

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

FOLUKE SALGADO DE ASSIS

COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE BLINDAGEM MULTICAMADAS
COM COMPÓSITOS DE POLIÉSTER REFORÇADOS COM FIBRAS
DE JUTA

Rio de Janeiro

2016

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

FOLUKE SALGADO DE ASSIS

**COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE BLINDAGEM MULTICAMADAS
COM COMPÓSITOS DE POLIÉSTER REFORÇADOS COM FIBRAS
DE JUTA**

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. Sergio Neves Monteiro – Ph.D.

Rio de Janeiro

2016

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

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

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

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

620.11	Assis, Foluke Salgado de
A848c	Comportamento balístico de blindagem multicamadas com compósitos de poliéster reforçados com fibras de juta / Foluke Salgado de Assis, orientado por Sérgio Neves Monteiro – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2016.
	114p. : il.
	Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.
	1. Curso de Ciência dos Materiais – teses e dissertações. 2. Blindagem balística. 3. Compósitos. 4. Poliéster. 5. Fibras de juta. I. Monteiro, Sergio Neves. II. Título. III. Instituto Militar de Engenharia.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

FOLUKE SALGADO DE ASSIS

**COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE BLINDAGEM MULTICAMADAS
COM COMPÓSITOS DE POLIÉSTER REFORÇADOS COM FIBRAS
DE JUTA**

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. Sergio Neves Monteiro – Ph.D. do IME

Aprovada em 20 de Maio de 2016 pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Sergio 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

Agradeço primeiramente a Deus por todas as possibilidades que me ofereceu.

Aos meus pais Francisco e Magda, aos quais devo tudo o que sou e serei. Agradeço pela educação, pelo amor incondicional, confiança e esforços desmedidos para que eu chegasse até aqui. Pai e mãe vocês são tudo na minha vida!

A minha namorada Valquíria que além de minha melhor amiga, teve a capacidade a incrível capacidade de me aguentar, me auxiliar, me apoiar por todo esse tempo.

Ao meu orientador Sergio Neves, que desde que o conheci (2012) na graduação, sempre me apoiou, me ensinou e me ofereceu todas as oportunidades possíveis para que eu chegasse até aqui.

Aos meus amigos uenfianos, os engenheiros civis Pedro Nascimento e Luísa Muylaert, que além de serem meus grandes amigos, me ajudaram de forma incondicional na realização deste trabalho.

Aos meus amigos Noan Simonassi e Artur Camposo que me acompanham desde a graduação, me apoiaram e aconselharam em momentos cruciais de minha dissertação. Aos amigos feitos na pós-graduação, pela amizade e bons momentos, aos colegas de laboratório que me ajudaram em especial ao Capitão Lúcio, Jheison e Fábio Oliveira.

Agradeço ao Capitão Édio por todo o apoio e paciência comigo durante os ensaios balísticos.

Ao SC Joel pelo apoio durante as análises no MEV.

Agradeço também a todos os professores do Instituto Militar de Engenharia pelos ensinamentos e conhecimentos passados.

A todos que diretamente ou indiretamente colaboraram com esta conquista que irá determinar boa parte da minha vida.

Agradeço do fundo do coração a todos os meus familiares e amigos, amo todos vocês e agradeço o que sou a vocês!

A CAPES pelo incentivo financeiro para o desenvolvimento desse trabalho

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	8
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	17
LISTA DE SIGLAS	20
1 INTRODUÇÃO.....	23
1.1 Justificativa do trabalho	24
1.2 Objetivo de estudo.....	25
1.2.1 Objetivo geral.....	25
1.2.2 Objetivos específicos.....	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1 Blindagem balística.....	27
2.2 Sistema de blindagem multicamada	29
2.3 Camada externa: material cerâmico	31
2.4 Camada intermediária: material compósito.....	32
2.4.1 Compósitos de matriz polimérica.....	33
2.4.1.1 Matriz poliéster.....	34
2.4.2 Fibra de aramida.....	36
2.4.3 Fibras naturais lignocelulósicas (FNL).....	37
2.4.3.1 Fibras de juta	41
2.4.4 Arranjo das fibras para proteção balística.....	47
2.5 Camada interna: material metálico	48
2.6 Comportamento dinâmico dos materiais.....	49

2.6.1	Interação e reflexão de ondas de choque.....	54
2.7	Distribuição de weibull	57
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	58
3.1	Materiais utilizados	58
3.1.1	Alumina e nióbia	58
3.1.2	Ligante	59
3.1.3	Manta e tecido de juta.....	59
3.1.4	Resina poliéster	60
3.1.5	Placa de alumínio	61
3.1.6	Cola	62
3.1.7	Plastilina	62
3.2	Fabricação das pastilhas cerâmicas.....	63
3.2.1	Obtenção do pó	63
3.2.2	Prensagem	64
3.2.3	Etapa de sinterização	66
3.3	Fabricação dos compósitos	67
3.4	Colagem das camadas	70
3.5	Ensaio balístico.....	71
3.6	Microscopia eletrônica de varredura	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	75
4.1	Ensaio de deformação na plastilina	75
4.1.1	Desempenho balístico da primeira camada: pastilha cerâmica	75
4.1.2	Desempenho balístico da camada intermediária: compósito poliéster-juta .	77
4.2	Ensaio de velocidade residual	89
4.3	Interação das ondas de choque nas blindagens multicamada	95

4.4	Análise das micrografias obtidas no mev.....	100
4.5	Custo dos materiais utilizados na blindagem multicamada.....	105
5	CONCLUSÕES.....	107
6	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	109
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 2.1	Avaliação do desempenho da blindagem por meio da medida do trauma na plastilina.	28
FIG. 2.2	Ilustração do mecanismo de absorção do impacto balístico realizado pela blindagem multicamada: (a) antes; (b) durante e (c) após o impacto balístico.	31
FIG. 2.3	Resina poliéster: Processo de cura.	35
FIG. 2.4	Estrutura química da aramida.	36
FIG. 2.5	MEV da superfície de FNLs: (a) Sisal, (b) bamboo, (c) coco e (d) piaçava.	37
FIG. 2.6	Microestrutura de uma fibra natural lignocelulósica.	38
FIG. 2.7	Estrutura química da celulose.	39
FIG. 2.8	Estrutura química da lignina.....	39
FIG. 2.9	(a) Planta de juta; (b) fibras de juta e (c) imagem microscópica da fibra de juta.	42
FIG. 2.10	Distribuição de frequência por diâmetro para fibras de juta.	43
FIG. 2.11	Variação da tensão característica com o diâmetro médio da fibra de juta para cada intervalo.	44

FIG. 2.12	Imagens obtidas do MEV: (a) Superfície da resina poliéster pura; (b) perfil da resina pura; (c) superfície do compósito de 30% e (d) perfil do compósito de 30%.	45
FIG. 2.13	Curvas TGA/DTG das fibras de juta.	46
FIG. 2.14	Diferentes arranjos de fibras em tecido.	47
FIG. 2.15	Curva tensão deformação para um material dúctil.	50
FIG. 2.16	Modelo físico da propagação de uma onda de choque: (a) Antes do choque; (b) após um tempo t_1 ; (c) após um tempo $t_2 > t_1$	51
FIG. 2.17	Sequência de eventos no impacto balístico: (a) Antes do impacto; (b) no instante do impacto; (c) após o impacto.	54
FIG. 2.18	Transmissão da onda de choque de um meio de baixa impedância para um meio de alta impedância de choque: (a) Gráfico pressão versus velocidade da partícula; (b) perfil de pressão.	55
FIG. 2.19	Transferência da onda de choque de um meio com alta impedância para um meio com baixa impedância: (a) Gráfico pressão versus velocidade de partícula; (b) perfil de pressão.	56
FIG. 3.1	Fibras de juta: (a) manta cardada; (b) tecido com trama simples.	60
FIG. 3.2	Resina poliéster e o catalisador metil-etil-cetona.	60
FIG. 3.3	Placa de alumínio utilizada como camada interna da blindagem multicamada.	61
FIG. 3.4	Cola Cura Rápida, Marca ULTRAFLEX.	62

FIG. 3.5	(a) Massa de modelar CORFIX; (b) Suporte de tiro totalmente preenchido com a plastilina.	63
FIG. 3.6	Moinho de bolas MARCONI MA500.	64
FIG. 3.7	Matriz utilizada na moldagem dos corpos cerâmicos.	65
FIG. 3.8	Prensa hidráulica semiautomática NOWAK, com capacidade para 30 toneladas.	65
FIG. 3.9	Forno INTI FE 1700, utilizado na sinterização das pastilhas cerâmicas.	66
FIG. 3.10	Matriz metálica utilizada na preparação das placas de compósito poliéster-juta.	68
FIG. 3.11	Camada de fibra de juta: (a) manta; (b) tecido.	68
FIG. 3.12	Etapas da preparação do material compósito: (a) matriz metálica, a fibra de juta, resina poliéster e catalisador; (b) as fibras dentro da matriz junto a resina poliéster ainda líquida; (c) matriz fechada; (d) prensagem da matriz metálica; (f) material compósito com a fibra de juta na configuração de manta (30% em volume); e (g) na configuração de tecido (30% em volume).	69
FIG. 3.13	Blindagem multicamada: (a) Diagrama esquemático; (b) corpo de prova final utilizado nos ensaios balísticos.	70
FIG. 3.14	Esquema do sistema utilizado para os ensaios balísticos.	71
FIG. 3.15	Radar Doppler.	72
FIG. 3.16	Munição calibre 7,62 x 51 mm.	72

FIG. 3.17	(a) Provete calibre com mira a laser; (b) alvo posicionado na plastilina.	73
FIG. 3.18	Dispositivo de fixação das placas no ensaio de velocidade residual utilizado para fixar um compósito reforçado com manta de juta.	74
FIG. 3.19	Microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta FEG 250.	74
FIG. 4.1	Sistema de blindagem multicamada após o disparo da munição de calibre 7,62x51 mm: (a) Tecido e (b) manta de juta.	75
FIG. 4.2	Imagem microscópica da cerâmica fraturada: (a) 5000X e (b) 10000X.	76
FIG. 4.3	Blindagem multicamada utilizando como camada intermediária compósito poliéster-juta: (a) Manta e (b) tecido.	77
FIG. 4.4	Blindagem multicamada com compósito poliéster-juta (10%), como camada intermediária, na configuração manta e tecido, antes e após ensaio balístico.	78
FIG. 4.5	Blindagem multicamada com compósito poliéster-juta (20%), como camada intermediária, na configuração manta e tecido, antes e após ensaio balístico.	79
FIG. 4.6	Blindagem multicamada com compósito poliéster-juta (30%), como camada intermediária, na configuração manta e tecido, antes e após ensaio balístico.	80
FIG. 4.7	Medição da profundidade de indentação causada na plastilina após o ensaio balístico.	81

FIG. 4.8	Gráficos de distribuição de Weibull para o sistema de blindagem multicamada contendo como camada intermediária o compósito poliéster-juta.	84
FIG. 4.9	Variação da indentação característica em função da fração volumétrica de fibra de juta.	86
FIG. 4.10	Variação da indentação característica em função da fração volumétrica de fibra de juta.	86
FIG. 4.11	Ensaio de velocidade residual nos compósitos poliéster-juta: (a, c) Antes e (b, d) após o impacto do projétil.	89
FIG. 4.12	Gráfico de pontos experimentais dos ensaios de velocidade residual dos compósitos poliéster-juta.	90
FIG. 4.13	Gráficos de Weibull da velocidade limite (V_L) para os compósitos poliéster-juta nas configurações manta e tecido.	93
FIG. 4.14	Gráfico do casamento de Impedâncias na blindagem multicamada com compósito poliéster-juta como camada intermediária.	97
FIG. 4.15	Micrografia por MEV: (a) Partículas Cerâmicas na superfície do compósito poliéster juta, configuração manta (200x); (b) Partículas cerâmicas na superfície das fibras de juta (2000x); (c) Propagação de trincas na superfície da fibra de juta (8000x).	101
FIG. 4.16	Micrografia por MEV: (a) Partículas cerâmicas na superfície do compósito poliéster-juta, configuração tecido (300x); (b) Fratura do compósito poliéster-juta, configuração tecido (1000x); (c, d) Partículas cerâmicas na superfície das microfibrilas de juta (3000x, 5000x).	102

FIG. 4.17	Espectro de EDS de um dos fragmentos do compósito poliéster-juta.	103
FIG. 4.18	Micrografia por MEV das fibras de juta arrancadas da matriz poliéster.	104

LISTA DE TABELAS

TAB. 2.1	Níveis de proteção balística.	27
TAB. 2.2	Propriedades da alumina.	32
TAB. 2.3	Propriedades da resina poliéster.	35
TAB. 2.4	Propriedades da fibra de aramida.	36
TAB. 2.5	Propriedades de algumas FNLs e algumas fibras sintéticas.	40
TAB. 2.6	Propriedades de tensão de compósitos de poliéster reforçados com fibras de juta.	44
TAB. 3.1	Composição química da Alumina.	58
TAB. 3.2	Composição química da Nióbia.	59
TAB. 3.3	Propriedades da resina poliéster.	61
TAB. 3.4	Propriedades mecânicas da liga de Alumínio.	61
TAB. 3.5	Composição química do Alumínio.	62
TAB. 3.6	Tipo e designação dos corpos de prova para os ensaios balísticos. .	73
TAB. 4.1	Propriedades das cerâmicas sinterizadas.	76
TAB. 4.2	Profundidade da indentação na plastilina, espessura, velocidade de impacto e energia de impacto para as blindagens multicamada com poliéster-juta(10%).	81

TAB. 4.3	Profundidade da indentação na plastilina, espessura, velocidade de impacto e energia de impacto para as blindagens multicamada com poliéster-juta(20%).	82
TAB. 4.4	Profundidade da indentação na plastilina, espessura, velocidade de impacto e energia de impacto para as blindagens multicamada com poliéster-juta(30%).	82
TAB. 4.5	Médias dos valores obtidos dos ensaios balísticos.	83
TAB. 4.6	Parâmetros de Weibull obtidos das indentações das blindagens multicamada.	83
TAB. 4.7	Médias dos valores obtidos nos ensaios balísticos.	87
TAB. 4.8	Valores das velocidades médias de impacto e residual, energia absorvida e velocidade limite para cada componente do sistema de blindagem multicamada.	91
TAB. 4.9	Parâmetros de Weibull obtidos das velocidades limite dos compósitos poliéster-juta.	94
TAB. 4.10	Valores da velocidade da onda de choque e dos parâmetros característicos de cada material.	96
TAB. 4.11	Valores da densidade, módulo de elasticidade e da onda elástica do compósito poliéster-juta.	96
TAB. 4.12	Valores da velocidade de partícula, velocidade de onda de choque e pressão nas interfaces de cada componente da blindagem multicamada e a natureza da onda de choque.	97

