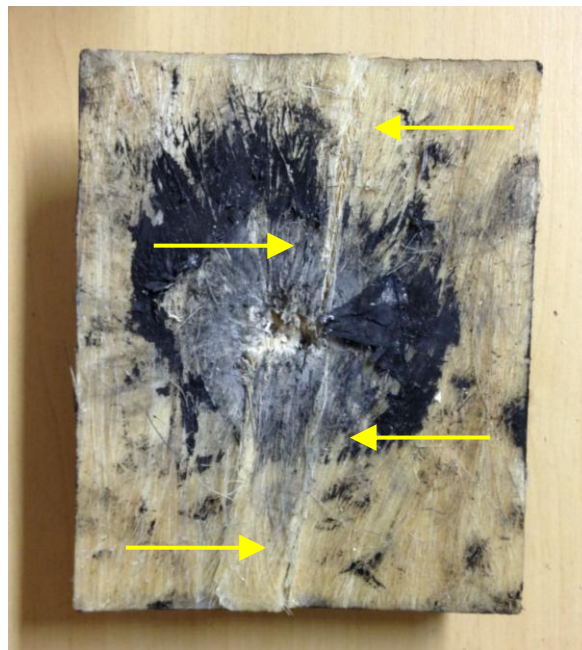
<sup>2</sup>T: Tecido

<sup>3</sup>F: Fibras

Os SBMs contendo compósitos de poliéster-sisal se mostraram igualmente eficientes, independentemente da porcentagem e forma de sisal utilizado, pois apresentaram valores próximos de indentação na plastilina. Como consequência disso, pressupõe-se que as fibras foram distribuídas de forma igualmente uniforme às camadas de tecido no interior da matriz polimérica, e a porcentagem de FNLs

pode ter influenciado pouco nesse quesito, resultando em um mesmo grau de coesão e conseqüentemente resistência balística dos compósitos.

O mecanismo básico de transferência de carga entre fibra e matriz está baseado na ligação interfacial, ou seja, a interface desempenha um papel muito importante no comportamento de fratura de um material compósito (SALKIND, 1969). Quando a interface é rompida, as fases são separadas e tem-se a delaminação, que parece ser um dos principais mecanismos de fratura das amostras contendo fibras de sisal. Nos compósitos com fibras, a delaminação ocorre em direções bem definidas, como se pode observar na FIG. 4.7. Já nos compósitos com tecido, ela é de difícil percepção, devido à distribuição das tensões em várias frentes de trincas de delaminação (HOSUR *et al.*, 2004).



**FIG. 4.7** Amostra de poliéster reforçada com 30% de fibras de sisal, após sofrer impacto balístico. As setas indicam o mecanismo de delaminação.

Considerando SBMs estudados por outros autores, a menor média de indentação na plastilina está associada às amostras contendo compósitos de epóxi reforçado com 30% de tecido de sisal (16,03 mm) (DE ARAÚJO, 2015). Uma possível explicação para isso, pode estar no fato do tecido apresentar regiões ricas em resina entre fios e camadas (HOSUR *et al.*, 2004), proporcionando um aumento na coesão e dando origem a grandes áreas de superfícies de fratura, aumentando

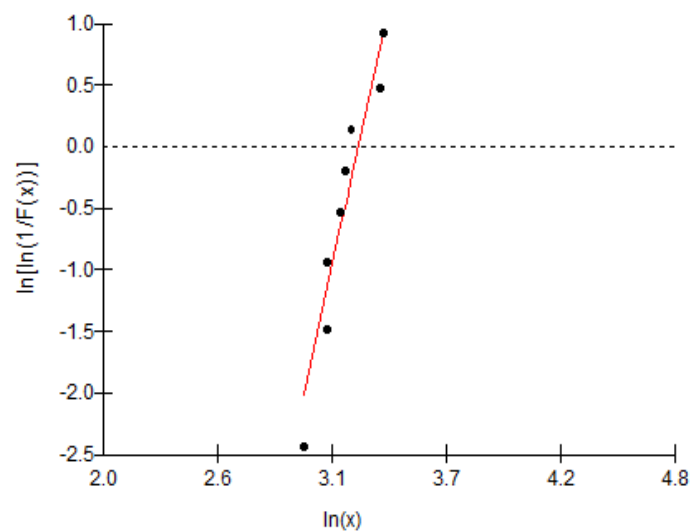
dessa forma a resistência balística. De acordo com Naik e Shrirao (2004), durante o impacto balístico, as fibras do tecido absorvem e dispersam a energia do projétil radialmente, para regiões distantes do ponto de impacto. Adicionalmente, a disposição de sisal em sucessivas camadas de tecido é interessante para a absorção de energia cinética, pois cada camada do sistema absorve certa quantidade de energia, até o momento em que o projétil é completamente parado (WANG *et al.*, 2014).

A TAB. 4.4 permite observar que os SBMs contendo compósitos de epóxi-sisal (DE ARAÚJO, 2015), além de apresentarem as menores médias de indentação na plastilina, possuem também os compósitos com maiores espessuras médias. A relação entre indentação na plastilina e espessura foi observada por Da Luz (2014), que analisou SBMs contendo compósitos de epóxi-juta. Os resultados obtidos pela autora revelaram que as amostras contendo epóxi reforçado com manta de juta, às quais apresentaram maiores espessuras médias quando comparadas com as amostras contendo epóxi reforçado com tecido de juta, obtiveram também as menores médias de indentação na plastilina. De acordo com Da Luz (2014), maiores espessuras podem estar relacionadas com aprisionamento de ar durante a fabricação dos compósitos, resultando em um maior volume de vazios em seu interior. Entretanto, não é possível afirmar que o volume de vazios possui relação direta com o trauma provocado na plastilina, pois, para isso seria necessário estudos mais aprofundados a respeito desse assunto.

Comparando os SBMs contendo compósitos de poliéster-sisal e laminado de aramida (BRAGA, 2015), com relação aos valores de indentação na plastilina, percebe-se que os resultados ficaram próximos, indicando uma eficiência balística semelhante no que diz respeito ao critério estabelecido pela norma NIJ 0101.06 (2008). Com base nisso, não se pode afirmar que um SBM contendo o tradicional laminado de aramida é melhor, em termos de desempenho balístico, do que um SBM contendo compósito de poliéster-sisal.

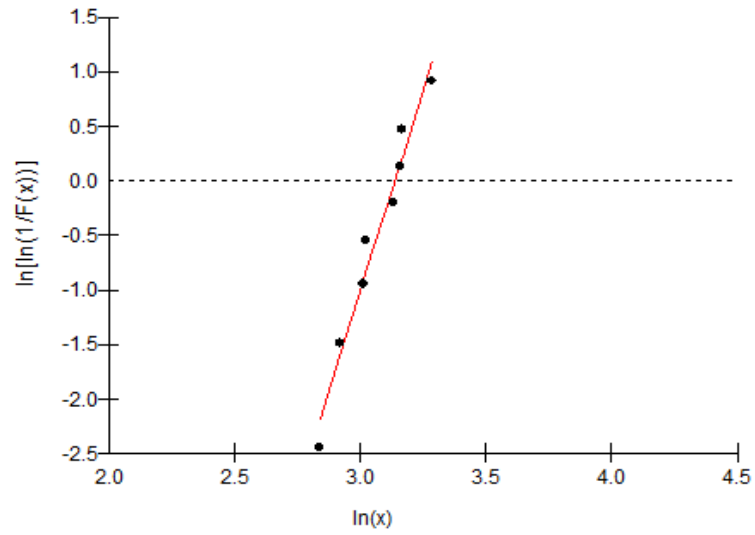
É importante destacar que a grande maioria das amostras contendo compósitos de poliéster-sisal se mantiveram íntegras e coesas após o impacto balístico, essa situação é interessante para blindagens pessoais: se um primeiro disparo não é capaz de fragmentar a blindagem, significa que ela continua sendo eficiente para uma segunda tentativa, oferecendo uma maior proteção ao usuário.

Os resultados obtidos nos ensaios balísticos foram tratados segundo o método estatístico de Weibull, com exceção das amostras contendo compósitos reforçados com 10% de sisal, que foram fabricadas em menor quantidade, uma vez que se mostraram inadequadas para aplicação balística. Elas foram as únicas amostras que não apresentaram integridade após o impacto, como se pode observar na FIG. 4.6. As FIG. 4.8, FIG. 4.9, FIG. 4.10 e FIG. 4.11 ilustram os gráficos da distribuição de Weibull das indentações causadas na plastilina, referentes aos SBMs contendo 30% e 20% de tecido e fibras de sisal. Na TAB. 4.5 é fornecido um resumo, apresentando os parâmetros de Weibull.

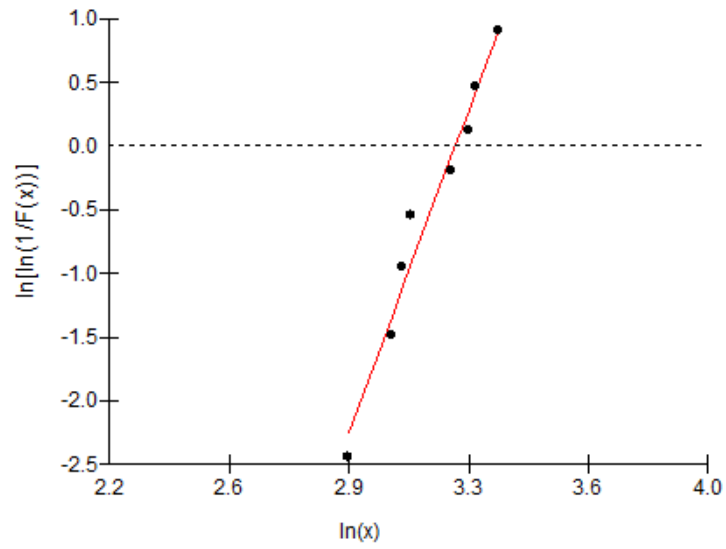


**FIG. 4.8** Gráfico da distribuição de Weibull das indentações causadas na plastilina para a blindagem com compósito de poliéster reforçado com 30% de tecido de sisal.

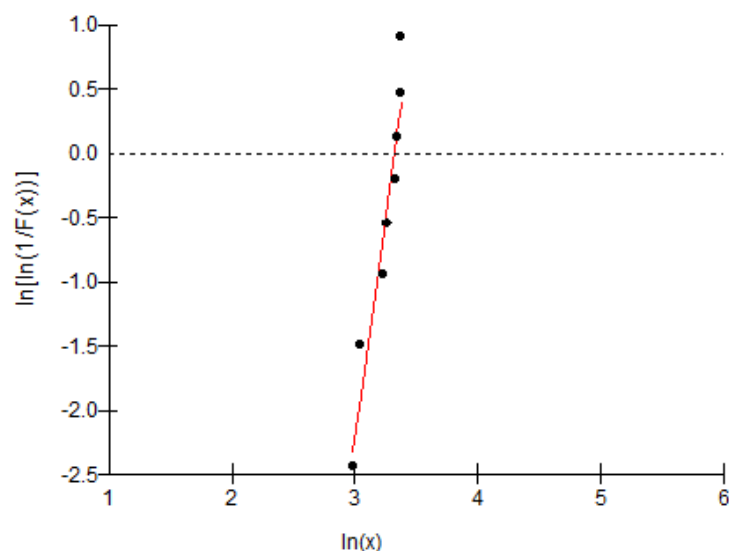




**FIG. 4.9** Gráfico da distribuição de Weibull das indentações causadas na plastilina para a blindagem com compósito de poliéster reforçado com 30% de fibras de sisal.



**FIG. 4.10** Gráfico da distribuição de Weibull das indentações causadas na plastilina para a blindagem com compósito de poliéster reforçado com 20% de tecido de sisal.



**FIG. 4.11** Gráfico da distribuição de Weibull das indentações causadas na plastilina para a blindagem com compósito de poliéster reforçado com 20% de fibras de sisal.

**TAB. 4.5** Parâmetros de Weibull dos resultados balísticos das blindagens multicamada com compósitos poliéster-sisal.

Camada intermediária	Módulo de Weibull ( $\beta$ )	Unidade característica ( $\theta$ )	Coefficiente de correlação ( $R^2$ )
30% Tecido	7,653	25,64	0,9222
30% Fibras	7,357	23,00	0,9642
20% Tecido	6,999	25,53	0,9647
20% Fibras	6,969	27,63	0,9199

Em todas as situações, os pontos correspondentes às indentações na plastilina apresentaram comportamento unimodal, ou seja, eles pertencem a um mesmo grupo e se relacionam através da mesma reta. É possível verificar na TAB. 4.5 que foram obtidos excelentes ajustes, pois o  $R^2$  se mostrou superior a 0,9. A maior homogeneidade dos dados está associada ao SBM contendo 30% de tecido de sisal ( $\beta = 7,653$ ), já o maior valor de  $\theta$ , que nesse caso representa a indentação característica, está associado às amostras fabricadas com 20% de fibras de sisal ( $\theta = 27,63$ ).

#### 4. 4 DESEMPENHO BALÍSTICO INDIVIDUAL DA CAMADA DE COMPÓSITO

Com o objetivo de avaliar o desempenho balístico individual dos compósito de poliéster-sisal, foram realizados ensaios de velocidade residual. Nesse caso, o alvo atingido pelo projétil foi somente o compósito, e foram testados somente aqueles reforçados com 20% e 30% de sisal, pois, como já foi mencionado anteriormente, o compósito reforçado com 10% de sisal não se mostrou adequado para uso em SBMs. Com o auxílio do radar Doppler, foram registradas as velocidades inicial (de impacto) e residual (após a perfuração do alvo). As EQ. 2.1 e EQ. 2.2 permitem o cálculo da energia cinética absorvida pelo compósito e a estimativa da velocidade limite, respectivamente.

Ao contrário dos ensaios de indentação na plastilina, em todos os ensaios de velocidade residual houve perfuração das amostras. Estão relacionados na TAB. 4.6 os valores médios de velocidades inicial ( $\overline{V}_0$ ) e residual ( $\overline{V}_R$ ), energia absorvida ( $E_{ABS}$ ) e sua porcentagem em relação a energia total ( $\% E_{ABS}$ ), e velocidade limite ( $V_L$ ). Para fins de comparação, também estão apresentados na TAB. 4.6 resultados de outros estudos, onde foram avaliados compósitos de epóxi-sisal (DE ARAÚJO, 2015), poliéster-curauá (BRAGA, 2015), laminado de aramida (BRAGA, 2015), liga de alumínio (BRAGA, 2015) e cerâmica (DA SILVA, 2014).

**TAB. 4.6** Velocidades médias inicial e residual, energia absorvida e velocidade limite para cada componente do sistema de blindagem multicamada.

Componente da blindagem	$\bar{V}_0$ (m/s)	$\bar{V}_R$ (m/s)	$E_{ABS}$ (J)	% $E_{ABS}$	$V_L$ (m/s)	Referência
Poliéster-Sisal - 30% Tecido	845 ± 5	828 ± 5	139	4,0	170 ± 3	PT <sup>1</sup>
Poliéster-Sisal - 30% Fibras	845 ± 6	828 ± 6	139	4,0	169 ± 9	PT <sup>1</sup>
Poliéster-Sisal - 20% Tecido	834 ± 6	816 ± 6	143	4,2	172 ± 9	PT <sup>1</sup>
Poliéster-Sisal - 20% Fibras	834 ± 13	819 ± 13	116	3,4	155 ± 7	PT <sup>1</sup>
Poliéster-Curauá - 10% Fibras	863 ± 2	833 ± 15	244	6,7	218 ± 55	BRAGA, 2015
Poliéster-Curauá - 20% Fibras	860 ± 5	837 ± 5	186	5,2	180 ± 13	BRAGA, 2015
Poliéster-Curauá - 30% Fibras	858 ± 3	833 ± 7	210	5,8	207 ± 21	BRAGA, 2015
Epóxi-Sisal - 30% Fibras	845 ± 4	824 ± 5	171	5,0	188	DE ARAÚJO, 2015
Epóxi-Sisal - 30% Tecido	845 ± 6	817 ± 5	221	6,4	214	DE ARAÚJO, 2015
Laminado de aramida (16 camadas)	862 ± 7	835 ± 10	221	6,1	212 ± 23	BRAGA, 2015
Liga de alumínio 5052 H34	860 ± 6	832 ± 9	234	6,5	228 ± 14	BRAGA, 2015
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +4%Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	848 ± 5	567 ± 4	1920	55	629	DA SILVA, 2014

<sup>1</sup>PT: Presente Trabalho

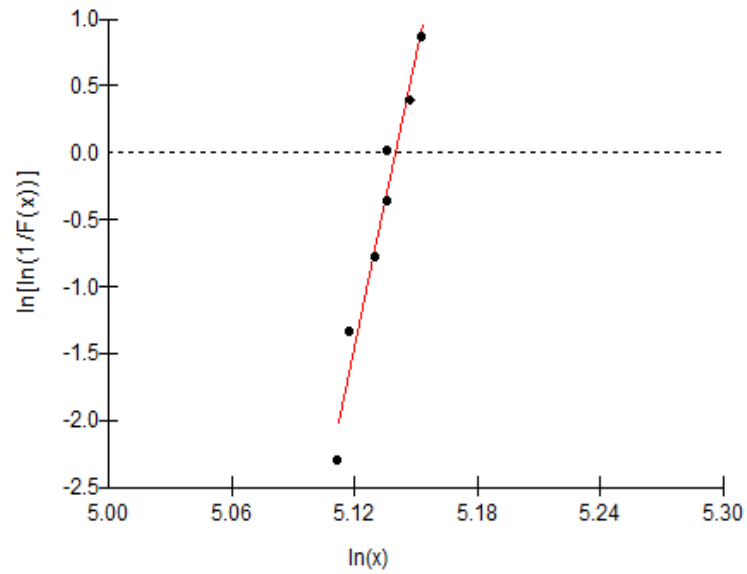
Considerando todos os componentes listados na TAB. 4.6, a cerâmica de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (DA SILVA, 2014) apresentou o melhor desempenho individual, ela conseguiu absorver mais da metade da energia total de impacto (55%) e apresentou velocidade limite de 629 m/s. A alta absorção de energia está relacionada com sua fratura frágil intergranular, que é favorecida com a adição de 4% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (GOMES, 2004).