TAB. 4.13	Valores de densidade, velocidade de onda e impedância de choque nas interfaces da blindagem multicamada.	98
TAB. 4.14	Relação de custo dos componentes utilizados na blindagem multicamada.	105
TAB. 4.15	Comparativo de custo e peso total das blindagens multicamada.	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

CMP	-	Compósitos de Matriz Polimérica
EDS	-	Espectroscopia por Dispersão de Energia dos Elétrons
MAS	-	Multilayered Armor System
MEV	-	Microscópio Eletrônico de Varredura
FNL	-	Fibra Natural Lignocelulósica
PEG	-	Polietileno Glicol

SÍMBOLOS

S	-	Constante do material
ρ	-	Densidade do material
ρ_{cp}	-	Densidade do compósito
ρ_m	-	Densidade da matriz
ρ_f	-	Densidade da fibra
$\rho_{sinterizado}$	-	Densidade do material sinterizado
m	-	Massa
e_{verde}	-	Espessura do corpo verde
$e_{sinterizado}$	-	Espessura da amostra sinterizada

E_{abs}	-	Energia absorvida
V_m	-	Fração em volume da matriz
V_f	-	Fração em volume de fibra
V_p	-	Velocidade da onda plástica
$d\sigma/d\varepsilon$	-	Inclinação da curva tensão <i>versus</i> deformação
σ	-	Tensão
σ_e	-	Tensão limite de escoamento
σ_T	-	Tensão limite de resistência à tração
$(\Delta L/L_0)$	-	Ductilidade do material
E_f	-	Módulo de elasticidade da fibra
E_m	-	Módulo de elasticidade da matriz
E_{cp}	-	Módulo de elasticidade do compósito
E	-	Módulo de elasticidade
β	-	Módulo de Weibull
R^2	-	Coefficiente de correlação
P	-	Pressão
θ	-	Unidade característica
U_s	-	Velocidade da onda de choque
C_o	-	Velocidade da onda elástica

V_i	-	Velocidade de impacto
V_r	-	Velocidade residual
U_p	-	Velocidade de partícula
C	-	Velocidade do som no material
V_L	-	Velocidade limite
V	-	Volume específico
CPM-10%	-	Compósito poliéster com 10% de manta de juta
CPM-20%	-	Compósito poliéster com 20% de manta de juta
CPM-30%	-	Compósito poliéster com 30% de manta de juta
CPT-10%	-	Compósito poliéster com 10% de tecido de juta
CPT-20%	-	Compósito poliéster com 20% de tecido de juta
CPT-30%	-	Compósito poliéster com 30% de tecido de juta

LISTA DE SIGLAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- IME - Instituto Militar de Engenharia
- NIJ - National Institute of Justice

RESUMO

O sistema de blindagem multicamada proporciona uma proteção pessoal leve, efetiva e tem como objetivo absorver a energia cinética do projétil e impedir a penetração de fragmentos. Usualmente, esse sistema é composto de três camadas: camada frontal é um material cerâmico, camada intermediária é formada por tecido de aramida e a terceira camada é um material metálico. O material cerâmico tem como função dissipar a maior parte da energia de impacto através da deformação, erosão e fragmentação do projétil, o tecido de aramida tem como principal objetivo dissipar a energia de impacto através da absorção da energia cinética dos fragmentos gerados pelo impacto do projétil e a terceira camada tem como principal função absorver a energia residual dos fragmentos através da deformação plástica. No presente estudo utilizou-se como camada intermediária em substituição do tecido de aramida o compósito de matriz poliéster reforçados com fibras de juta, na configuração manta ou tecido, com diferentes frações volumétricas (10%, 20% e 30%). Nos ensaios balísticos foram utilizadas munições de calibre 7,62 x 51 milímetros que possuem velocidade de impacto superior a 830 m/s. O sistema de blindagem multicamada contendo como camada intermediária o compósito de matriz poliéster reforçada com fibras de juta, em todas as configurações atenderam a norma americana NIJ 0101.06 (2008) que determina que o valor de indentação menor ou igual a 44 milímetros. Micrografias obtidas no microscópio eletrônico de varredura evidenciaram ruptura frágil da matriz poliéster, interação das fibras de juta com os fragmentos da camada cerâmica, deslocamento das fibras na matriz e delaminação dos compósitos. Esses mecanismos contribuíram para dissipar a energia de impacto do projétil. Os compósitos de poliéster reforçados com fibras de juta proporcionam redução do peso do sistema de blindagem em até 4,92% e redução de custo dos materiais de blindagem em até 39,02%.

ABSTRACT

The Multilayered armor system provides a lightweight personal protection, effective and the objective is to absorb the energy of projectile and to prevent the penetration of fragments. Usually, this system is composed of three layers: the frontal layer is ceramic material, intermediate layer is aramid fabric and the third layer is a metallic material. The ceramic material is as function to dissipate the most energy of impact through of deformation, erosion and fragmentation of projectile, the principal objective of the aramid is to dissipate the energy of impact through of absorption of kinetic energy of fragments generated by impact of projectile, and the objective of the metallic material is to absorb residual energy of fragments through of plastic deformation. In this present study was used as intermediate layer in place of aramid fabric the polyester matrix composites reinforced with jute fibers in the configuration fabric or carded sliver mat, and different volumetric fraction (10%, 20% and 30%). In these ballistic tests were used ammunitions with caliber 7.62 x 51 mm which have the velocity of impact above 830 m/s. The multilayered armors systems (in both configurations) which have as intermediated layer the polyester matrix composed reinforced with jute fibers have attended the specifications of American standard NIJ 0101.06 (2008) that determines that the value of indentation depth is less or equal 44 mm. Micrographs have obtained by scanning electron show brittle fracture of polyester matrix, interaction of jute fibers with fragments of ceramic layer, the pull out of fibers of the matrix and delamination of composites. These mechanisms have contributed to dissipate the impact energy of projectile. Moreover the replacement of aramid fabric for polyester matrix composites reinforced with jute fibers provides weight reduction of the shield (4.92%) and the cost reduction (39.02%).

1 INTRODUÇÃO

Não é de hoje que o aumento da violência, no Brasil em virtude dos conflitos urbanos e ao redor do mundo com guerras e atentados terroristas, em conjunto com o crescente desenvolvimento na tecnologia de armas e munições têm desafiado os pesquisadores na área de blindagem balística a inovarem na pesquisa de novos materiais que resistam aos diversos artefatos, buscando desenvolver produtos que atendam as aplicações civis e militares (DA SILVA *et al.*, 2014; WANG *et al.*, 2014).

Os sistemas de blindagens multicamada (*MAS - Multilayered Armor System*) proporcionam uma proteção pessoal leve, efetiva e têm como objetivo não apenas absorver a energia do projétil, mas também de impedir a penetração de fragmentos. Um sistema de blindagem multicamada típico é composto por uma placa cerâmica, seguida por camadas de fibras de aramida apoiadas em uma placa de alumínio (MONTEIRO *et al.*, 2014). O material cerâmico que possui elevada resistência à compressão, elevada dureza e baixa resistência à tração tem como função dissipar a maior parte da energia de impacto através da deformação, erosão e fragmentação do projétil (MEDVEDOVSKI, 2010; DA SILVA *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2014). Na segunda camada, normalmente, são utilizados materiais sintéticos: Kevlar® (fibras de aramida) ou Dyneema® (polietileno de ultra-alto peso molecular) que possuem baixa densidade, elevada resistência à tração. Essa camada tem como principal objetivo dissipar a energia de impacto através da absorção da energia cinética dos fragmentos gerados pelo impacto do projétil. Em alguns casos, uma terceira camada pode ser adicionada no sistema de blindagem multicamada que é composta por um metal dúctil que tem a função de restringir a penetração do projétil (WANG *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2014). A provável substituição dos materiais sintéticos utilizados na segunda camada que possuem elevado custo por materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais, pode ser uma alternativa eficiente.

Estudos recentes mostram que os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais lignocelulósicas podem apresentar eficiência de proteção balística em sistemas multicamada próxima a dos tecidos de fibras sintéticas, tendo como

vantagens: menor custo e peso (ARAÚJO, 2015; DA CRUZ, 2015; DA SILVA, 2014b; BRAGA, 2015; DA LUZ, 2014).

As fibras naturais são recursos alternativos, disponíveis em grande escala e possuem vantagens em relação às fibras sintéticas, tais como: biodegradabilidade, baixa densidade, natureza não tóxica, menor abrasividade nos equipamentos que confeccionam os materiais, propriedades mecânicas aceitáveis e de baixo custo. Com essas características, tornam-se interessantes estudos e aplicações dessas fibras como materiais de engenharia (SATYANARAYANA *et al.*, 2007; MONTEIRO *et al.*, 2011).

O Brasil desempenha um papel fundamental e tem grande potencial para se tornar líder na produção de compósitos reforçados por fibras naturais. É o quinto maior país em extensão territorial, com seus 8,5 milhões de km², sendo 17,9% deste território de área agricultável, o que equivale a 152,5 milhões de hectares (BRASIL, 2004).

Portanto, o sistema de blindagem multicamada contendo como camada intermediária os compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas tem por objetivo aperfeiçoar a proteção individual, usando materiais mais leves e de baixo custo, além de contribuir com o desenvolvimento sustentável.

Neste trabalho, pretende-se avaliar o desempenho balístico de um sistema de blindagem multicamada que possua o compósito de matriz poliéster reforçado com fibras de juta como camada intermediária.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais do IME já vem dedicando esforços e recursos na pesquisa de novos materiais para serem utilizados em blindagem balística, que é área de interesse do Exército Brasileiro. O presente trabalho contribuiu para expandir o conhecimento de materiais para blindagem, observando os padrões nacionais e internacionais, priorizando o uso de matéria-prima nacional e ambientalmente correta. Destaca-se que as fibras lignocelulósicas, além de serem ambientalmente corretas, apresentam baixo custo financeiro, e são,

em geral, mais leves que as fibras sintéticas atualmente utilizadas em blindagem, como a aramida (Kevlar® e Twaron®) e o polietileno de ultra-alto peso molecular (Spectra® e Dyneema®), possuindo desempenho balístico similar.

1.2 OBJETIVO DE ESTUDO

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Neste trabalho, pretende-se avaliar o desempenho balístico de um sistema de blindagem multicamada que possua o compósito de matriz poliéster reforçado com fibras de juta como camada intermediária (segunda camada). As fibras de juta foram incorporadas na matriz polimérica em duas configurações distintas: manta e tecido, nas frações de 10%, 20% e 30% em volume. Foram comparados os resultados do presente trabalho com trabalhos semelhantes já realizados.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1) Verificar se os sistemas de blindagem multicamada utilizando como camada intermediária os compósitos poliéster-juta atendem as especificações da norma internacional NIJ 0101.06 (2008).

2) Comparar a eficiência dos diferentes modelos estudados (10%, 20% e 30% em volume com configurações manta e tecido de juta) com o tecido de aramida.

3) Analisar a integridade da camada de poliéster-juta após o impacto balístico, nos diferentes modelos considerados.

4) Avaliar o desempenho individual através da velocidade limite de cada material utilizado como camada intermediária: compósito poliéster-juta e tecido de aramida.

5) Associar o desempenho balístico com a impedância de choque dos materiais testados como camada intermediária.

6) Averiguar as superfícies fraturadas nos ensaios balísticos utilizando o microscópio eletrônico de varredura, com a finalidade de verificar os mecanismos de absorção de energia.

7) Comparar o peso e o custo total de uma blindagem multicamada, utilizando o compósito poliéster-juta ou tecido de aramida como camada intermediária.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BLINDAGEM BALÍSTICA

De acordo com a norma brasileira ABNT NBR 15000 (2005), a blindagem balística é definida como “anteparo de proteção projetado para oferecer resistência à penetração de projéteis provenientes de armas de fogo”.

A avaliação do desempenho de uma proteção balística de uso do Exército Brasileiro segue os padrões (normas) estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 15000, 2005) e pelo Instituto Nacional de Justiça dos Estados Unidos (NIJ-0101.06, 2008), que classificam a blindagem em diferentes níveis de acordo com o tipo de calibre. Na TAB. 2.1 são mostrados os diferentes níveis de proteção do sistema de blindagem quanto ao impacto, em função do calibre, da massa e da velocidade do projétil.

TAB. 2.1 Níveis de proteção balística.

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

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

Mesmo que não haja penetração no sistema de blindagem, o mesmo pode ser considerado ineficiente, devido ao excesso de deformação no sistema causado pelo

projétil, causando um trauma grave ou letal ao usuário. Na norma NIJ-0101.06 (2008) é estabelecida uma deformação máxima de 44 milímetros no sistema de blindagem e essa deformação deve ser medida em um material de referência (plastilina) apoiado atrás da blindagem cuja função é simular a consistência do corpo humano. Se o valor da deformação for menor ou igual, o sistema é considerado eficiente. Na FIG. 2.1 é mostrado o material de referência bem como o sistema de blindagem, antes e após o impacto do projétil.

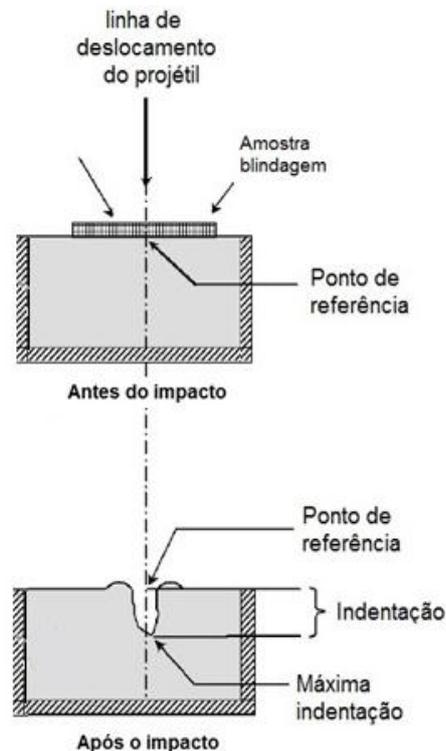


FIG. 2.1 Avaliação do desempenho da blindagem por meio da medida do trauma em plastilina. (Fonte: Adaptado de NIJ-0101.06, 2008).