Com relação aos compósitos de poliéster-sisal, considerando as médias de velocidade limite e seus desvios, os valores ficaram muito próximos, indicando eficiência balística semelhante desses materiais, quando testados individualmente

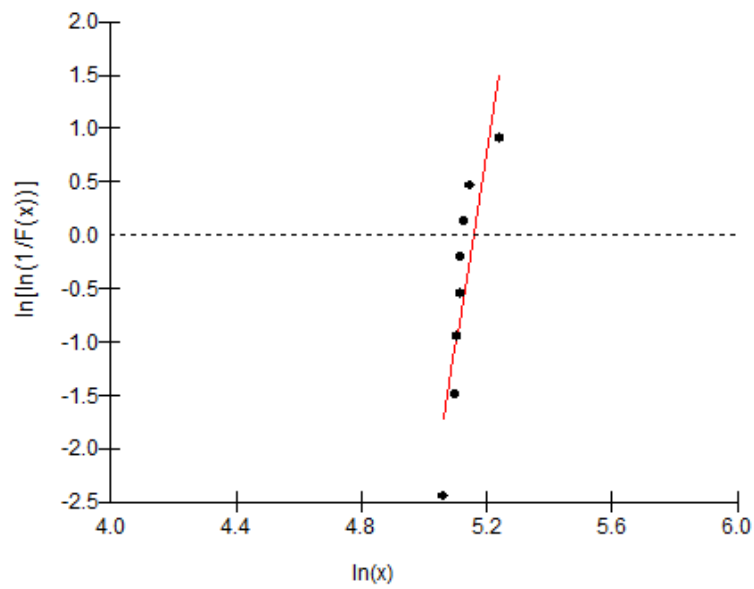
contra munições de calibre 7,62 mm. Comparando com resultados obtidos por outros autores, a maior média de velocidade limite, referente às camadas intermediárias dos SBMs, foi obtida pelo compósito de poliéster reforçado com 10% de fibras de curauá ( $V_L = 218$  m/s) (BRAGA, 2015). O fato da fibra de curauá apresentar melhores propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e resistência a tração) que a fibra de sisal, pode ter contribuído para o bom resultado desse compósito quando testado individualmente.

Ao comparar os compósitos com o laminado de aramida (BRAGA, 2015), percebe-se que todos os materiais absorveram menos de 7% de energia proveniente do impacto balístico. Isso significa que individualmente eles não são eficazes contra munições de calibre 7,62 mm. O projétil, com alta velocidade e energia, penetra facilmente nesses materiais quando eles se encontram de forma isolada. Isso certamente não acontece em um SBM, onde o projétil é rompido/erodido pela primeira camada de cerâmica, resultando em uma nuvem de fragmentos que serão retidos pela segunda camada. Em outras palavras, não é possível afirmar que o laminado de aramida é mais eficiente que um compósito polimérico reforçado com FNLs em uma blindagem classificada como nível III, pois essa situação requer o uso de SBMs, e nesse caso, os compósitos se equiparam ao laminado de aramida (como se pode observar na TAB. 4.4). Adicionalmente, é importante mencionar que os compósitos contam com o mecanismo de fratura frágil da matriz polimérica, ausente no laminado de aramida, que contribui na dissipação de energia (ROHEN *et al.*, 2015).

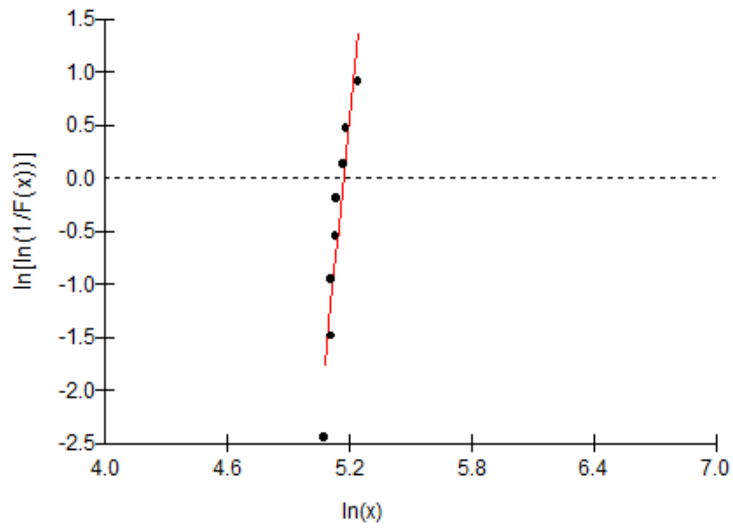
O método estatístico de Weibull foi utilizado no tratamento dos dados obtidos nos ensaios. As FIG. 4.12, FIG. 4.13, FIG. 4.14 e FIG. 4.15 correspondem aos gráficos da distribuição de Weibull das velocidades limites para os compósitos de poliéster reforçado com tecido e fibras de sisal nas porcentagens de 30% e 20%. Na TAB. 4.7 são apresentados os parâmetros de Weibull.



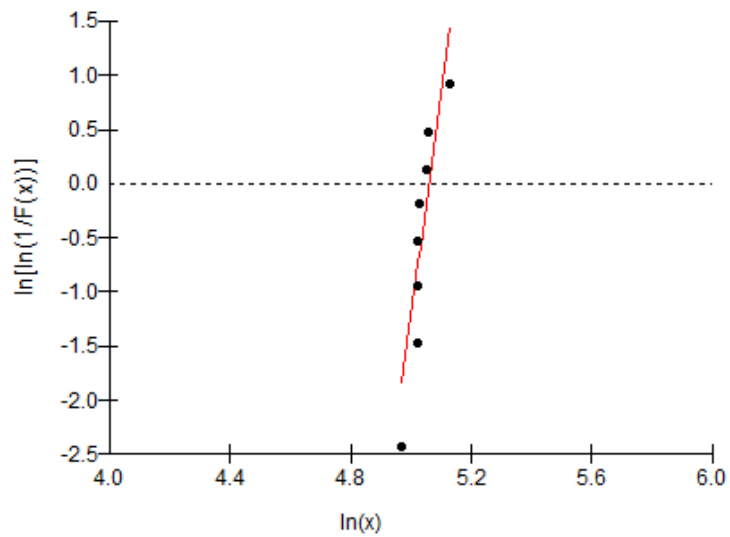
**FIG. 4.12** Gráfico da distribuição de Weibull das velocidades limites para a blindagem com compósito de poliéster reforçado com 30% de tecido de sisal.



**FIG. 4.13** Gráfico da distribuição de Weibull das velocidades limites para a blindagem com compósito de poliéster reforçado com 30% de fibras de sisal.



**FIG. 4.14** Gráfico da distribuição de Weibull das velocidades limites para a blindagem com compósito de poliéster reforçado com 20% de tecido de sisal.



**FIG. 4.15** Gráfico da distribuição de Weibull das velocidades limites para a blindagem com compósito de poliéster reforçado com 20% de fibras de sisal.

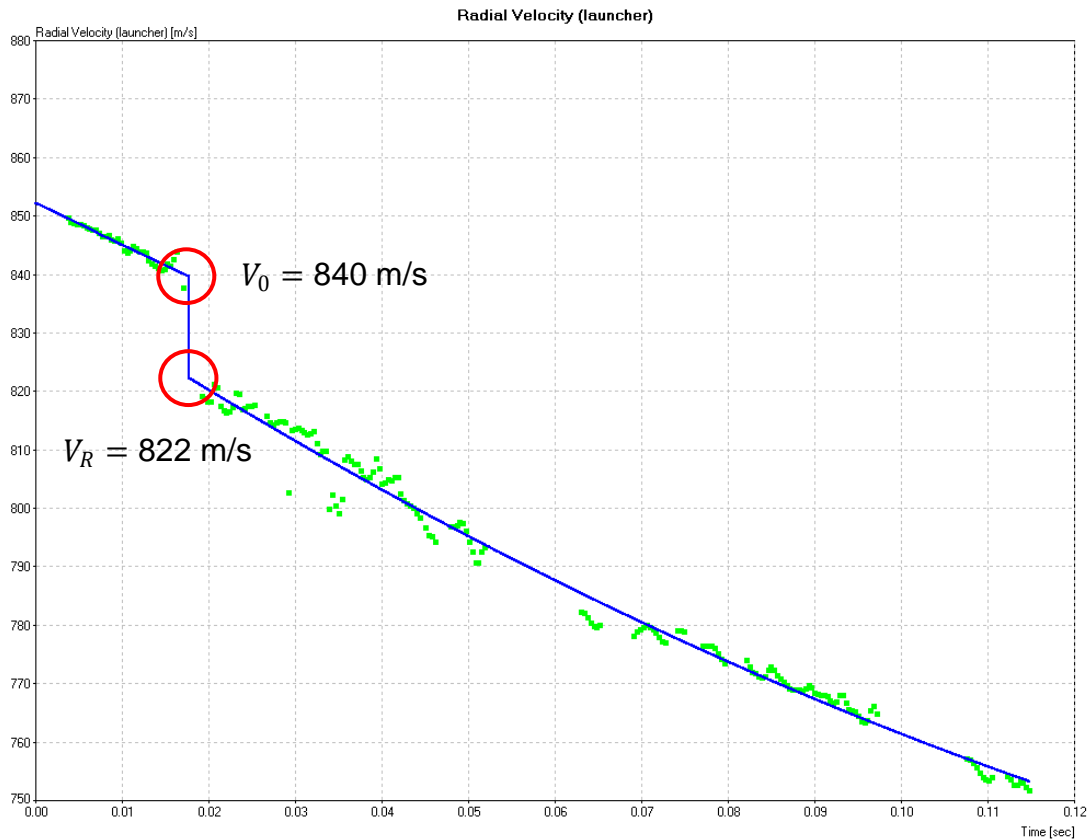
**TAB. 4.7** Parâmetros de Weibull dos resultados dos ensaios de velocidade residual dos compósitos de poliéster-sisal.

<b>Camada intermediária</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>
30% Tecido	72,05	170,7	0,9679
30% Fibras	18,04	173,8	0,7391
20% Tecido	18,70	175,7	0,8633
20% Fibras	20,46	157,5	0,8484

Em todas as situações, os pontos correspondentes às velocidades limites apresentaram comportamento unimodal, ou seja, eles pertencem a um mesmo grupo e se relacionam através da mesma reta. Percebe-se na TAB. 4.7 que o compósito reforçado com 30% de tecido de sisal obteve excelente ajuste, pois o  $R^2$  se mostrou superior a 0,9, no entanto, os demais compósitos apresentaram ajustes regulares. O compósito reforçado com 30% de tecido apresentou a maior homogeneidade dos dados ( $\beta = 72,05$ ), já o maior valor de  $\theta$ , que nesse caso representa a velocidade limite que melhor caracteriza a amostra, está associado às amostras fabricadas com 20% de tecido de sisal ( $\theta = 175,7$ ).

Os pontos experimentais do ensaio de velocidade residual de uma amostra de poliéster reforçado com 20% de tecido de sisal, obtidos a partir do espectro de radar, podem ser visualizados na FIG. 4.16, assim como a curva polinomial contínua ajustada. O impacto balístico ocorre no momento em que há uma queda abrupta na velocidade, ou seja, aproximadamente 840 m/s, que é definida como a velocidade inicial ou de impacto ( $V_0$ ). A velocidade residual ( $V_R$ ), por sua vez, corresponde ao ponto mínimo da queda (aproximadamente 822 m/s). Todos os materiais testados possuem gráficos semelhantes ao da FIG. 4.16, pois com esses dados é possível estimar a velocidade limite ( $V_L$ ) para qualquer componente do SBM.





**FIG. 4.16** Pontos experimentais do ensaio de velocidade residual obtidos a partir do espectro de radar.

#### 4.5 INTERAÇÃO DAS ONDAS DE CHOQUE NAS BLINDAGENS MULTICAMADA

Após o impacto balístico é gerada uma onda de choque compressiva que percorre o interior da amostra, interagindo com as interfaces existentes entre as diferentes camadas do SBM. Para estudar essa interação foi utilizado o método de casamento de impedâncias e as equações de conservação EQ. 2.6, EQ. 2.7 e EQ. 2.8, dessa forma é possível calcular a impedância de choque, velocidades de partículas e pressões de interface para os materiais que compõem o SBM.

A massa específica ( $\rho$ ), velocidade da onda elástica ( $C_0$ ) e a constante da equação de estado ( $S$ ) de cada material são os parâmetros necessários para os cálculos propostos pelo casamento de impedância, esses valores estão relacionados na TAB. 4.8.

**TAB. 4.8** Parâmetros utilizados nos cálculos do casamento de impedâncias.

Material	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$C_0$ (km/s)	$S$	Referência
Chumbo	11,3	2,066	1,517	MEYERS, 1994
Aramida	1,44	1,180	2,420	MEYERS, 1994
Alumínio	2,70	5,328	1,338	MEYERS, 1994
Alumina	3,89	7,455	1,299	KLEISER <i>et al.</i> , 2011

Uma vez que não foi possível obter os parâmetros  $C_0$  e  $S$  para os compósitos de poliéster-sisal, optou-se por substituir a velocidade da onda de choque ( $U_S$ ) pela velocidade da onda elástica ( $C_0$ ), obtida através da EQ. 2.3. Para calcular o módulo de elasticidade dos compósitos ( $E_{CP}$ ) foi utilizada a regra das misturas (EQ. 4.1), que considera os dois componentes desse material (poliéster e sisal).

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

Onde:  $E_m$  e  $E_f$  correspondem aos módulos de elasticidade da matriz (poliéster) e do reforço (sisal), respectivamente, e  $V_m$  e  $V_f$  são suas frações volumétricas.

A regra das misturas também foi útil para o cálculo da massa específica dos compósitos ( $\rho_{CP}$ ) através da EQ. 4.2:

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

Onde:  $\rho_m$  e  $\rho_f$  são as massas específicas da matriz e do reforço, respectivamente, e  $V_m$  e  $V_f$  suas frações volumétricas.

Segundo Monteiro e coautores (2011), as fibras de sisal possuem uma faixa de massa específica que varia de 1,26 a 1,50 g/cm<sup>3</sup> e um módulo de elasticidade entre 9 e 28 GPa. Dessa forma, optou-se por considerar ambos os valores, de máximo e mínimo, nos cálculos para obter  $C_0$ . O mesmo procedimento foi adotado para a matriz de poliéster, que segundo Callister e Rethwisch (2012) possui massa específica entre 1,04 e 1,46 g/cm<sup>3</sup> e módulo de elasticidade entre 2,06 e 4,41 GPa. Os valores podem ser visualizados na TAB. 4.9.

**TAB. 4.9** Valores máximos e mínimos de massa específica, módulo de elasticidade e velocidade da onda elástica dos materiais da camada intermediária do sistema de blindagem.

<b>Material</b>	$\rho_{min}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{max}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$E_{min}$ (GPa)	$E_{max}$ (GPa)	$C_{0 min}$ (km/s)	$C_{0 max}$ (km/s)	<b>Referência</b>
Sisal	1,26	1,50	9,00	28,00	-	-	MONTEIRO <i>et al.</i> , 2011
Poliéster	1,04	1,46	2,06	4,41	-	-	CALLISTER e RETHWISCH, 2012
Poliéster-30%Sisal	1,11	1,47	4,14	11,49	1,68	3,22	Calculado, PT <sup>1</sup>
Poliéster-20%Sisal	1,08	1,47	3,45	9,13	1,53	2,91	Calculado, PT <sup>1</sup>
Poliéster-10%Sisal	1,06	1,46	2,75	6,77	1,37	2,53	Calculado, PT <sup>1</sup>

<sup>1</sup>PT: Presente Trabalho.

Para a velocidade de impacto do projétil no alvo foi considerado o valor de 847 m/s, obtido na norma NIJ 0101.06 (2008) e já utilizado em estudo anterior (BRAGA, 2015). A TAB. 4.10 relaciona os seguintes resultados obtidos através do método de casamento de impedâncias: velocidade de partícula ( $U_p$ ), pressões nas interfaces entre as camadas ( $P$ ), velocidades das ondas de choque ( $U_s$ ), impedâncias de choque dos materiais que sucedem a interface ( $Z$ ) e se a tensão da onda refletida é de tração ou compressão.

**TAB. 4.10** Resultados obtidos através do casamento de impedâncias.

Interface		$U_p$ (km/s)	$P$ (GPa)	$U_s$ (km/s)	$Z$ ( $10^6$ kg/m <sup>2</sup> .s)	Tensão Propagada
Pb / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,42	13,08	8,00	31,12	Compressiva
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Poliéster 30% Sisal	Mín.	0,76	1,91	1,68	2,47	Trativa
	Máx.	0,75	2,68	3,22	3,57	
Poliéster 30% Sisal / Al	Mín.	0,22	3,29	5,62	15,17	Compressiva
	Máx.	0,28	4,35	5,71	15,41	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Poliéster 20% Sisal	Mín.	0,78	1,76	1,53	2,25	Trativa
	Máx.	0,76	2,39	2,91	3,14	
Poliéster 20% Sisal / Al	Mín.	0,20	3,06	5,60	15,12	Compressiva
	Máx.	0,26	3,96	5,67	15,32	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Poliéster 10% Sisal	Mín.	0,8	1,57	1,37	2,00	Trativa
	Máx.	0,77	2,07	2,53	2,68	
Poliéster 10% Sisal / Al	Mín.	0,18	2,78	5,57	15,05	Compressiva
	Máx.	0,23	3,51	5,64	15,22	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Laminado de aramida		0,73	3,13	2,96	4,26	Trativa
Laminado de aramida / Al		0,38	5,99	5,84	15,76	Compressiva

O rompimento da primeira camada de cerâmica durante o impacto balístico ocorre devido à parcela da onda que é refletida durante a interação da mesma com a interface que antecede a segunda camada. Ela retorna propagando uma tensão de tração responsável por estilhaçar o material. Esse fenômeno é devido a impedância da primeira camada ( $31,12 \times 10^6$  kg/m<sup>2</sup>.s) ser maior do que a da segunda, independentemente do material utilizado (compósito ou laminado de aramida).

A camada intermediária possui grande importância no SBM, uma vez que a escolha de um material que seja adequado para cumprir tal função pode reduzir consideravelmente o trauma causado no usuário da blindagem. Quanto maior a impedância de choque da segunda camada, maior será a parcela de onda de compressão que percorre a blindagem, configurando uma situação indesejável.

A TAB. 4.10 permite comparar a impedância de choque dos diferentes materiais utilizados como camada intermediária dos SBMs. O laminado de aramida

apresentou o maior valor ( $4,26 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ), seguido dos compósitos reforçados com 30% de sisal ( $2,47 - 3,57 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ), 20% de sisal ( $2,25 - 3,14 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) e 10% de sisal ( $2,00 - 2,68 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ). Essa proximidade nos valores traduz a pequena diferença entre a capacidade desses materiais refletirem ondas trativas para a camada de cerâmica, e isso explica os resultados próximos obtidos no ensaio de indentação na plastilina.

#### 4.6 CUSTOS RELATIVOS AOS SISTEMAS DE BLINDAGEM MULTICAMADA

Além de atender às exigências normatizadas, apresentar leveza e bom desempenho com relação à proteção balística, um SBM deve ser viável economicamente. A utilização de compósitos a base de poliéster e sisal contribui nesse quesito, visto que esse material é relativamente barato, principalmente quando comparado com materiais sintéticos, como aramida.

Através de dados disponíveis na literatura, foi possível estimar o custo de cada componente dos SBMs testados neste trabalho. Para fins comparativos, também foi estimado o custo de um SBM equivalente, contendo laminado de aramida como camada intermediária. Estão relacionados na TAB. 4.11: volume, massa específica, peso, custo unitário e total de cada componente da blindagem. Foi considerado que as 3 camadas do sistema possuem área de  $180 \text{ cm}^2$ , uma vez que as camadas de compósito e alumínio de cada amostra possuem dimensões de aproximadamente  $12 \times 15 \text{ cm}$ . Para o cálculo das massas específicas dos compósitos foi aplicada a regra das misturas (EQ. 4.2), sendo que as massas específicas consideradas para o poliéster e sisal foram  $1,10$  e  $1,26 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente, pois foram os valores utilizados nos cálculos para a fabricação das amostras. Os custos unitários dos materiais foram obtidos na literatura (ASM, 2015; CONAB, 2012; MONTEIRO *et al.*, 2015) e através dos fornecedores.