Existem outros métodos de avaliar o desempenho de um sistema de blindagem balística, os mais importantes são baseadas em métodos probabilísticos/estatísticos que se baseiam na possível ocorrência ou não do projétil perfurar alvo, buscando-se determinar a velocidade limite (V_L) abaixo da qual o projétil é barrado e acima da qual o alvo (blindagem) é perfurado. O critério mais utilizado é o limite balístico V_{50} que é a velocidade em que a probabilidade do projétil perfurar a blindagem é de 50% (ZUKAS, 1982).

Existem casos que não é possível o cálculo desse parâmetro (V_{50}), pois não se pode garantir, em todos os casos, se houve ou não a perfuração do alvo, fazendo-se necessário a aplicação de princípios físicos para obter o valor do limite balístico.

Baseando-se nos conceitos de conservação de energia, a energia cinética dissipada pelo projétil durante a penetração no alvo (blindagem) é igual à energia total absorvida pelo alvo, e com isso, é possível calcular a velocidade limite do projétil (V_L).

Segundo MORYE *et al.* (2000), a velocidade limite pode ser entendida como a máxima velocidade em que o alvo absorve a energia cinética do projétil, sem que ocorra a perfuração do mesmo. Na EQ 2.1 é mostrada a energia absorvida (E_{abs}) em função da diferença entre a velocidade de impacto do projétil (V_i) e a velocidade residual (V_r) e a massa (m) do projétil.

$$E_{abs} = \frac{1}{2}m(V_i^2 - V_r^2) \quad \text{EQ 2.1}$$

Se o alvo (blindagem) absorver totalmente a energia cinética do projétil, ou seja, a velocidade residual for zero, o limite balístico pode ser calculado pela EQ 2.2.

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

2.2 SISTEMA DE BLINDAGEM MULTICAMADA

Estudos recentes comprovam que para um evento balístico nível III (projétil com velocidade acima de 800 m/s), nenhum material, quando aplicado individualmente, apresenta por si só as características necessárias para suportar as tensões mecânicas provenientes desse evento (MONTEIRO *et al.*, 2014; DA SILVA, 2014b). Segundo MONTEIRO *et al.* (2014), quando os materiais, do sistema de blindagem multicamada, foram testados separadamente, o material cerâmico (alumina dopada com 4% de nióbia) foi capaz de absorver 55,3%, o tecido de aramida absorveu 1,7% e o material metálico (liga de alumínio 6061) absorveu 7,3% da energia de impacto do projétil.

O sistema de blindagem multicamada consiste na combinação de diferentes materiais com propriedades distintas e tem como objetivo absorver a energia do

projétil e impedir a penetração de fragmentos (MONTEIRO *et al.*, 2014). Esse sistema normalmente é composto por duas ou três camadas, quando se tem o primeiro caso, essa blindagem é composta por uma camada de material cerâmico e uma camada de material polimérico ou compósito (DA SILVA *et al.*, 2014).

Na FIG. 2.2 são mostradas as etapas do impacto balístico de um sistema de blindagem multicamada.

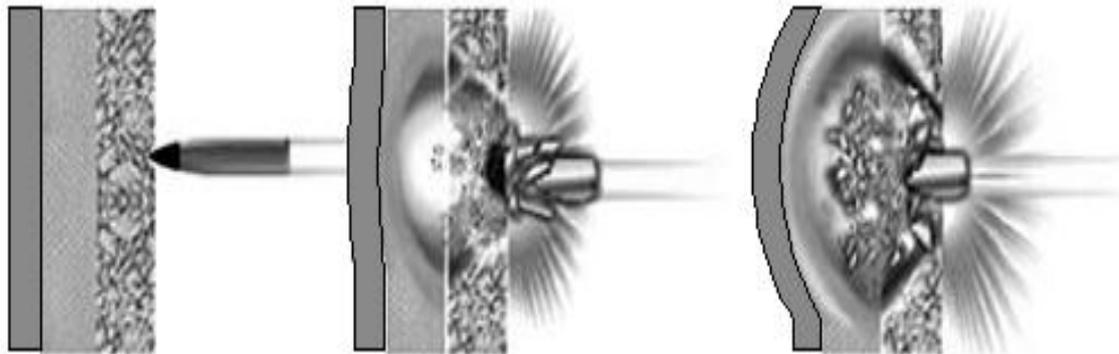


FIG. 2.2 Ilustração do mecanismo de absorção do impacto balístico realizado pela blindagem multicamada: (a) antes; (b) durante e (c) após o impacto balístico.
(Fonte: Adaptado de DA SILVA *et al.*, 2014).

O material cerâmico, que possui elevada resistência à compressão, normalmente é utilizado como camada frontal do sistema multicamada, pois é capaz de resistir à carga de compressão imposta pelo projétil e fragmentá-lo, além de promover uma melhor distribuição da pressão de impacto sobre a segunda camada, assim, grande parte da energia cinética do projétil é dissipada (MEDVEDOVSKI, 2010; DA SILVA *et al.*, 2014).

A segunda camada (material polimérico ou compósito) tem como objetivo absorver a energia residual dos fragmentos do projétil, da própria cerâmica e transformar a energia cinética em deformação plástica. Os materiais poliméricos mais utilizados são as poliamidas, aramidas e polietilenos (WANG *et al.*, 2014). Quando é utilizado material compósito, pode-se utilizar a matriz polimérica reforçada com fibras (NORONHA e MELO, 2010). No presente trabalho, o compósito foi de matriz poliéster reforçada com fibras de juta, na configuração manta e tecido.

O sistema de blindagem multicamada ainda pode incluir uma terceira camada, um metal dúctil, que tem por objetivo aperfeiçoar o desempenho de absorção da energia dissipada do sistema de blindagem (MONTEIRO *et al.*, 2014).

Assim como em trabalhos anteriores (ARAÚJO, 2015; DA CRUZ, 2015; DA LUZ, 2014; DA SILVA, 2014b; BRAGA, 2015) optou-se pela seguinte configuração: camada externa composta de material cerâmico (alumina dopada com nióbia), camada intermediária composta de material compósito de matriz polimérica reforçada com fibras naturais lignocelulósicas e camada interna composta de uma placa de alumínio 5052 H34.

2.3 CAMADA EXTERNA: MATERIAL CERÂMICO

Os materiais cerâmicos são constituídos por elementos metálicos e não metálicos ligados quimicamente e possuem como propriedades mecânicas: elevada rigidez, elevada dureza, elevada resistência ao calor, alta resistência mecânica a compressão, baixa condutibilidade térmica e elétrica, são frágeis e pouco resistentes ao impacto (CALLISTER & RETHWISCH, 2012).

Quando aplicados em sistemas de blindagem, principalmente como camada frontal, os materiais cerâmicos são ótimos em absorver a energia cinética do projétil e em espalhá-la na produção de superfícies de fratura (GOMES, 2004; MEDVEDOVSKI, 2010). Diversos fatores devem ser levados em consideração na escolha do material cerâmico a ser utilizado como material de blindagem balística, baseados em suas propriedades físicas e microestruturais (MEDVEDOVSKI, 2010). Diferentes materiais cerâmicos vêm sendo utilizados em blindagem balística, como exemplos, podem ser citados os carbeto (carbeto silício e carbeto de boro), os óxidos (alumina - Al_2O_3) e os nitretos (nitreto de silício - Si_3N_4) (DA SILVA *et al.*, 2014).

A alumina (Al_2O_3) tem sido largamente utilizada em proteção balística por apresentar melhor relação custo-benefício em comparação aos outros cerâmicos citados acima. Possui boas propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e dureza elevadas) e viabilidade comercial (GOMES, 2004; DA SILVA *et al.*, 2014). Na TAB. 2.2 são mostradas algumas propriedades da alumina (Al_2O_3) a temperatura ambiente.

TAB. 2.2 Propriedades da alumina.

Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Tenacidade à fratura (MPa√m)	Condutividade Térmica (W/m-K)	Calor específico (J/Kg-K)	Resistividade elétrica (Ω-m)
3,98	380	282-551	4,2-5,9	39	775	10 ¹³

(Fonte: Adaptado de CALLISTER & RETHWISCH, 2012).

Quando adicionada a nióbia na alumina, o processo de sinterização da alumina ocorre em temperatura mais baixa e em tempo reduzido. A nióbia promove, também, nesse processo um crescimento dos grãos da microestrutural final e gera uma 2ª fase nos contornos de grãos com menor dureza, direcionando a fratura para estas regiões, ocorrendo à fratura intergranular, melhorando assim, o desempenho balístico da alumina. Uma microestrutura mais grosseira revela tendência de destruição da ponta do projétil, dificultando sua penetração (GOMES, 2004).

2.4 CAMADA INTERMEDIÁRIA: MATERIAL COMPÓSITO

Cada vez mais se exige dos materiais de engenharia combinações incomuns de propriedades que não são atingidas por materiais comuns, como as ligas metálicas, cerâmicas e polímeros convencionais. É evidente a necessidade, em diversos seguimentos industriais, de materiais mais leves e de maior desempenho. Os mesmos devem ser rígidos, apresentar resistência à abrasão, ao impacto e a corrosão. Os materiais compósitos vêm exatamente no sentido de atender a estas necessidades e podem ser definidos como uma combinação de materiais quimicamente distintos, separados por uma interface bem definida, de forma que as propriedades do conjunto sejam melhores que dos componentes individuais (CALLISTER & RETHWISCH, 2012).

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

2.4.1 COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

Os materiais compósitos de matriz polimérica são utilizados na maior diversidade de aplicações dos compósitos, assim como em maiores quantidades, como consequência de suas propriedades à temperatura ambiente, da fabricação e do custo, além de aliarem uma boa resistência mecânica com boa ductilidade e leveza (CALLISTER & RETHWISCH, 2012).

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

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

As resinas termorrígidas são mais usadas na confecção de compósitos com fibras contínuas por apresentarem maiores vantagens em relação aos termoplásticos, tais como estabilidade térmica, rigidez, estabilidade dimensional e resistência à deformação sob carregamento (CALLISTER & RETHWISCH, 2012).

Nos materiais compósitos, a interface entre fibra e matriz é muito importante, pois a mesma é responsável por diversas propriedades deste novo material. Quando é baixa a força de ligação entre matriz/fibra, o mesmo poderá falhar a tensões relativamente baixas quando ensaiados transversalmente, por exemplo, Para aumentar a força de ligação entre a matriz/fibra, tem sido realizada uma série de tratamentos nas superfícies das fibras com o objetivo de melhorar a interface. Considera-se que os tratamentos aplicados à superfície das fibras em um material compósito podem ter um grande efeito sobre sua resistência mecânica (CANTWELL & MORTON, 1991). No presente trabalho foi utilizada a resina poliéster como matriz do compósito.

2.4.1.1 MATRIZ POLIÉSTER

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

O poliéster saturado é obtido pela reação entre um biálcool e um biácido saturado, dando origem a um produto termoplástico, onde sua cadeia molecular é composta apenas por simples ligação entre os átomos de carbono, propiciando uma flexibilidade característica dos produtos obtidos com esse poliéster. Pode ser utilizado com ou sem reforço, e seu emprego é bem diverso: filmes, fibras sintéticas, plastificantes (poliméricos) e até produtos de engenharia como tampa de tanque de combustível. O poliéster insaturado consiste basicamente de um polímero alquídic, contendo insaturações vinílicas dissolvidas em um monômero reativo, normalmente o monômero de estireno. É obtido pela reação entre um ácido insaturado, um ácido saturado e um biálcool, resultando em um produto termofixo, cuja cadeia molecular é composta por ligações simples e duplas entre os átomos de carbono. É diluído num monômero vinílico, inibidor, para facilitar sua utilização. Inicialmente encontra-se no estado líquido e após a adição de catalisador (peróxido orgânico) transforma-se no estado sólido (FIG. 2.3) caracterizando-se um uma resina termofixa. As resinas insaturadas são mais utilizadas na fabricação de materiais compósitos, devido ao seu baixo custo, facilidade de processamento e boas propriedades mecânicas, elétricas e químicas (RATNA, 2009; EMBRAPOL, 2015).

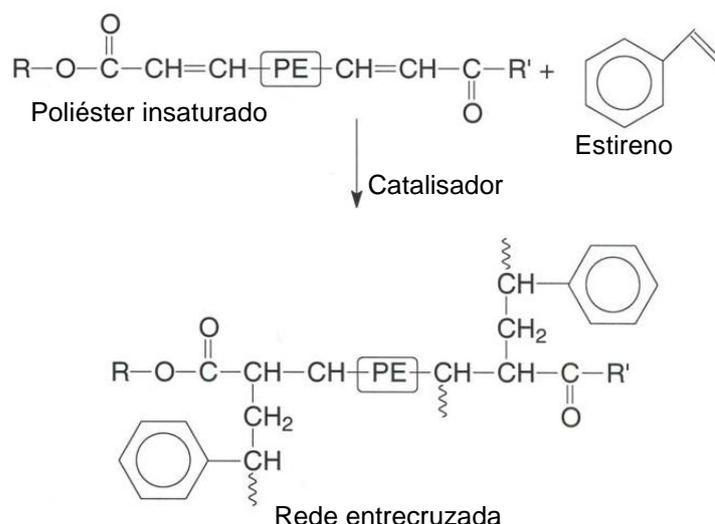


FIG.2.3 Resina poliéster: Processo de cura.
(Fonte: Adaptado de RATNA, 2009)

Na TAB. 2.3 são mostradas algumas propriedades da resina poliéster insaturado à temperatura ambiente.

TAB.2.3 Propriedades da resina poliéster.

Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Tenacidade à fratura (MPa√m)	Condutividade Térmica (W/m-K)	Calor específico (J/Kg-K)	Resistividade elétrica (Ω-m)
1,04-1,46	2,06-4,41	41,4-89,7	0,6	0,17	710-920	10 ¹³

(Fonte: Adaptado de CALLISTER & RETHWISCH, 2012).

Dentro da classificação das resinas poliéster insaturado, existe uma subclassificação referente à sua resistência química, apresentadas em ordem crescente em suas propriedades: Ortoftálicas, Isoftálicas e Bisfenólicas (RATNA, 2009).

2.4.2 FIBRA DE ARAMIDA

Atualmente, um dos materiais mais utilizados em blindagens balísticas é a aramida, também conhecida por seus nomes comerciais Kevlar®, Twaron® ou Technora®, dependendo do fabricante. Devido ao alto grau de ordenamento das suas cadeias moleculares, a aramida apresenta excelentes propriedades, tais como: alta resistência mecânica, baixa deformação até a fratura, alto módulo de elasticidade, alta tenacidade, larga faixa de temperatura de uso, resistência ao calor, excelente estabilidade dimensional entre outras características (CALLISTER & RETHWISCH, 2012; WANG *et al.*, 2014). Na TAB 2.4 são mostrados os valores de algumas propriedades da fibra de aramida à temperatura ambiente.