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

Componente	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Peso (kgf)	Custo unitário (US\$/kg)	Custo total (US\$)	Referência
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	180	3,89	0,700	33,00	23,11	MONTEIRO <i>et al.</i> , 2015
Laminado de aramida	180	1,44	0,259	63,60	16,49	MONTEIRO <i>et al.</i> , 2015
Poliéster - 30% Sisal	180	1,15	0,207	1,48 <sup>1</sup>	0,31	
Poliéster - 20% Sisal	180	1,13	0,203	1,66 <sup>1</sup>	0,34	CONAB, 2012; MONTEIRO <i>et al.</i> , 2015
Poliéster - 10% Sisal	180	1,12	0,202	1,83 <sup>1</sup>	0,37	
Alumínio 5052	90	2,68	0,241	9,73 <sup>2</sup>	2,34	ASM, 2015

<sup>1</sup>Custo do poliéster: US\$ 2.00/kg (fornecedor); Custo do sisal: US\$ 0,28/kg (CONAB, 2012);

<sup>2</sup>Custo obtido através do fornecedor.

O peso e o custo total dos SBMs com compósitos de poliéster-sisal e laminado de aramida podem ser visualizados na TAB. 4.12. Os compósitos de poliéster-sisal são consideravelmente mais baratos que o laminado de aramida, sendo que a redução de custo pode chegar a 38,58%.

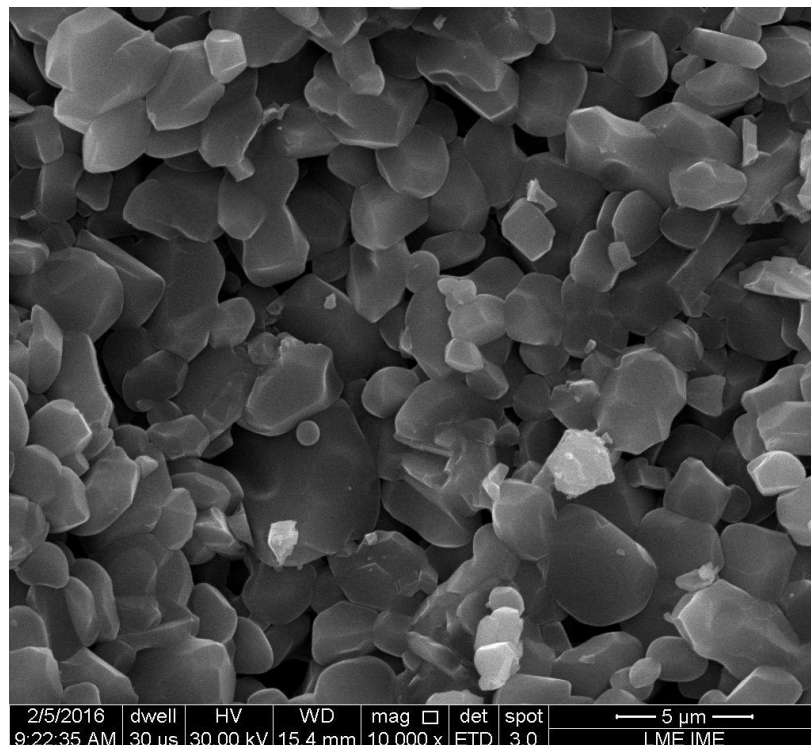
**TAB. 4.12** Peso e custo total das blindagens multicamada.

Camada intermediária do SBM	Peso total (kgf)	Custo total (US\$)
Poliéster - 30% Sisal	1,15	25,76
Poliéster - 20% Sisal	1,14	25,79
Poliéster - 10% Sisal	1,14	25,82
Laminado de aramida	1,20	41,94

#### 4.7 ANÁLISE DAS MICROGRAFIAS OBTIDAS EM MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV)

Após os ensaios balísticos foram recolhidos alguns fragmentos, que foram recobertos com platina, proporcionando um revestimento condutor de elétrons, e analisados em MEV.

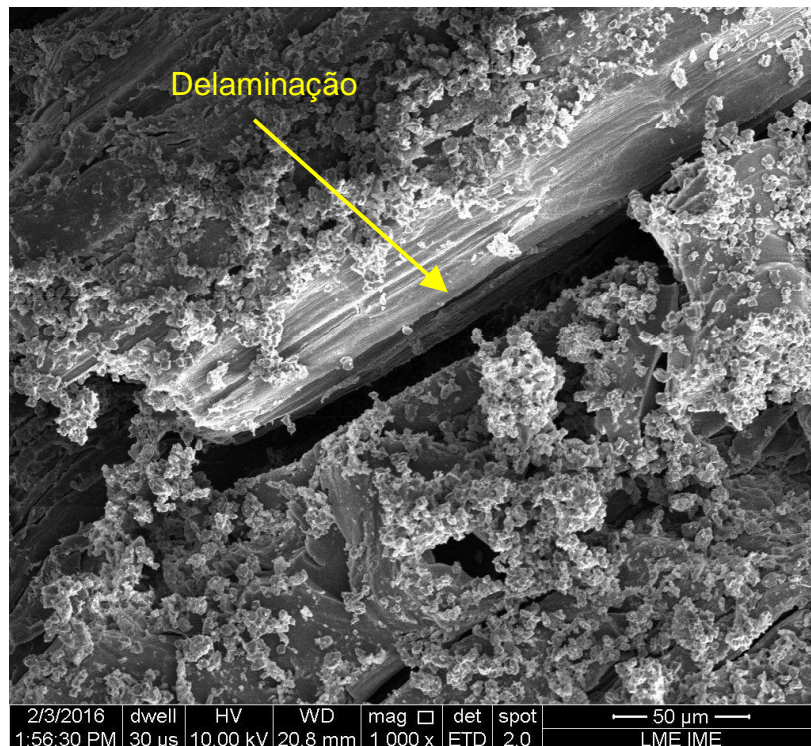
A fratura frágil da primeira camada de cerâmica é responsável pela maior parte da energia dissipada (MEDVEDOVSKI, 2010). A FIG. 4.17 corresponde à superfície de fratura de um fragmento de  $Al_2O_3$ . A propagação de fissuras está associada a uma fratura predominantemente intergranular, ou seja, entre os contornos de grão, como já foi observado em estudos anteriores (GOMES, 2004; TRINDADE, 2012). Isso é resultado da adição de 4% de  $Nb_2O_5$  na  $Al_2O_3$ , que gera precipitados capazes de fragilizar a região entre os grãos (GOMES, 2014).



**FIG. 4.17** Micrografia eletrônica da superfície de fratura de um fragmento cerâmico (10000x).

Na FIG. 4.18 é possível verificar a delaminação no compósito de poliéster reforçado com 20% de fibras de sisal. Ela consiste na separação das fases do

material, e é um dos principais mecanismos de fratura atuantes durante o impacto balístico em compósitos reforçados com fibras unidirecionais.