TAB 2.4 Propriedades da fibra de aramida.

Densidade (g/cm ³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Calor Específico (J/Kg-K)
1,44	131	3600-4200	1300

(Fonte: Adaptado de CALLISTER & RETHWISCH, 2012).

Na FIG. 2.4 é mostrada a estrutura química da aramida.

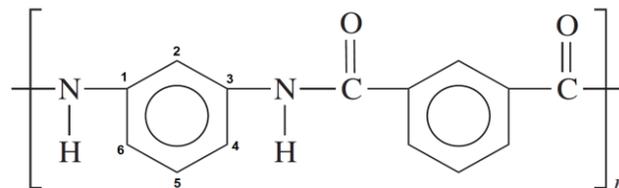


FIG. 2.4 Estrutura química da aramida.
(Fonte: WANG *et al.*, 2014).

Neste trabalho foi testada a aramida como camada intermediária em blindagens multicamada, para fins de comparação com os compósitos de poliéster reforçados por fibras de juta.

2.4.3 FIBRAS NATURAIS LIGNOCELULÓSICAS (FNL)

As fibras naturais são derivadas de animais, vegetais e minerais. As fibras de origem vegetal possuem predominância de celulose e lignina em sua estrutura, e por isso são denominadas fibras naturais lignocelulósicas (FNL). As propriedades físicas de uma fibra dependem de sua estrutura química e cada uma tem seu próprio aspecto quando analisada e submetida ao microscópio, como mostrado na FIG. 2.5. As fibras naturais são bastante heterogêneas, pois dependem do tipo de solo, das condições climáticas, dos fertilizantes utilizados, do tipo de colheita, das folhas, dos frutos ou do caule dos vegetais (JOHN & THOMAS, 2008; MONTEIRO *et al.*, 2009).

A utilização de recursos naturais não renováveis, além de estarem se tornando escassos, tem agravado os problemas relacionados ao meio ambiente. Uma possível solução seria uma substituição gradativa desses recursos por outros materiais que sejam renováveis. Neste cenário, as FNLs têm ganhado importância, por serem ambientalmente corretas e possuírem propriedades adequadas para muitas aplicações (KALIA, *et al.*, 2011; MONTEIRO *et al.*, 2009).

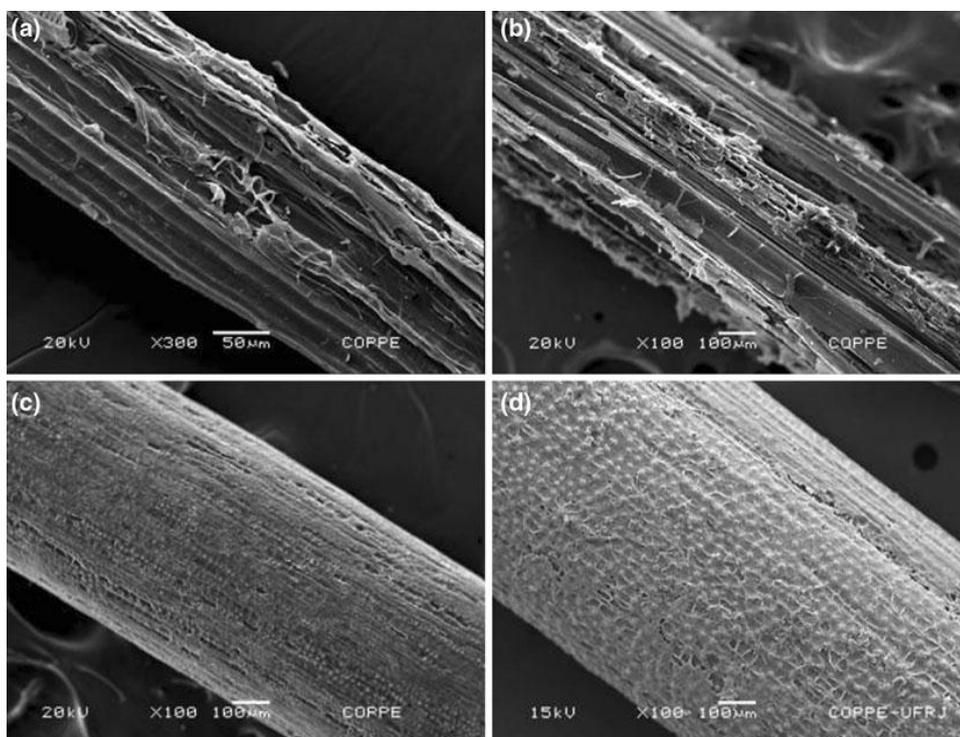


FIG. 2.5 MEV da superfície de FNLs: (a) Sisal, (b) bamboo, (c) coco e (d) piaçava. (Fonte: MONTEIRO *et al.*, 2011).

A utilização de FNLs como cargas ou reforços em compósitos de matriz polimérica (CMP) apresentam vantagens devido à sua flexibilidade quanto ao processamento do compósito (são menos abrasivas para as ferramentas), alta rigidez específica, baixo custo, neutralidade em relação à emissão de CO₂, surgindo uma tendência crescente em sua utilização. Devido ao aumento do número de publicações na área, compósitos poliméricos reforçados com FNLs têm sido aceitos como materiais de engenharia, havendo uma crescente utilização das mesmas em aplicações estruturais (SATYANARAYANA *et al.*, 2007; KALIA, *et al.*, 2011; MONTEIRO *et al.*, 2011; FARUK *et al.*, 2012).

Uma fibra vegetal elementar possui comprimento que varia de 1 a 50 mm, diâmetro entre 10 e 50 µm e são similares a tubos microscópicos, com paredes celulares ao redor do lúmen (cavidade) central. Na FIG. 2.6 é mostrado o arranjo microestrutural das FNLs. Tais paredes celulares são formadas por uma matriz de hemicelulose-lignina de composição variável reforçada com microfibrilas de celulose semicristalina orientadas de forma helicoidal. As microfibrilas, por sua vez, possuem diâmetro que varia de 10 a 30 nm e são formadas por 30 a 100 moléculas de celulose com conformação de cadeia estendida, que dão resistência mecânica à fibra (KALIA *et al.*, 2011; JOHN & THOMAS, 2008).

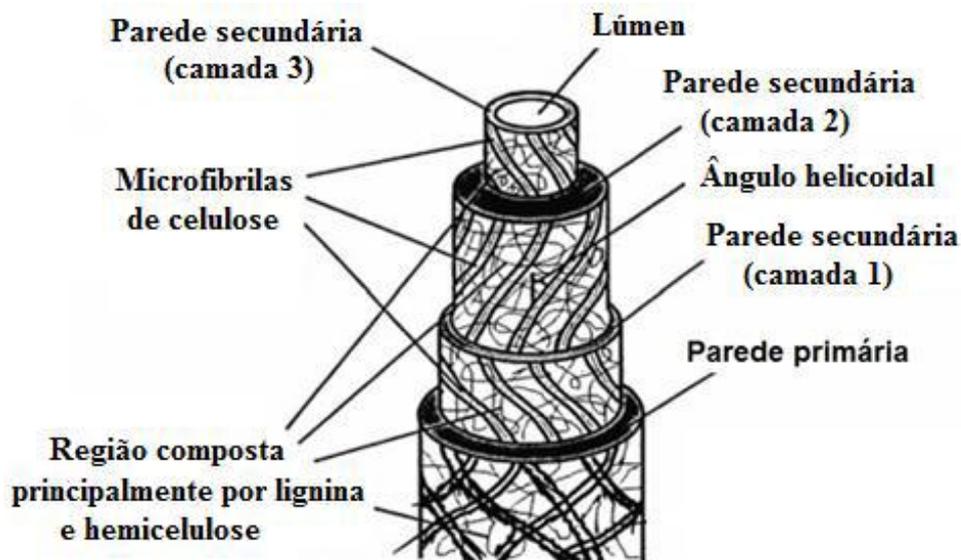


FIG. 2.6 Microestrutura de uma fibra natural lignocelulósica.
(Fonte: Adaptado de KALIA *et al.*, 2011).

Segundo Regiani (2000), a celulose se resume em um polímero linear cristalino formado por unidades β -D glicopironases unidas por ligações glicosídicas β -(1 \rightarrow 4), como mostrado na FIG. 2.7. Hemicelulose, que possui estrutura química similar à da celulose, são moléculas complexas, amorfas e de unidades: β -D-xilose, β -D-manose, β -D-glicose, α -L-arabinose, α -D-galactose, ácido β -D-glicurônico ou ácido α -D-4, O-metilglicurônico. Essas unidades são formadas por cadeias de carbono, com um grupo hidroxila ligado a cada átomo de carbono, exceto aqueles que podem estar na forma de carbonila ou em ligação hemiacetal. Tanto os grupos hidroxila quanto carbonila são hidrofílicos (absorvem umidade), o que favorece a solubilidade de hemicelulose.

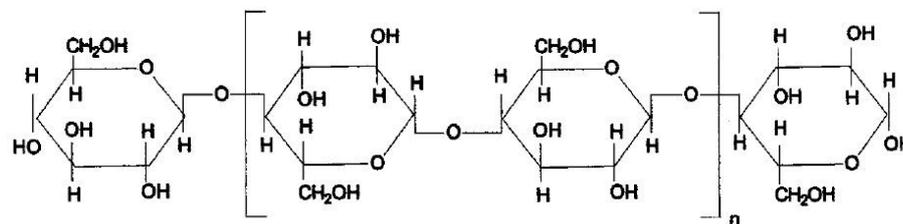


FIG. 2.7 Estrutura química da celulose.
(Fonte: Adaptado de MOHANTY *et al.*, 2002).

A lignina é uma macromolécula formada por um sistema aromático, muito reticulado de elevado peso molecular, amorfo, composto de unidades fenilpropano (REGIANI, 2000). Na FIG. 2.8 é mostrada a estrutura química da lignina

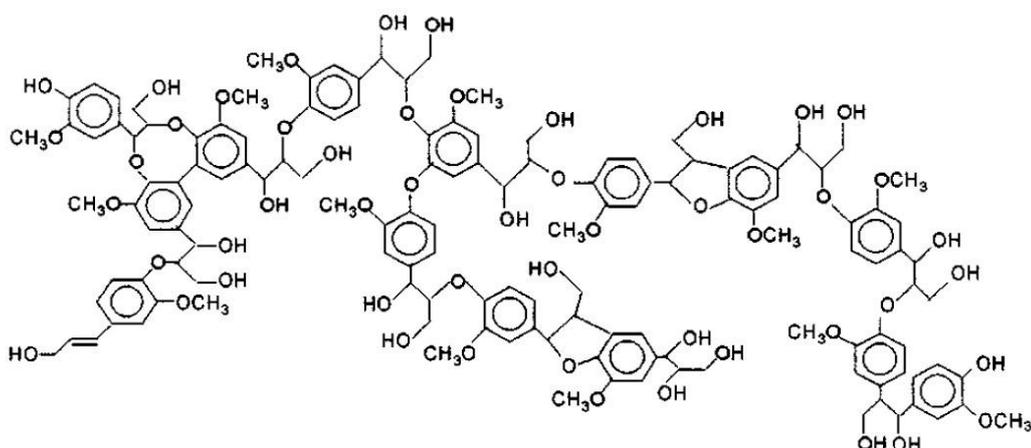


FIG. 2.8 Estrutura química da lignina.
(Fonte: Adaptado de MOHANTY *et al.*, 2002).

As moléculas de hemicelulose são unidas à celulose por ligações de hidrogênio e atuam como cimentante das microfibrilas, formando uma rede de celulose/hemicelulose que é considerada o principal componente estrutural da fibra. A lignina, por sua vez, age como cimentante e aumenta a rigidez do compósito de celulose/hemicelulose. Outros constituintes presentes nas FNL são as pectinas e as graxas (KALIA *et al.*, 2011).

Os fatores que podem influenciar nas propriedades das FNLs são: composição química, diâmetro, arranjo dos constituintes na fibra (incluindo ângulo das microfibrilas), grau de polimerização, fração cristalina da celulose, fonte vegetal, parte do organismo vegetal (caule, folha, raiz, semente, entre outras) e condições de crescimento (idade, condições climáticas, processos de degradação). Na TAB. 2.5 são mostradas as propriedades de algumas FNLS e algumas fibras sintéticas tais como as fibras de vidro, carbono e aramida. Na sua última coluna destaca a resistência específica de cada fibra (MONTEIRO *et al.*, 2011; FARUK *et al.*, 2012; THAKUR *et al.*; 2014).

TAB. 2.5 Propriedades de algumas FNLs e algumas fibras sintéticas.

FNL	Densidade ρ (g/cm ³)	Resistência à tração σ (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Máx. σ/ρ (MPa.cm ³ /g)
Bambu (<i>Bambusa vulgaris</i>)	1,03-1,21	106-204	-	493
Banana (<i>Musa sapientum</i>)	0,67-1,50	700-800	27-32	1194
Coco (<i>Cocos nucifera</i>)	1,15-1,52	95-220	4-6	191
Cânhamo (<i>Cannabis sativa</i>)	1,07	389-690	35	649
Curauá (<i>Ananas erectifolium</i>)	0,57-0,92	117-3000	27-80	2193
Juta (<i>Corchorus capsularis</i>)	1,30-1,45	393-800	13-27	615
Linho (<i>Linum usitatissimum</i>)	1,30-1,50	344-1035	26-28	496

FNL	Densidade ρ (g/cm ³)	Resistência à tração σ (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Máx. σ/ρ (MPa.cm ³ /g)
Rami (<i>Boehmeria nivea</i>)	1,5	400-1620	61-128	1080
Sisal (<i>Agave sisalana</i>)	1,26-1,50	287-913	9-28	725
Vidro E	2,50-2,58	2000-3450	70-73	1380
Carbono	1,78-1,81	2500-6350	230-400	3567
Aramida	1,44	3000-4100	63-131	2847

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

2.4.3.1 FIBRAS DE JUTA

De acordo com BLEDZKI e GASSAN (1999) e FARUK *et al.* (2012), podem-se classificar as FNLs nos seguintes tipos básicos, conforme sua localização na planta, sendo: fibras de caule, fibras de folhas, fibras de sementes, fibras do núcleo (floema), fibras de grama e cana (trigo, milho e arroz) e os outros tipos (madeira e raízes).