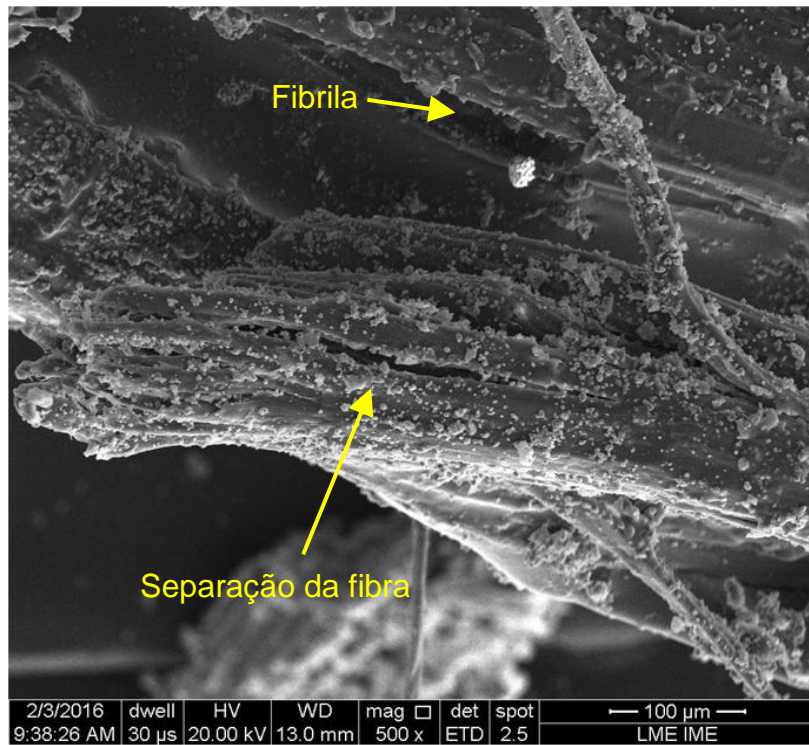


**FIG. 4.18** Micrografia eletrônica da delaminação entre fibra de sisal e matriz de poliéster (1000x).

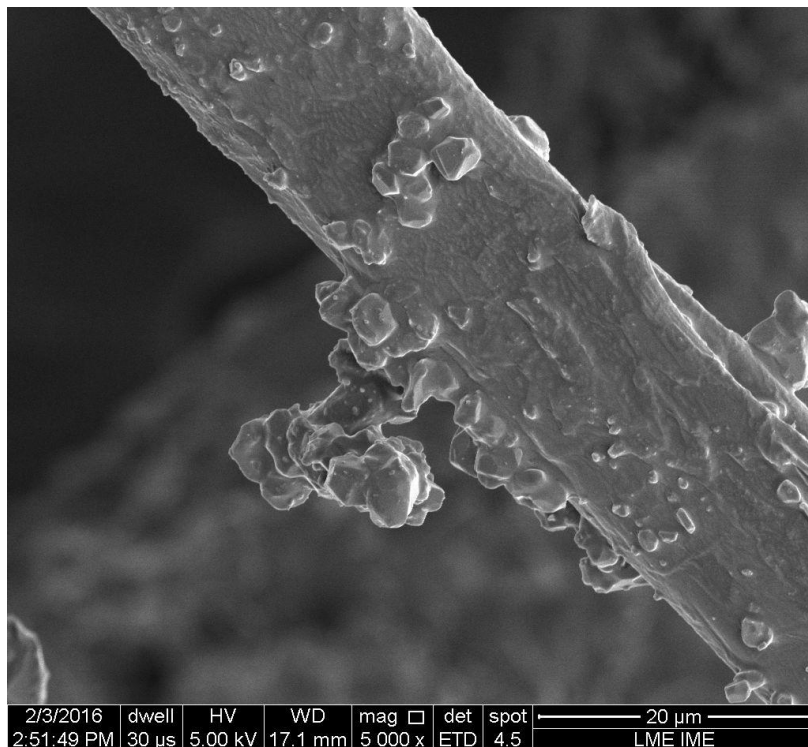
A delaminação é um conceito que se aplica a materiais compósitos, e uma vez que as FNLs podem ser consideradas compósitos, onde microfibrilas de celulose ficam impregnadas em uma matriz constituída de lignina e hemicelulose (JOHN e THOMAS, 2008), esse fenômeno pode ser visualizado na FIG. 4.19. Nessa figura, que corresponde a um compósito de poliéster reforçado com 20% de tecido de sisal, está ilustrada a separação das fibras em fibrilas mais finas, contribuindo para a absorção de energia cinética (MONTEIRO *et al.*, 2011).

A FIG. 4.20 corresponde a um compósito reforçado com 30% de fibras de sisal, ela mostra com detalhes partículas firmemente ligadas a uma fibrila, causando inclusive um empilhamento. Esse fenômeno confirma a importância do compósito de poliéster-sisal em um SBM, no que diz respeito à retenção de fragmentos. De acordo com Monteiro e coautores (2014), a retenção ocorre por incrustação mecânica através de forças de Van der Waals e/ou eletrostáticas.





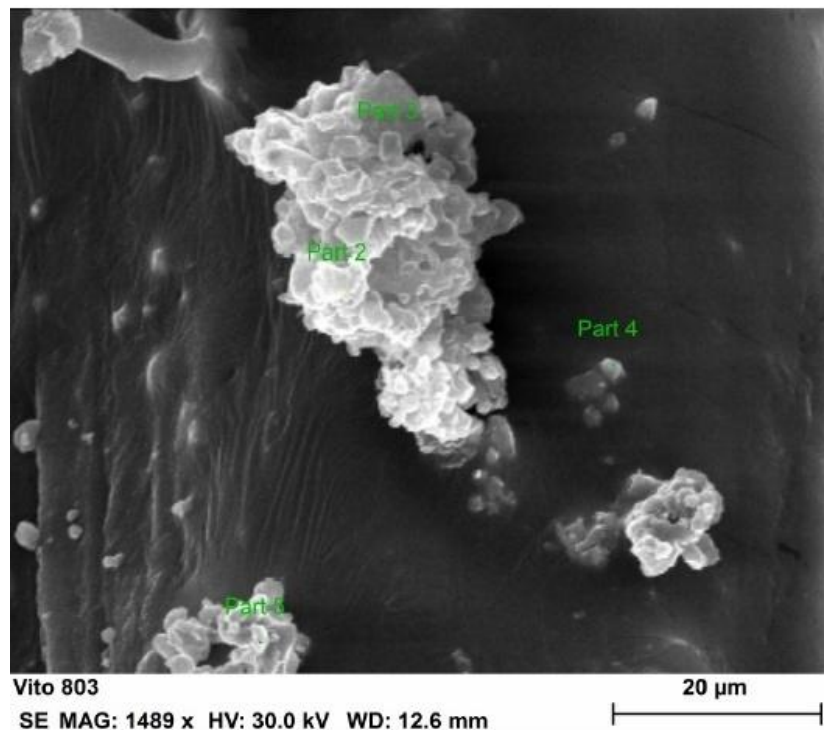
**FIG. 4.19** Micrografia eletrônica da delaminação das fibras de sisal em fibrilas mais finas (1000x).



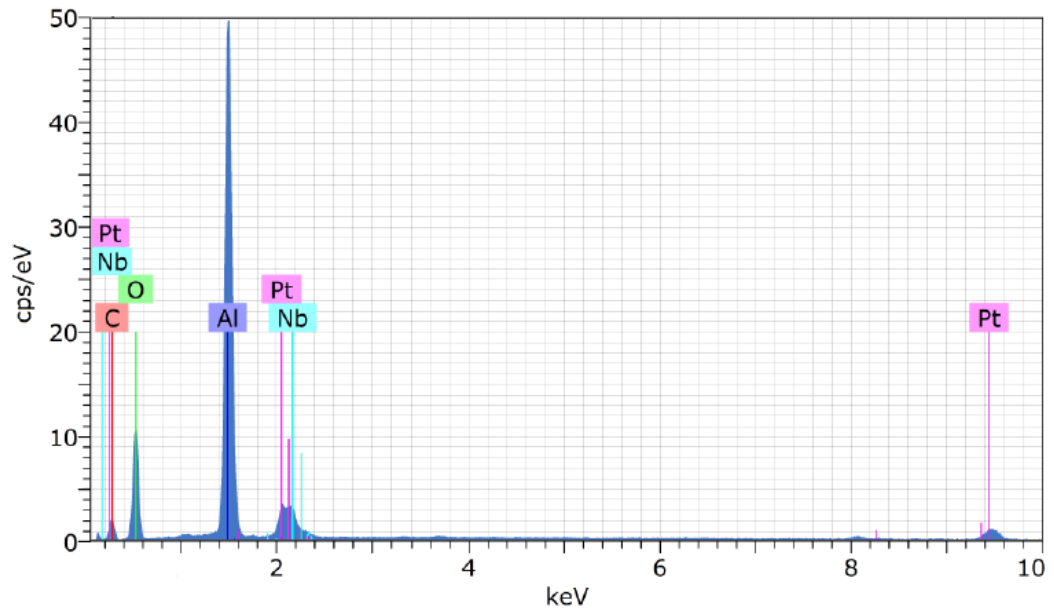
**FIG. 4.20** Micrografia eletrônica da retenção de fragmentos pela fibrila de sisal (5000x).

Para caracterizar quimicamente as várias partículas brancas (FIG. 4.21) retidas no compósito de poliéster-sisal, foi realizada a técnica de espectroscopia por dispersão de energia (EDS). Através do espectro da FIG. 4.22 é possível inferir que as partículas se tratam de fragmentos cerâmicos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , pois os picos identificaram a presença de alumínio (Al) e oxigênio (O). Os picos referentes ao nióbio (Ni) estão relacionados com a presença de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  na composição da cerâmica, já os picos referentes ao carbono (C) e à platina (Pb) condizem com a matriz polimérica do compósito e o recobrimento condutor de elétrons.

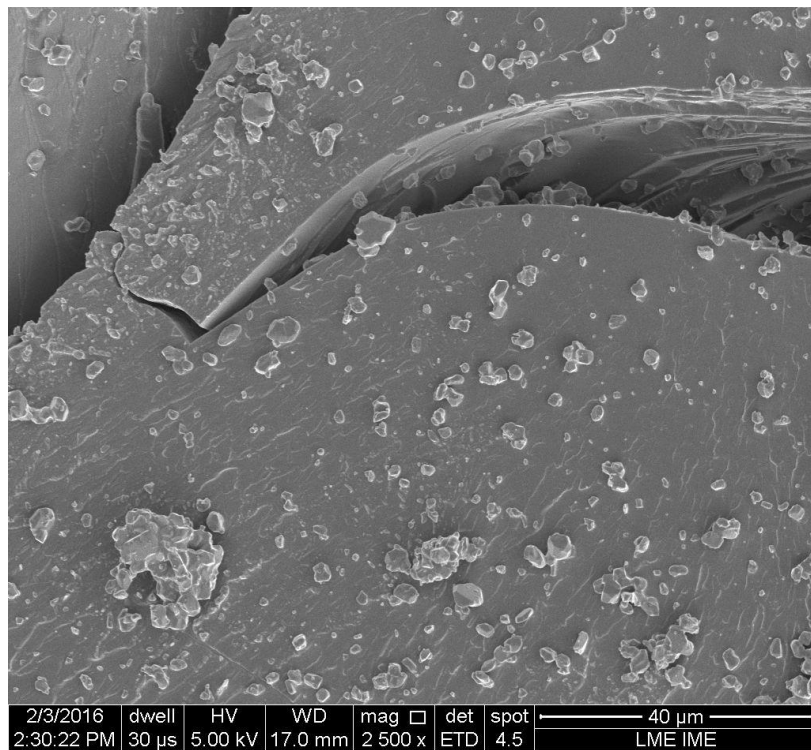
Outro mecanismo responsável por absorver energia cinética é a fratura da matriz de poliéster, que pode ser observada nas FIG. 4.23 e FIG. 4.24, correspondentes ao compósito de poliéster reforçado com 10% de tecido de sisal. Nessas figuras, fica evidente a propagação de fissuras semelhantes a "marcas de rio", típicas de polímeros frágeis (DA LUZ *et al.*, 2015), além da retenção de fragmentos pela própria matriz.



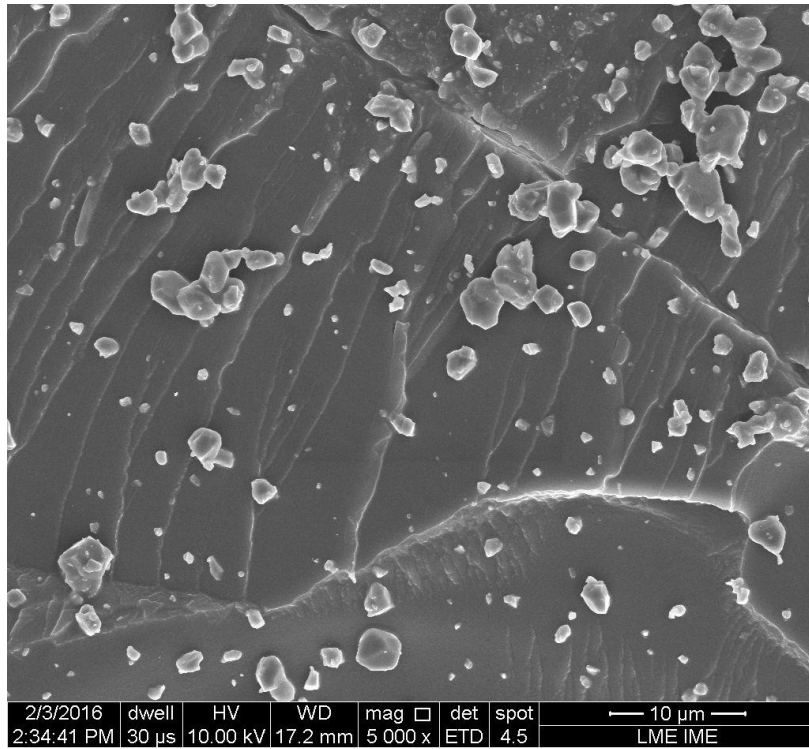
**FIG. 4.21** Micrografia eletrônica da retenção de fragmentos pelo compósito poliéster-sisal.



**FIG. 4.22** Espectro de EDS de um dos fragmentos retidos pelo compósito poliéster-sisal.



**FIG. 4.23** Micrografia eletrônica da fratura frágil da matriz de poliéster (2500x).



**FIG. 4.24** Micrografia eletrônica da fratura frágil da matriz de poliéster (5000x).

## 5 CONCLUSÕES

1. Os SBMs avaliados no presente trabalho são considerados eficientes contra munições de calibre 7,62 mm, com relação ao critério citado pela norma NIJ 0101.06 (2008), ou seja, as indentações provocadas na plastilina após o impacto balístico não excederam o máximo permitido pela norma.
2. Os SBMs avaliados neste trabalho se mostraram igualmente eficientes, pois os valores de indentação na plastilina foram próximos. Com base nisso, pressupõe-se que as fibras foram distribuídas de forma igualmente uniforme às camadas de tecido no interior da matriz polimérica, e que a porcentagem de FNLs pode não ter influenciado de forma significativa nesse quesito, resultando em um mesmo grau de coesão e resistência balística dos compósitos.
3. Os compósitos testados individualmente neste trabalho, contra munições de calibre 7,62 mm, apresentaram eficiência balística semelhante, visto que os valores de velocidade limite desses materiais foram próximos. Considerando compósitos estudados por outros autores, o compósito de poliéster reforçado com 10% de fibras de curauá foi o que apresentou a maior média de velocidade limite ( $V_L = 218$  m/s) (BRAGA, 2015). Provavelmente as boas propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e resistência a tração) da fibra de curauá influenciaram de forma positiva para esse resultado.
4. Os materiais testados como camada intermediária nos SBMs apresentaram valores de impedância de choque que variaram de  $4,26 \times 10^6$  kg/m<sup>2</sup>.s (laminado de aramida) até  $2,00 - 3,57 \times 10^6$  kg/m<sup>2</sup>.s (compósitos de poliéster-sisal). Essa pequena diferença explica a proximidade nos resultados obtidos no ensaio de indentação na plastilina, uma vez que esses materiais possuem capacidades semelhantes de refletirem ondas de choque, geradas no impacto.
5. SBMs que contém como camada intermediária compósitos de poliéster-sisal são significativamente mais baratos do que aqueles que contém laminado de aramida, sendo que a redução de custo pode superar 38%.
6. As micrografias obtidas por meio de MEV possibilitaram identificar mecanismos que contribuem para a absorção de energia cinética após o impacto balístico, tais

como: contenção de fragmentos pela camada intermediária, delaminação do compósito e das camadas das fibras, e fratura frágil da matriz polimérica.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar SBMs contendo compósitos de poliéster reforçado com outras porcentagens de sisal, acima das estudadas neste trabalho, como por exemplo: 40, 50 e 60% vol.
- Avaliar SBMs contendo compósitos de poliéster reforçado com fibras de sisal dispostas de forma bidirecional, e comparar com o modo unidirecional analisado no presente trabalho.
- Avaliar SBMs contendo compósitos de poliéster-sisal fazendo uso de uma primeira camada de cerâmica convexa ou côncavo-convexa.
- Desenvolver um protótipo de colete de proteção balística com SBM contendo compósito de poliéster-sisal.
- Avaliar SBMs contendo compósitos de poliéster-sisal com diferentes espessuras, e identificar a espessura mínima para a qual o sistema ainda é eficiente com relação ao critério descrito pela norma NIJ-0101.06 (2008).
- Avaliar SBMs contendo compósitos híbridos, com sisal associado a outro tipo de FNL, como por exemplo: piaçava, curauá, cana-de-açúcar ou juta.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 15000. Blindagens para impactos balísticos - classificação e critérios de avaliação, 2005.

ASM Aerospace Specification Metals Inc. Aluminum 5052 H34. Disponível em: <<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA5052H34>>. Acesso em: 17 dez. 2015.

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

BLEDZKI, A. K.; SPERBER, V. E.; FARUK, O. Natural and Wood Fibre Reinforcement in Polymers. **Rapra Technology Ltd, Shrewsbury, UK**, 2002.

BRAGA, F. O. **Comportamento Balístico de uma Blindagem Multicamada Utilizando Compósito Poliéster-Curauá como Camada Intermediária**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2015.

BRASIL, **Presidência da República Federativa**. Decreto n. 3.665, de 20.11.2000 - Dá nova redação ao Regulamento para a Fiscalização de Produtos Controlados (R-105). Conteúdo Jurídico, Brasília-DF: 06 set. 2008. Disponível em: <<http://www.conteudojuridico.com.br/?artigos&ver=712.33378&seo=1>>. Acesso em: 03 out. 2015.

BRYDSON, J.A. **Plastics Materials**. 7a ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. 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**, p. 63-77, 2012.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 8ª ed. Danvers: John Wiley & Sons, 2012.



- CARDOSO, A. L. V. **Caracterização dinâmica por impacto de cerâmicos à base de alumina**. Tese de Doutorado do curso de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2005.
- CARVALHO, L. H.; CAVALCANTI, W. S. Propriedades Mecânicas de Tração de Compósitos Poliéster/Tecidos Híbridos Sisal/Vidro. **Polímeros**, Vol. 16, p. 33-37, 2006.
- 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.
- CHAND, N.; FAHIM, M. Tribology of Natural Fiber Polymer Composites. **Woodhead Publishing**, Cambridge, UK, 2008.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 18 dez. 2015.
- CROCKER, J. Natural materials innovative natural composites. **Mater Technol.**, Vol. 23, p. 174–178, 2008.
- DA CRUZ, R. B. **Avaliação do Comportamento Balístico de Blindagem Multicamadas com Compósitos de Epóxi Reforçados com Fibras de Bambu**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2015.
- DA CRUZ, R. B.; JÚNIOR, E. P. L.; MONTEIRO, S. N.; LOURO, L. H. L. Giant Bamboo Fiber Reinforced Epoxy Composite in Multilayered Ballistic Armor. **Materials Research**, Vol. 18, p. 70-75, 2015.
- DA LUZ, F. S. **Avaliação do Comportamento Balístico de Blindagem Multicamada com Compósito de Epóxi Reforçado com Fibra de Juta**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2014.
- DA LUZ, F. S.; JUNIOR, E. P. L.; LOURO, L. H. L.; MONTEIRO, S. N. Ballistic Test of Multilayered Armor with Intermediate Epoxy Composite Reinforced with Jute Fabric. **Materials Research**, Vol. 18, p. 170-177, 2015 .

- DA SILVA, M. V.; STAINER, D.; AL-QURESHI, H. A.; HOTZA, D. Blindagens Cerâmicas para Aplicações Balísticas: Uma Revisão. **Cerâmica**, Vol. 60, p. 323-331, 2014.
- DA SILVA, L. C. **Comportamento Balístico de Compósitos Epóxi-Fibra Natural em Blindagem Multicamada**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2014.
- DE ARAÚJO, B. M. **Avaliação do Comportamento Balístico de Blindagem Multicamada com Compósito de Epóxi Reforçado com Fibra de Sisal**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2015.
- DE MIRANDA, L. I. **Balística Forense—do Criminalista ao Legista**. Editora Rubio, 2014.
- DE MOURA, M.F.S.F.; MORAIS, A.B.; MAGALHÃES, A.G. **Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico**. 2ª ed. Porto: Publindústria Edições Técnicas. 2011.
- EICHHORN, S. J.; BAILLIE, C. A.; ZAFEIROPOULOS, N.; MWAIKAMBO, L. Y.; ANSELL, M. P.; DUFRESNE, A. Review: current international research into cellulosic fibres and composites. **Journal of materials Science**, Vol. 36, p. 2107-2131, 2001.
- FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H. SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. **Progress in Polymer Science**, Vol. 37, p. 1552-1596, 2012.
- FARUK, P.; BLEDZKI, A.K.; FINK, H.; SAIN, M. Progress Report on Natural Fiber Reinforced Composites. **Macromolecular Materials Engineering**, Vol. 299, n.1, p. 9-26, 2014.
- FRANCK, R. **Bast and Other Plant Fibres**. CRC Press LLC, Boca Raton, USA, 2005.
- GOMES, A. V. **Comportamento Balístico da Alumina com Adição de Nióbia e Variação da Geometria do Alvo**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2004.