Dentre as fibras naturais com potencial de aplicação, destaca-se a juta (*Corchorus capsularis*), cultivada em climas úmidos e tropicais na região norte do país, que produz uma fibra de alta resistência, que quando misturada a polímeros, pode dar origem a produtos com menor densidade, podendo ser utilizadas em diversas aplicações (NETO *et al.*, 2007).

A fibra de juta possui baixo custo, abundância, maleabilidade e apresenta boas propriedades, tais como: elevado módulo de elasticidade e resistência específica; compósitos reforçados por essa fibra podem ser usados em telhados de casas, painéis, partes de carros e placas para indústria eletrônica (MELLO *et al.*, 1995).

A Juta, de nome científico *Corchorus capsularis*, é uma fibra têxtil vegetal que provém da família *Tilioidae*. Sua planta alcança um tamanho de 3 a 4 metros e o seu talo tem um diâmetro de aproximadamente 20 mm. A fibra útil é contida entre a casca e o talo interno e a extração é feita pelo processo da maceração. A alta temperatura das regiões nas quais é cultivada favorece a fermentação e desta forma

consegue-se a maceração em oito a dez dias, permitindo assim a fácil retirada da casca da planta e separação da fibra da parte lenhosa do talo. O comprimento das células elementares da juta é em média de 0,80 mm, o diâmetro varia de 0,01 a 0,03 mm e essa fibra também possui rigidez por ser lignificadas. O tempo necessário para maceração depende de vários fatores, como: temperatura da água, estado mecânico da água e idade da planta na ocasião da colheita (ALVES, 2008).

A temperatura ótima para proliferação de bacilos úteis à maceração varia de 30 a 35 °C. O clima da Amazônia, sendo tropical, é muito favorável à maceração, de modo que o problema de temperatura baixa praticamente não existe. O estado mecânico também é importante. Estando à água em repouso a maceração é mais rápida porque a massa líquida se aquece mais facilmente e o volume de bacilos aumenta à medida que eles se reproduzem, visto não haver o arraste dos mesmos, o que não acontece na água em movimento onde não só a temperatura como a concentração de bacilos, deve ser menor sendo a maceração mais lenta. (NETO *et al*, 2007). Na FIG. 2.9 é mostrada a planta, bem como aspecto macroscópico e microscópico das fibras de juta.

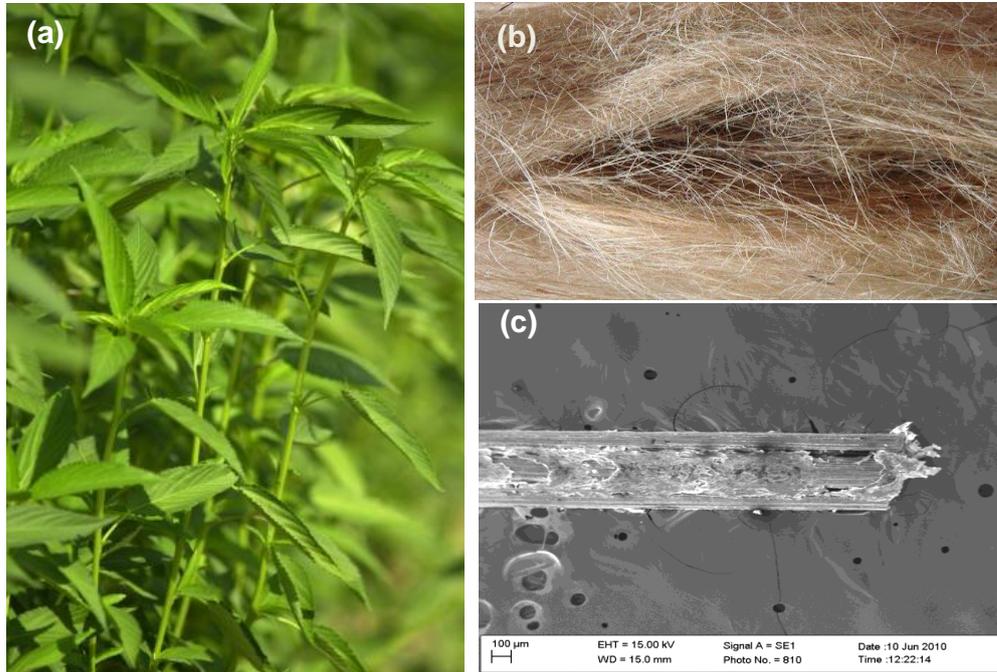


FIG. 2.9 (a) Planta de juta; (b) fibras de juta e (c) imagem microscópica da fibra de juta. (Fonte: HOMMA, 2005; DA SILVA, 2014c; LIMA, 2009).

A fibra de juta tem como seu principal componente a celulose, sob a forma de linho-celulose, tendo boa afinidade para corantes diretos e para corantes básicos. Essa fibra é muito higroscópica, regulando a umidade em 12%, o que a torna a matéria prima ideal para a sacaria, evitando tanto o ressecamento quanto a fermentação do produto acondicionado. É uma cultura fácil, acompanhada de uma maceração trabalhosa e de pouco rendimento, sem a utilização de agrotóxicos ou fertilizantes. Introduzida no Brasil por Ryota Oyama, a cultura foi feita inicialmente por japoneses, tornando-se uma das principais atividades econômicas das populações ribeirinhas da região amazônica, sendo um fator fundamental da fixação de mais de 50 mil famílias ao campo (ALVES, 2008).

DA SILVA (2014c) avaliou as propriedades mecânicas e térmicas da fibra de juta e de compósitos poliméricos reforçados com juta. Inicialmente, 120 fibras (distribuídas em seis faixas) foram separadas aleatoriamente e analisou-se, através do histograma, a variação do diâmetro (FIG 2.10), sendo utilizado para essa medição um projetor de perfil.

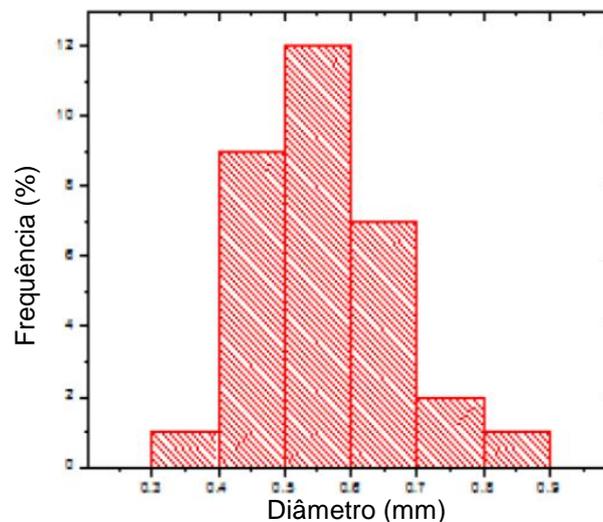


FIG. 2.10 Distribuição de frequência por diâmetro para fibras de juta.
(Fonte: DA SILVA, 2014c).

Através da análise de Weibull, foi possível obter a variação da resistência característica à tração em função do diâmetro da fibra de juta (FIG. 2.11) e pode-se notar que quanto menor o diâmetro da fibra maior valor da resistência à tração, tendo esses parâmetros uma relação inversamente proporcional (DA SILVA, 2014c).

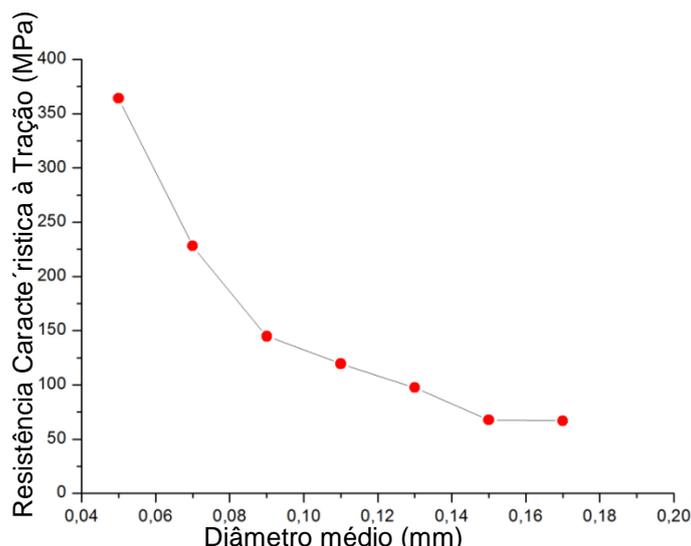


FIG. 2.11 Variação da tensão característica com o diâmetro médio da fibra de juta para cada intervalo.
(Fonte: Adaptado de DA SILVA, 2014c)

Em relação aos compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de juta, foi realizado o ensaio de tração onde se pode obter a tensão máxima, módulo de elasticidade e deformação total (TAB. 2.6), variando o volume de fibras de juta, nos compósitos, de 0% a 30%. Analisando essas propriedades, obteve-se aumento significativo quando comparado à resina poliéster pura, indicando que a incorporação de fibras de juta no compósito de matriz poliéster conferiu um efetivo reforço nas suas propriedades mecânicas relacionadas ao ensaio de tração.

TAB. 2.6 Propriedades de tensão de compósitos de poliéster reforçados com fibras de juta.

Volume de Fibras de Juta (%)	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação Total (%)
0	31,26 ± 3,28	0,446872 ± 0,060	0,071 ± 0,0081
10	62,49 ± 5,66	0,983130 ± 0,070	0,064 ± 0,0082
20	68,80 ± 13,86	0,798627 ± 0,084	0,086 ± 0,0139
30	56,58 ± 18,08	0,612499 ± 0,159	0,093 ± 0,0238

(Fonte: DA SILVA, 2014c)

Através das imagens obtidas do MEV (FIG. 2.12) da resina poliéster (0%) e do compósito poliéster reforçado com 30% de fibras de juta. Pode-se observar que sem a adição de fibra, o corpo de prova apresenta pouca propagação de trincas, ocasionando uma ruptura de maneira frágil. No compósito 30%, observa-se a propagação de trincas na superfície da fibra de juta, bem como evidencia-se a

presença de vazios correspondentes ao desprendimento da fibra de juta na matriz poliéster (DA SILVA, 2014c).

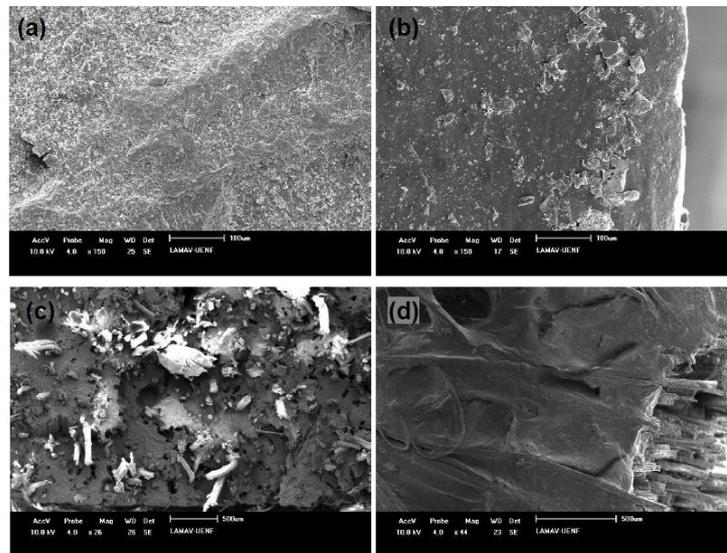


FIG. 2.12 Imagens obtidas do MEV: (a) Superfície da resina poliéster pura; (b) perfil da resina pura; (c) superfície do compósito de 30% e (d) perfil do compósito de 30%. (Fonte: DA SILVA, 2014c).

Com o objetivo de analisar a estabilidade térmica das fibras de juta, DA SILVA (2014c) realizou ensaios de TGA/DTG sob atmosfera de oxigênio, como ilustrado na FIG. 2.13. Através das curvas, na faixa de temperatura entre 25 e 80°C houve uma pequena perda de massa que geralmente é atribuída à liberação de água, pois a fibra de juta é lignocelulósica hidrofílica e sua superfície é capaz de absorver a umidade. Há 301,87°C ocorreu uma grande redução de massa e pode estar associada à dissociação da estrutura das fibras de juta, em virtude de suas cadeias macromoleculares.

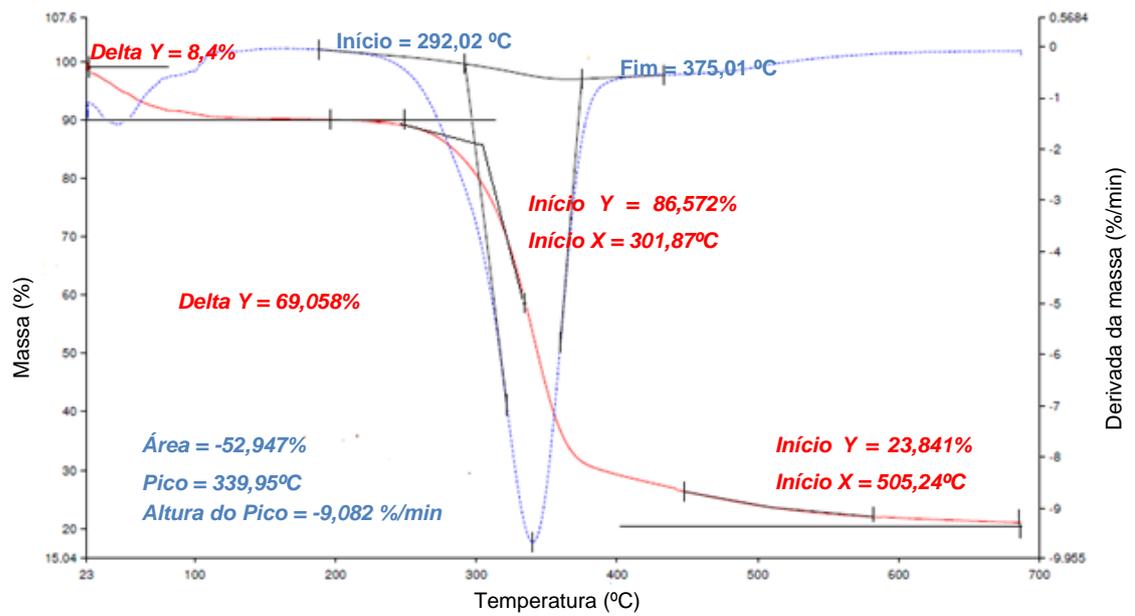


FIG. 2.13 Curvas TGA/DTG das fibras de juta.
(Fonte: Adaptado de DA SILVA, 2014c)

2.4.4 ARRANJO DAS FIBRAS PARA PROTEÇÃO BALÍSTICA

Desde a década de 40, tecidos de fibras poliméricas têm sido empregados em blindagens balísticas. Quando as camadas de tecido são unidas por uma resina polimérica, no momento do impacto balístico, resistem parcialmente à ação de penetração do projétil e absorvem a energia de impacto resultante do choque do projétil (WANG *et al.*, 2014). Recentemente, tecidos de fibras naturais têm sido testados para integrar sistemas de blindagem multicamada (ARAÚJO, 2015; BRAGA, 2015; DA CRUZ, 2015; DA LUZ, 2014; DA SILVA, 2014b; WAMBUA *et al.*, 2007).