- GOPINATH, G.; ZHENG, J. Q.; BATRA, R.C. Effect of Matrix on Ballistic Performance of Soft Body Armor. **Composite Structures**, Vol. 94, p. 2690-2696, 2012.
- 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**, Vol. 64, p. 455–466, 2004.
- JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and Biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, Vol. 71, p. 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**, Vol. 32, n. 10, p. 1243-1250, 1996.
- JUNIOR, W. F. A.; SANTOS, M. A.; BASTIAN, F. L.; SUAREZ, J. C. M.; CARDOSO, A. L.; CHAVES, G. Q. Comportamento sob impacto balístico de um sistema compósito para blindagem. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Vol. 1, p. 12-18, 2006.
- KALIA, S.; KAITH, B. S.; KAUR, I. **Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites**. 1<sup>a</sup> ed. New York: Springer, 2011.
- KLEISER, G.J.; CHHABILDAS, L.C.; REINHART, W.D. Comparison of Dynamic Compression Behavior of Single Crystal Sapphire to Polycrystalline Alumina. **International Journal of Impact Engineering**, Vol. 38, p. 473-479. 2011.
- KU, H.; WANG, H.; PATTARACHAYAKOOP, N.; TRADA, M. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. **Composites Part B: Engineering**, Vol. 42, p. 856-873, 2011.
- LI, Y.; MAI, Y. W.; YE, L. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. **Composites science and technology**, Vol. 60, n. 11, p. 2037-2055, 2000.
- LOPES, M. A.; GONÇALVES, D. P.; DE MELO, F. C. Resistência balística de compósitos poliméricos laminados. In: Congresso Brasileiro de Polímeros, 9., 2007.

- LOURO, L. H. L.; GOMES, A. V.; COSTA, C. R. C. Dynamic fragmentation of alumina with additions of nióbia and silica under impact. *In: the Proceedings of the 19th International Symposium of Ballistics, Interlaken, Switzerland, 2001.*
- LOURO, L. H. L.; MEYERS, M. A. Effect of stress state and microstructural parameters on impact damage of alumina-based ceramics. **Journal of materials science**, Vol. 24, n. 7, p. 2516-2532, 1989.
- MARK, J. E. **Physical properties of polymers handbook**. 2<sup>a</sup> ed. New York: Springer, 2007.
- MARTIN, A. R.; MARTINS, M. A.; MATTOSO, L. H. C.; SILVA, O. R. R. F. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave sisalana. **Polímeros**, Vol. 19, n. 1, p. 40-46, 2009.
- MATTOSO, L. H. C.; PEREIRA, N., DE SOUZA, M. L.; AGNELLI, J. A. M. Utilização de fibras vegetais para reforço de plástico. **EMBRAPA-CNPDIA**, Vol. 3, p. 1-4, 1996.
- MEDVEDOVSKI, E. Ballistic Performance of Armour Ceramics: Influence of Design and Structure. Part 1. **Ceramics International**, Vol. 36, p. 2103-2115, 2010.
- MEYERS, M. A. **Dynamic behavior of materials**. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- MILANEZI, T. L. **Comportamento Balístico da Fibra de Rami em Blindagem Multicamadas**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2015
- MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. **Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites**. Taylor and Francis, New York, 2005.
- MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. Sustainable bio-composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials world. **Journal of Polymers and the Environment**, Vol. 10, p. 19-26, 2002.
- MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. Biofibres, Biodegradable Polymers and Bio-composites: An Overview. **Macromolecular Materials and Engineering**, Vol. 276/277, p. 1-24, 2000.

- MONTEIRO, S. N.; LOPES, F. P. D.; BARBOSA, A. P. B.; BEVITORI, A. B.; DA SILVA, I. L. A.; DA COSTA, L. L. Natural Lignocelulosic Fibers as Engineering Materials – An Overview. **Metallurgical and Materials Transactions A**, Vol. 42A, p. 2963-2974, 2011.
- MONTEIRO, S. N.; LIMA JR., E. P.; LOURO, L. H. L.; SILVA, L. C.; DRELICH, J. W. Unlocking function of aramid fibers in multilayered ballistic armor. **Metallurgical and Materials Transactions A**, 2014.
- MONTEIRO, S.N.; LOPES, F.P.D.; FERREIRA, A.S.; NASCIMENTO, D.C.O. Natural Fiber Polymer Matrix Composites: Cheaper, Tougher and Environmentally Friendly. **JOM**, Vol. 61, p. 17-22. 2009.
- 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. S.; PINHEIRO, W. A.; SILVA, L. C.; LIMA JR., E. P. Natural Curaua Fiber-Reinforced Composite in Multilayered Ballistic Armor. **Metallurgical and Materials Transactions A**, Vol. 46, p. 4567-4577, 2015.
- MORYE, S. S.; HINE, P. J.; DUCKETT, R. A.; CARR, D. J.; WARD, I. M. Modelling of the Energy Absorption by Polymer Composites Upon Ballistic Impact. **Composites Science and Technology**, Vol. 60, p. 2631-2642. 2000.
- MUKHERJEE, P. S.; SATYANARAYANA, K. G. Structure and properties of some vegetable fibres. **Journal of materials science**, Vol. 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, p. 351-363, 1999.
- NAIK, N.K.; SHRIRAO, P. Composite structures under ballistic impact. **Composite Structures**, Vol. 66. p. 579-590. 2004.
- NETRAVALI, A. N.; CHABBA, S. Composites get greener. **Materials today**, Vol. 6, p. 22-29, 2003.
- NIJ Standards-0101.06. Ballistic Resistance of Body Armor.U.S.Department of Justice/Office of Justice Programs - National Institute of Justice, 2008.

- 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. **Revista da Estatística da Universidade Federal de Ouro Preto**, Vol. 3. p. 169-173, 2014.
- RATNA, D. **Handbook of Thermoset Resins**. 1<sup>a</sup> ed. Shawbury: Smithers Rapra, 2009.
- RAUSAND, M.; HOYLAND, A. **System reliability theory: models, statistical methods, and applications**. John Wiley & Sons, 2004.
- ROHEN, L. A.; MARGEM, F. M.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F.; DE ARAUJO, B. M.; LIMA, E. S. Ballistic Efficiency of an Individual Epoxy Composite Reinforced with Sisal Fibers in Multilayered Armor. **Materials Research**, Vol. 18, p. 55-62, 2015 .
- SALKIND, M. Introduction. **Interfaces in Composites**. American Society for Testing and Materials (ASTM). 1969.
- SANCHEZ, Elisabete M. S.; CAVANI, Claudia S.; LEAL, Claudinete V.; SANCHEZ, Caio G. Compósito de resina de poliéster insaturado com bagaço de cana-de-açúcar: influência do tratamento das fibras nas propriedades. **Polímeros**, Vol. 20, n. 3, p. 194-200, 2010.
- SATYANARAYANA, K. G.; ARIZAGA, G. C.; WYPYCH, F. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers - An overview. **Progress in Polymer Science**, Vol. 34, p. 982-1021, 2009.
- SERJOU EI, A.; CHI, R.; ZHANG, Z.; SRIDHAR, I. Experimental Validation of BLV Model on Bi-Layer Ceramic-Metal Armor. **International Journal of Impact Engineering**, Vol. 77, p. 30-41. 2015.
- SHAH, D. U. Developing plant fibre composites for structural applications by optimising composite parameters: a critical review. **Journal of Materials Science**, Vol. 48, p. 6083-6107, 2013.
- SHOKRIEH, M. M.; JAVADPOUR, G. H. Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor. **Composite Structures**, Vol. 82, p. 269-276, 2008.

SUMMERSCALES, J.; DISSANAYAKE, N.; VIRK, A. S.; HALL, W. A review of bast fibres and their composites. Part 1–Fibres as reinforcements. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Vol. 41, p. 1329-1335, 2010a.

SUMMERSCALES, J.; DISSANAYAKE, N.; VIRK, A. S.; HALL, W. A review of bast fibres and their composites. Part 2–Composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Vol. 41, p. 1336-1344, 2010b.

TADMOR, Z.; GOGOS, C. G. **Principles of polymer processing**. 2<sup>a</sup> ed. John Wiley & Sons, 2006.

THAKUR, V. K.; THAKUR, M. K.; GUPTA, R. K. Review: raw natural fiber–based polymer composites. **International Journal of Polymer Analysis and Characterization**, Vol. 19, p. 256-271, 2014.

TRINDADE, W. **Influência da Geometria e da Microestrutura no Comportamento Dinâmico da Alumina Aditivada com Nióbia**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2012.

TRINDADE, W.; GOMES, A. V.; LOURO, L. H. L. Elaboração de uma Nova Rota de Eliminação de Ligante da Cerâmica De Alumina. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**. Vol. 4, p. 71-79, 2013.

WANG, L.; KANESALINGAM, S.; NAYAK, R.; PADHYE, R. Recent trends in Ballistic Protection. **Textiles and Light Industrial Science and Technology**, Vol. 3, p. 37-47, 2014.

WOOL, R.; SUN, X. S. **Bio-Based Polymers and Composites**. Elsevier Academic Press, 2005.

YADAV, S.; RAVICHANDRAN, G. Penetration resistance of laminated ceramic/polymer structures. **International Journal of Impact Engineering**, Vol. 28, n. 5, p. 557-574, 2003.

ZUKAS, J. A. **High velocity impact dynamics**. Wiley-Interscience, 1990.