Os tecidos são produzidos pelo entrelaçamento dos fios de trama (0°) com os fios de urdume (90°), em um arranjo regular. A integridade do tecido é mantida pelo encadeamento mecânico das fibras (JOHN & THOMAS, 2008). Os principais tipos de trama são mostrados na FIG. 2.14.

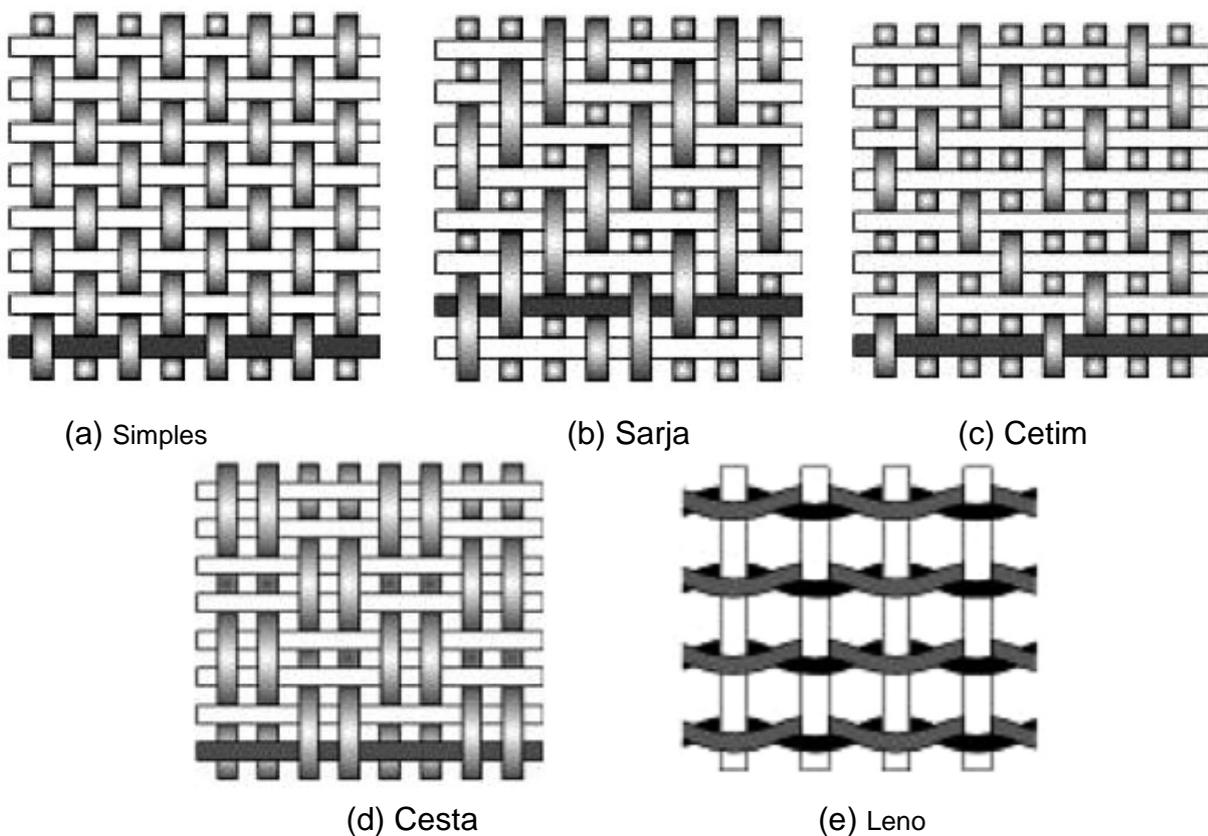


FIG. 2.14 Diferentes arranjos de fibras em tecido.
(Fonte: Adaptado de JOHN & THOMAS, 2008).

No tecido simples cada fio de trama passa alternadamente por cima e por baixo do fio de urdume, resultando em simetria e boa estabilidade, com porosidade razoável. No tecido do tipo sarja um ou mais fios de trama passam alternativamente por cima e por baixo de dois fios de urdume, formando um efeito visual de “escada” (diagonal). O tecido de cetim é fundamentalmente um tecido de sarja modificado, onde se tem menos interseções entre os fios de trama e de urdume. O tecido de cesta é similar ao arranjo simples exceto que dois ou mais fios são entrelaçados alternadamente com dois ou mais fios da trama, utilizados em tecidos pesados, com fibras grossas, para evitar a ondulação excessiva da trama. O tecido leno, os fios adjacentes são torcidos em torno de fios consecutivos da trama para formar um par espiral (JOHN & THOMAS, 2008).

Estudos mostram que tanto as propriedades dinâmico-mecânicas das fibras quanto à geometria do tecido afetam o comportamento balístico dos tecidos. O arranjo do tecido simples apresenta a maior estabilidade em comparação com os outros dois arranjos básicos. Porém, quando esse tecido é aplicado na proteção balística, no impacto balístico, a maior flexão dos fios neste tipo de arranjo provoca cargas na direção da espessura, diminuindo o desempenho balístico (WANG *et al.*, 2014). No presente trabalho foi selecionado o tecido de trama simples, FIG. 2.14(a), pois este é facilmente encontrado no mercado.

2.5 CAMADA INTERNA: MATERIAL METÁLICO

Na última camada da blindagem, normalmente é utilizado um material metálico deformável que têm como objetivo diminuir o dano no corpo do usuário causado pela deformação dinâmica do sistema de blindagem (WANG *et al.*, 2014).

2.6 COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS MATERIAIS

Os processos que ocorrem quando o material está sujeito a cargas que variam rapidamente podem ter uma diferença significativa do material que está sujeito a condições estáticas ou quase estáticas (MEYERS, 1994).

O que define se um processo é estático ou dinâmico é a taxa da aplicação de uma força externa sobre o material. Taxas de deformação lenta caracterizam um comportamento estático, ou seja, o fenômeno de carregamento é experimentado por todo o material. Já para taxas de deformação elevada, obtém-se um comportamento dinâmico, onde o carregamento torna-se um fenômeno localizado que se propaga no material como uma onda de tensão (MEYERS, 1994 e ZUKAS, 1982).

A deformação quase estática compreende uma sequência de estados de equilíbrio, pois o tempo é suficiente para a relaxação de toda a estrutura, enquanto a deformação dinâmica, geralmente, envolve a propagação de ondas que varia de seção para seção do corpo. Neste caso, as tensões internas não são transmitidas instantaneamente, as tensões e deformações são transferidas átomo a átomo a uma velocidade específica, que pode ser calculada com uma boa aproximação (MEYERS, 1994, ZUKAS, 1982).

O impacto de um projétil em um material resulta em altas taxas de deformação e essa resposta dinâmica pode ser considerada como comportamento balístico do material. Dependendo da resposta do material à solicitação externa, as ondas geradas podem ser dadas na forma de ondas elástica, plástica e de choque (MEYERS, 1994).

Quando a solicitação externa aplicada não supera a tensão de escoamento do material, o pulso gerado é chamado de onda elástica e sua velocidade (C_0) pode ser obtida utilizando a EQ 2.3 (MEYERS, 1994).

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{EQ 2.3}$$

Onde:

E → Módulo de elasticidade.

ρ → Densidade do material.

Se tratando de um material dúctil, quando a tensão externa aplicada supera a tensão de escoamento do material, ocorre deformação plástica e o pulso de tensão formado, que excede o regime elástico, se decompõe em uma onda elástica e uma onda plástica. A velocidade da onda plástica (V_p) pode ser obtida utilizando a EQ 2.4 (MEYERS, 1994).

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

Onde:

$d\sigma/d\varepsilon \rightarrow$ inclinação da curva tensão (σ) versus deformação (ε) na região plástica e elástica.

$\rho \rightarrow$ densidade do material.

Na FIG. 2.15 é mostrada a curva de tensão-deformação para um material dúctil e pode-se observar que a inclinação da curva no regime elástico é igual ao módulo de elasticidade do material (E). No regime plástico, a inclinação da curva é variável enquanto que no elástico é constante e pode-se observar que, o $d\sigma/d\varepsilon$ é maior no regime elástico, sendo assim, a velocidade das ondas elásticas são superiores as plásticas.

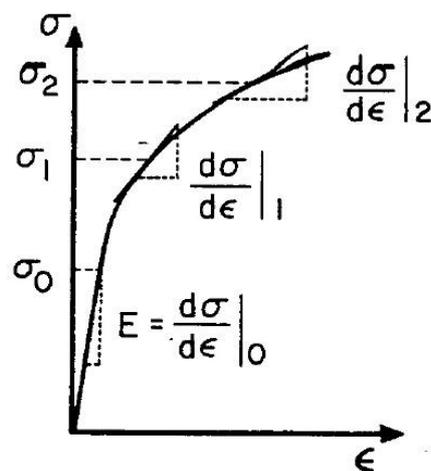


FIG. 2.15 Curva tensão deformação para um material dúctil.
(Fonte: Adaptado de MEYERS, 1994).

Segundo MEYERS (1994), quando a amplitude das ondas de tensão excede o limite de escoamento dinâmico do material, as tensões cisalhantes podem ser desprezadas e nesta condição, o tratamento de fluidos pode ser empregado. Neste

caso, as ondas se propagam em uma frente (frente de choque) única com velocidade maior que a onda elástica e são chamadas de ondas de choque. Na FIG. 2.16 é mostrado um modelo simples de um cilindro com fluido compressível e um pistão que foi utilizado para auxiliar no entendimento quanto ao conceito de onda de choque a as equações de conservação envolvidas (Rankine-Hugoniot).

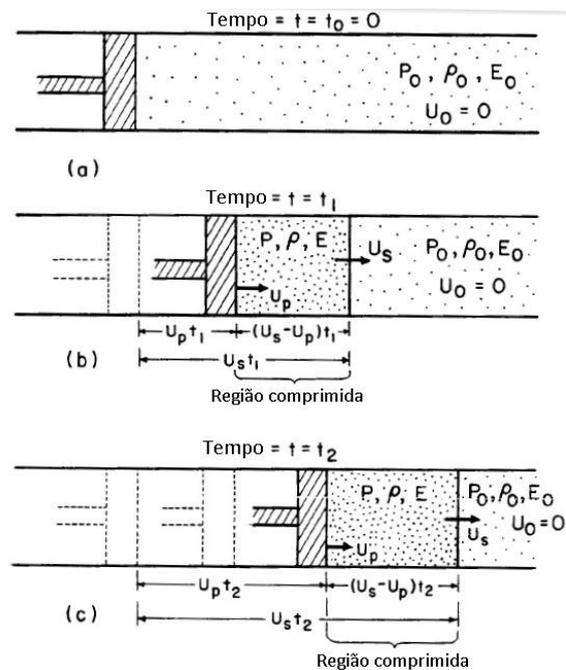


FIG. 2.16 Modelo físico da propagação de uma onda de choque: (a) Antes do choque; (b) após um tempo t_1 ; (c) após um tempo $t_2 > t_1$.
(Fonte: Adaptado de MEYERS, 1994).

A frente de choque pode ser considerada como um plano que separa a região comprimida da região estacionária e possui velocidade U_s . Pode-se observar na FIG. 2.16 que a frente de choque avança no material compressível, com velocidade maior que a velocidade do pistão ($U_s > U_p$) e na região comprimida, a densidade e pressão são alteradas para valores maiores ($P > P_0$ e $\rho > \rho_0$). Regiões de maior amplitude de frente de onda se propagam com velocidade maior que as de menor amplitude, gerando uma perturbação que provoca uma descontinuidade (onda de choque) na pressão, densidade e temperatura (ou energia interna) (MEYERS, 1994).

As relações de conservação de Rankine-Hugoniot descrevem o movimento do pistão e da região comprimida do fluido; e podem ser aplicadas para uma onda de choque propagando-se em um gás, líquido ou sólido. Essas relações são expressas pelas EQ 2.5, EQ 2.6 e EQ 2.7.

$$\text{Conservação de energia: } E - E_0 = \frac{1}{2} \cdot (P + P_0) \cdot (V_0 - V) \quad \text{EQ 2.5}$$

Onde:

E → Energia interna do material durante a passagem da onda;

E_0 → Energia interna do material antes da passagem da onda;

P → Pressão durante a passagem da onda;

P_0 → Pressão antes da passagem da onda;

V → Volume durante a passagem da onda;

V_0 → Volume específico do material antes da passagem da onda.

$$\text{Conservação de massa: } \rho_0 U_s = \rho (U_s - U_p) \quad \text{EQ 2.6}$$

Onde:

ρ → Densidade do material durante a passagem da onda;

ρ_0 → Densidade do material antes da passagem da onda;

U_s → Velocidade da propagação da onda de choque;

U_p → Velocidade da partícula.

$$\text{Conservação de momento: } (P - P_0) = \rho_0 U_s U_p \quad \text{EQ 2.7}$$

Onde:

P → Pressão durante a passagem da onda;

P_0 → Pressão antes da passagem da onda;

ρ_0 → Densidade do material antes da passagem da onda;

U_s → Velocidade da propagação da onda de choque;

U_p → Velocidade da partícula.

Nas três equações, descritas acima, existem cinco variáveis: P (pressão), velocidade da partícula (U_p), velocidade da propagação da onda de choque (U_s), densidade (ρ) e energia (E). Então, é necessária uma quarta equação (EQ 2.8) para obter todos os parâmetros mencionados. Esta equação é chamada de Equação do

Estado do Material e expressa empiricamente à relação entre U_p e U_s . Esta equação, obtida experimentalmente, é uma equação polinomial com parâmetros C_0 , S_1 , S_2 , S_3 , (...), S_n .

$$U_s = C_0 + S_1 U_p + S_2 U_p^2 + (...) + S_n U_p^n \quad \text{EQ 2.8}$$

Onde:

$S_1, S_2, \dots, S_n \rightarrow$ Parâmetros empíricos;

$C_0 \rightarrow$ Velocidade do som no material a pressão (P) relativa nula.

Para a maioria dos materiais, os parâmetros empíricos de ordem superior são nulos e então a EQ 2.8 se torna:

$$U_s = C_0 + S_1 U_p \quad \text{EQ 2.9}$$

A EQ 2.9 é uma relação linear entre a velocidade de propagação da onda de choque e a velocidade da partícula, descrevendo com precisão satisfatória a resposta ao choque dos materiais que não sofreram transformação de fase e que não sejam porosos. Os valores de C_0 e S_1 são normalmente tabelados e encontrados na literatura (MEYERS, 1994). As relações de conservação de Rankine-Hugoniot só podem ser aplicadas sob as seguintes condições:

- a) A frente de choque é uma superfície descontínua e sem espessura aparente;
- b) O módulo de cisalhamento do material é zero quando o material comporta-se como fluido;
- c) Forças externas ao sistema, como forças gravitacionais, e a condução de calor na frente de choque são consideradas desprezíveis;
- d) Não há comportamento elasto-plástico;
- e) O material não sofre transformação de fases.

2.6.1 INTERAÇÃO E REFLEXÃO DE ONDAS DE CHOQUE

Na união de diferentes materiais, usados para blindagem, são criados planos (interfaces) entre os mesmos e a interação de uma onda de choque nessas interfaces pode ser analisada pelo método do casamento de impedâncias (MEYERS, 1994).

No momento em que uma onda de choque passa pela interface entre os materiais, uma pressão será formada para certa velocidade de partícula U_p e poderá ser medida através de um parâmetro denominado impedância de choque (MEYERS, 1994).

Segundo MEYERS (1994), a impedância de choque é definida como produto da densidade (ρ_0) e velocidade da onda de choque (U_s), caso o valor de U_s seja desconhecido, é possível fazer uma aproximação da impedância de choque utilizando a velocidade sônica da onda (C_0) no lugar da onda de choque. Na FIG. 2.17 é mostrada a seqüência de eventos no impacto balístico entre o projétil e o alvo.

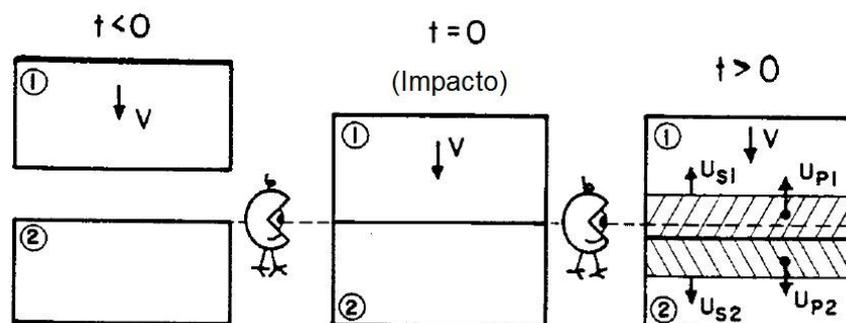


FIG. 2.17 Sequência de eventos no impacto balístico: (a) Antes do impacto; (b) no instante do impacto; (c) após o impacto.

(Fonte: Adaptado de MEYERS, 1994).

Antes do impacto, o alvo (2) se encontra em repouso e o projétil (1) se movimenta com uma velocidade V . Após o impacto, duas ondas compressivas são formadas, uma possui velocidade U_{s1} que viaja para dentro do projétil (1) e outra que possui velocidade U_{s2} e viaja para dentro do alvo (2). A porção não comprimida do alvo se encontra em repouso enquanto a porção não comprimida do projétil se encontra em movimento com velocidade V . O método de casamento de impedâncias é mais adequado para explicar a transferência de uma onda no meio A para o meio

B, para materiais com elevada impedância. Para que o método seja eficiente é necessário que o material seja contínuo na interface de impacto, ou seja, que a velocidade de partícula na região comprimida seja a mesma ($U_{p1}=U_{p2}$) e que a pressão seja a mesma ($P_1=P_2$). Se as velocidades de partículas fossem diferentes ocorreria à formação de vazios ou regiões super densas e caso a pressão fosse diferente haveria a formação de outro pulso (MEYERS, 1994).

a) Transferência de uma onda de choque de um material A (baixa impedância) para um material B (alta impedância): Este tipo de transferência ocorre quando o material A (camada externa) é menos denso que o material B (camada intermediária). Na FIG. 2.18(a) é mostrada a variação da pressão em função da velocidade de partícula para os materiais A e B. A inclinação da linha pontilhada na pressão P_1 é a impedância de choque e explica a descontinuidade na pressão (ou densidade) durante o impacto e a curva AR representa a inversão da curva A, sendo o ponto (U_{p1}, P_1) comum entre as curvas AR e A e o ponto (U_{p2}, P_2) sendo comum entre as curvas AR e B. Na FIG. 2.18(b) são mostrados os perfis de pressão ao atingir a interface e pode-se observar que para manter o equilíbrio entre as pressões, a pressão P_1 da frente de choque aumenta descontinuamente para P_2 . A partir deste momento, a onda de choque é decomposta em duas ondas: uma se propagando no material A (no sentido oposto) e outra se propagando no material B. Em t_3 e t_4 a frente de pressão P_1 encontra a onda de choque remanescente e cai para P_2-P_1 (onda compressiva). A velocidade da partícula U_{p2} se mantém a mesma na região de alta pressão, em A e B, sendo assegurada à continuidade de pressão e velocidade da partícula (MEYERS, 1994).

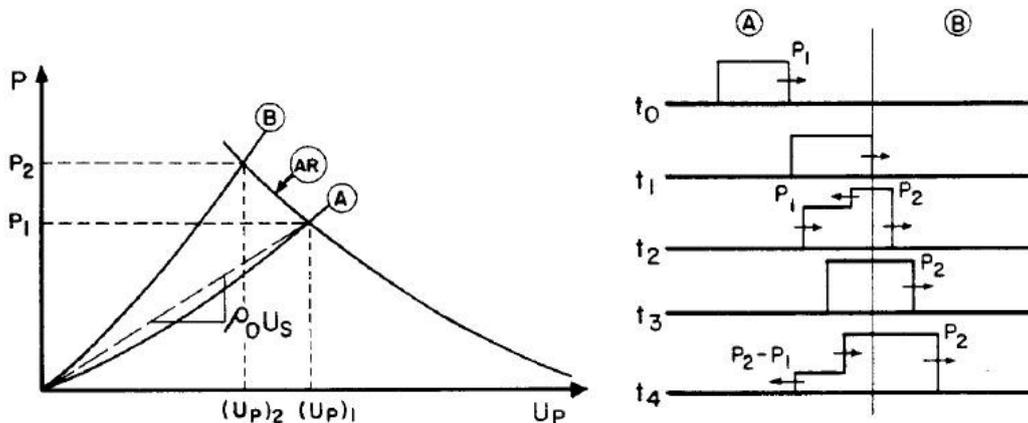


FIG.2.18 Transmissão da onda de choque de um meio de baixa impedância para um meio de alta impedância de choque: (a) Gráfico pressão versus velocidade da partícula; (b) perfil de pressão.

(Fonte: Adaptado de MEYERS, 1994).

b) Transferência de uma onda de choque de um material A (alta impedância) para um material B (baixa impedância): É a situação inversa do caso (a), isto é, o material A (camada externa) é mais denso que o material B (camada intermediária), como é mostrado na FIG. 2.19. Neste caso, a pressão P_1 é maior que a pressão P_2 e no tempo t_4 (FIG. 2.19a), um pulso trativo será formado, propagando-se em ambas as direções, ou seja, tanto para dentro do material B como para o material A. Caso essa onda trativa tenha uma amplitude suficientemente alta, ocorrerá estilhaçamento do material (MEYERS, 1994).

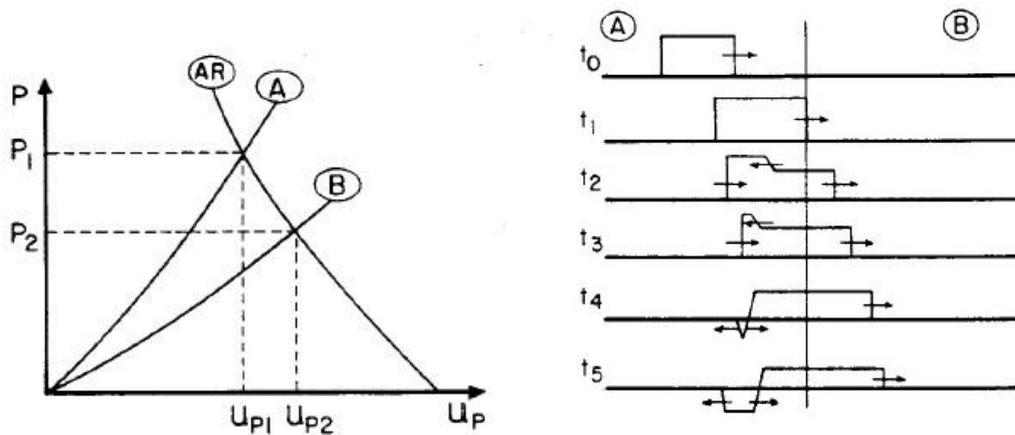


FIG. 2.19 Transferência da onda de choque de um meio com alta impedância para um meio com baixa impedância: (a) Gráfico pressão versus velocidade de partícula; (b) perfil de pressão. (Fonte: Adaptado de MEYERS, 1994).

2.7 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

A distribuição de Weibull é um método estatístico muito utilizado para cálculos de engenharia de confiabilidade e tem a vantagem de se adequar a diversos casos reais pelo ajuste de poucos parâmetros (ABERNETHY *et al.*, 1983; O'CONNOR & KLEYNER, 2012). A função de distribuição cumulativa de Weibull é dada pela EQ. 2.10.

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\theta}\right)^\beta\right] \quad \text{EQ 2.10}$$

Rearranjando-se a EQ 2.10, é obtida a EQ 2.11:

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

Onde:

θ → Unidade característica. Neste trabalho, esse parâmetro representa a indentação característica que corresponde a 63,3% de probabilidade do sistema de blindagem apresentar esta indentação (CARVALHO, 2007; VIEIRA, 2010);

β → Módulo de Weibull. Este valor controla a variação dos resultados e fornece uma avaliação da homogeneidade do material, quanto maior o seu valor, mais estreita é a distribuição dos valores medidos. Para corpos de elevada dispersão como as fibras lignocelulósicas, o valor do módulo de Weibull deve estar compreendido entre 0,5 e 15 (CARVALHO, 2007; VIEIRA, 2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 ALUMINA E NIÓBIA

A Alumina (Al_2O_3), cerâmica utilizada no presente trabalho, foi fornecida pela empresa nacional Treibacher Scheifmittel. Na TAB. 3.1 é mostrada a composição química fornecida pelo fabricante.

TAB. 3.1 Composição química da Alumina.

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

(Fonte: Adaptado de TRINDADE, 2012).

A Nióbia (Nb_2O_5), adicionada a Alumina no processo de sinterização, foi fornecida pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM). Na TAB. 3.2 é mostrada a composição química fornecida pelo fabricante.

TAB. 3.2 Composição química da Nióbia.

Elemento	Concentração (%)
Nb ₂ O ₅	99,5
Perda ao fogo	0,1

Elemento	Concentração (ppm)
Ta	745
Ti	240
Fe	136
Si	66

(Fonte: Adaptado de Trindade, 2012).

3.1.2 LIGANTE

O ligante orgânico Polietileno Glicol (PEG), utilizado para melhorar a conformação do pó cerâmico, foi fornecido pela empresa VETEC.

3.1.3 MANTA E TECIDO DE JUTA

No presente trabalho foi utilizado fibras de juta com configurações: manta e tecido. A manta foi fornecida pela firma brasileira SISALSUL, já o tecido foi fornecido pela Companhia Têxtil Castanhal do Pará. Na FIG. 3.1 são mostradas as configurações das fibras de juta.

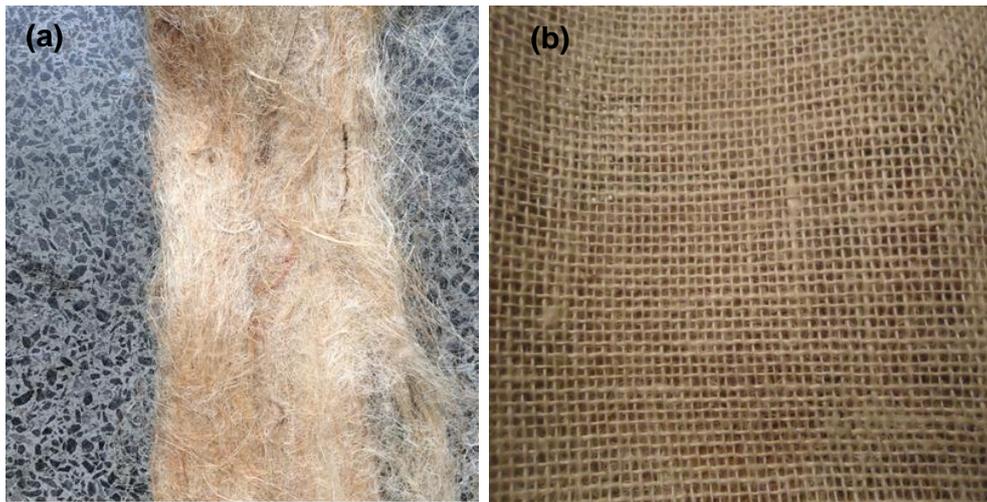


FIG. 3.1 Fibras de juta: (a) manta cardada; (b) tecido com trama simples.

3.1.4 RESINA POLIÉSTER

A matriz polimérica utilizada nos compósitos foi a resina poliéster cristal, fornecida pela empresa RESINPOXY. De acordo com o fornecedor, a resina é Ortoftálica, que deve ser misturada ao catalisador peróxido metil-etil-cetona (FIG. 3.2) na proporção de 1% em peso.



FIG. 3.2 Resina poliéster e o catalisador metil-etil-cetona.

Na TAB. 3.3 são mostradas algumas propriedades da resina poliéster, obtidas através da fornecedora RESINPOXY.

TAB. 3.3 Propriedades da resina poliéster.

Cor visual	Ponto de gel (25°C), min.	Teor de estireno (%)	Densidade (g/cm ³)
Incolor	9 - 15	33, máx.	1,1 - 1,2

3.1.5 PLACA DE ALUMÍNIO

As placas de alumínio 5052 H34 utilizadas nos ensaios foram adquiridas pela empresa METALAK METAIS, com dimensões 120 x 150 x 4,76 mm (FIG. 3.3). Os valores e especificações de resistência à tração (σ_T), limite de escoamento (σ_e), ductilidade ($\Delta L/L_0$) encontram-se na TAB. 3.4 e os de composição química são mostrados na TAB. 3.5.



FIG. 3.3 Placa de alumínio utilizada como camada interna da blindagem multicamada.

TAB. 3.4 Propriedades mecânicas da liga de Alumínio.

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

TAB. 3.5 Composição química do Alumínio.

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

3.1.6 COLA

Para a colagem das camadas, foi utilizada a cola de Cura Rápida (FIG. 3.4), da Marca ULTRAFLEX.



FIG. 3.4 Cola Cura Rápida, Marca ULTRAFLEX.

3.1.7 PLASTILINA

A plastilina trata-se de uma massa de modelar CORFIX® (FIG. 3.5 a, b), que é um produto não tóxico, não ressecante, inodora, de cor “branco 301”. O fabricante é a Indústria de Tintas CORFIX LTDA, localizada em Porto Alegre-RS. A massa para modelar (plastilina), disponível comercialmente, possui densidade aproximada de 1,07g/cm³. A plastilina tem como finalidade principal simular uma estrutura que tenha uma consistência similar a do corpo humano.

(a)



(b)

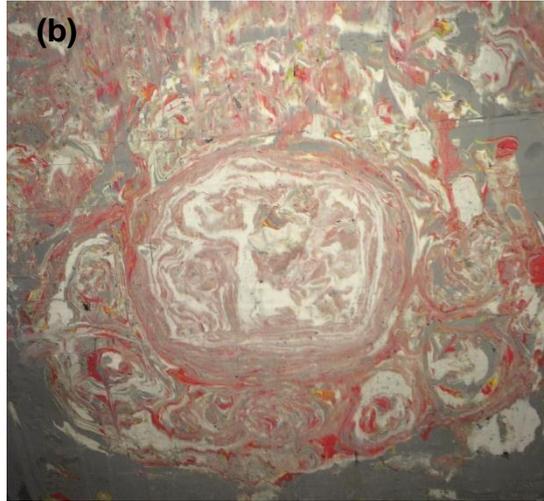


FIG. 3.5 (a) Massa de modelar CORFIX; (b) Suporte de tiro totalmente preenchido com a plastilina.

3.2 FABRICAÇÃO DAS PASTILHAS CERÂMICAS

3.2.1 OBTENÇÃO DO PÓ

Para a fabricação das pastilhas cerâmicas, inicialmente foi realizada a preparação da mistura de pós de Alumina (700g, 94,5%p), de Nióbia (29,15g, 3,94%p) e o ligante PEG líquido (11,3g, 1,53%p), em seguida foram misturados em um moinho com bolas de alumina, modelo MA 500 (FIG. 3.6), durante 8 horas.



FIG. 3.6 Moinho de bolas MARCONI MA500.

Após a moagem, a mistura foi colocada em estufa para secagem à temperatura de 60°C, durante 48 horas. Depois desta etapa, o pó foi desaglomerado em almofariz com pistilo e peneirado em uma peneira com abertura de 0,355 mm. Os equipamentos mencionados acima se encontraram disponíveis no laboratório de Cerâmica do IME.

3.2.2 PRENSAGEM

O pó cerâmico peneirado na quantidade de 100 g foi prensado em uma matriz hexagonal (FIG. 3.7). Uma carga de 12 toneladas, equivalente a 60 MPa foi aplicada, com o auxílio da prensa hidráulica semiautomática NOWAK (FIG. 3.8), disponível no laboratório de Fundição e Tratamentos Termomecânicos do IME.



FIG. 3.7 Matriz utilizada na moldagem dos corpos cerâmicos.



FIG. 3.8 Prensa hidráulica semiautomática NOWAK, com capacidade para 30 toneladas.

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

3.2.3 ETAPA DE SINTERIZAÇÃO

As pastilhas cerâmicas (corpos verdes) foram sinterizadas no forno INTI, modelo FE 1700 (FIG. 3.9). A rota de sinterização é especificada abaixo e já foi utilizada por outros autores (TRINDADE *et al.*, 2013; DA LUZ, 2014; BRAGA, 2015; DA CRUZ, 2015):

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

As três primeiras etapas dessa rota são responsáveis pela eliminação do ligante orgânico, sendo assim, a composição do material passou a ser: 96% de Alumina e 4% de Nióbia.



FIG. 3.9 Forno INTI FE 1700, utilizado na sinterização das pastilhas cerâmicas.

As placas cerâmicas resultantes deste processamento, utilizando matérias primas dos mesmos fornecedores, já tiveram suas propriedades físicas caracterizadas por outros autores (CHAGAS, 2014; GOMES, 2004; DA SILVA, 2014b; TRINDADE, 2012). Neste trabalho foram calculadas a densidade (EQ 3.1), a densificação (EQ 3.2) e retração linear (EQ 3.3) das pastilhas

cerâmicas, tendo como objetivo verificar se essas propriedades foram semelhantes com as dos outros autores.

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

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

Onde:

ρ → densidade teórica do material;

$\rho_{sinterizado}$ → densidade do corpo cerâmico sinterizado;

m → massa da amostra (g);

V → volume da amostra (cm³).

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

Onde

e_{verde} → espessura do corpo verde;

$e_{sinterizado}$ → é a espessura da amostra sinterizada.

3.3 FABRICAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Os compósitos reforçados com fibras e tecido de juta foram preparados nas proporções de 10%, 20% e 30% em volume, dez placas cada composição, totalizando sessenta corpos de prova.

A matriz utilizada para a prensagem das placas do compósito está apresentada na FIG. 3.10. As dimensões internas dessa matriz são de 12,8 cm x 15 cm, como as placas devem apresentar 1 cm de espessura, o volume final para a placa confeccionada é de 192 cm³. Como a fração volumétrica, de fibras em cada placa, variou de 10% a 30%, então, o volume ocupado foi de 19,2; 38,4 e 57,6 cm³. De acordo com a literatura (MONTEIRO *et al.*, 2011), a densidade utilizada para a fibra de juta foi de 1,3 g/cm³, logo, a quantidade de

massa, de fibras utilizadas, foi em torno de 24,9g para 10%, 48,9g para 20% e 74,8g para 30% . Para a resina poliéster, a densidade utilizada foi de 1,10g/cm³ e considerando a perda de resina na etapa de prensagem dos corpos de prova, foi utilizada uma massa de resina de 211,1g.



FIG. 3.10 Matriz metálica utilizada na preparação das placas de compósito poliéster-juta.

Para a preparação das placas foi necessário, primeiramente, cortar as fibras nas dimensões da matriz, gerando várias camadas de fibras (FIG. 3.11).

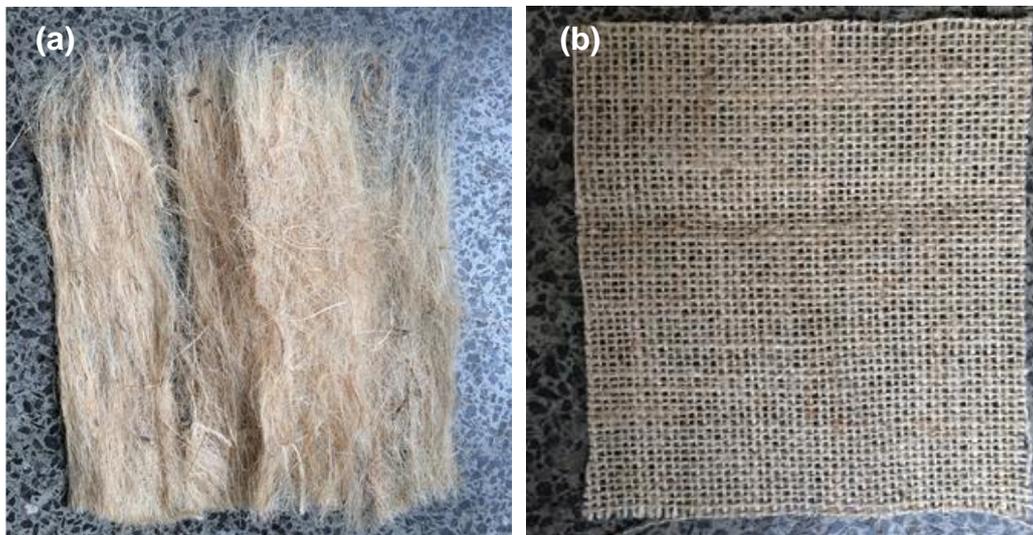


FIG. 3.11 Camada de fibra de juta: (a) manta; (b) tecido.

As etapas de preparo de cada placa do compósito são mostradas na FIG. 3.12. Após o acondicionamento dos componentes no interior da matriz, o conjunto foi prensado, utilizando a prensa SKAY de 15 toneladas, o qual foi

deixado sob pressão para curar à temperatura ambiente por um período de 24 horas.

Depois desta etapa, foi feita a extração da placa da matriz metálica e obtiveram-se as placas conforme apresentada nas FIG. 3.12(g) e FIG. 3.12(h).



FIG. 3.12 Etapas da preparação do material compósito: (a) matriz metálica, a fibra de juta, resina poliéster e catalisador; (b) as fibras dentro da matriz junto a resina poliéster ainda líquida; (c) matriz fechada; (d) prensagem da matriz metálica; (e) material compósito com a fibra de juta na configuração de manta (30% em volume); e (g) na configuração de tecido (30% em volume)

Esse procedimento foi repetido até que fossem obtidos um total 60 (sessenta) placas poliéster-juta, sendo 30 (trinta) preparadas com manta de juta e 30 (trinta) preparadas com tecido de juta, com variação volumétrica de 10%, 20% e 30%.

3.4 COLAGEM DAS CAMADAS

A preparação dos corpos de prova da blindagem multicamada foi realizada por meio da colagem das camadas de alumínio, do compósito poliéster-juta e da cerâmica, utilizando cola de cura rápida ULTRAFLEX, que não interfere nos testes. Na FIG. 3.13 é mostrado o esquema de montagem de uma blindagem multicamada e o corpo de prova final obtido.

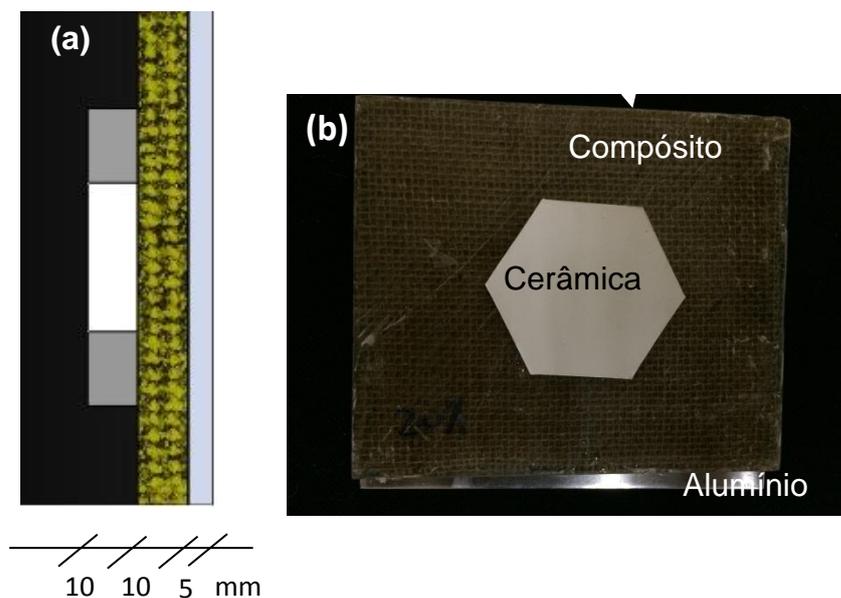


FIG. 3.13 Blindagem multicamada: (a) Diagrama esquemático; (b) corpo de prova final utilizado nos ensaios balísticos.

3.5 ENSAIO BALÍSTICO

O ensaio balístico tem por objetivo verificar a capacidade de um material ou equipamento absorver a energia cinética de um projétil de alta velocidade. No presente trabalho foram avaliadas tanto as blindagens multicamada (FIG. 3.11) como os materiais da camada intermediária individualmente (seção 2.1). Para isto, foram realizados ensaios para a avaliação do nível da proteção balística alcançada pela blindagem multicamada, por medida da deformação provocada na plastilina pelo disparo (ensaio de deformação na plastilina) e ensaios para avaliar a perda de energia do projétil no impacto com o material da camada intermediária (ensaio de velocidade residual). Os ensaios foram realizados na unidade CAEx (Centro de Avaliações do Exército) que fica localizada na península de Marambaia no Rio de Janeiro. Todos os ensaios obedeceram à norma NIJ 0101.06 (2008), no qual foram utilizados projéteis com calibre 7,62 x 51 mm. Na FIG. 3.14 é mostrado esquematicamente o sistema utilizado para a realização desses ensaios.

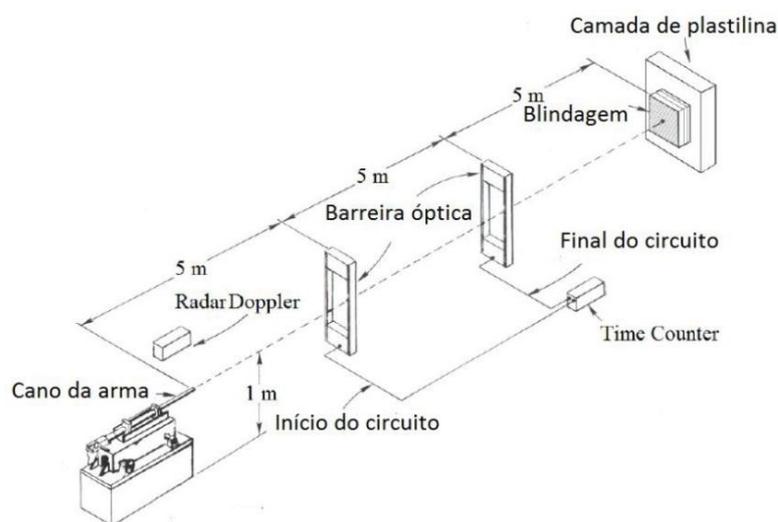


FIG. 3.14 Esquema do sistema utilizado para os ensaios balísticos.
(Fonte: DA SILVA, 2014b)

As medições da velocidade do projétil foram realizadas através de uma barreira óptica e um sistema de radar Doppler (FIG. 3.15), modelo SL-520P, fabricante WEIBEL.



FIG. 3.15 Radar Doppler

As condições gerais dos ensaios foram:

a) Munição: calibre 7,62 mm x 51 mm, conforme é fornecida comercialmente ao Exército. O seu projétil tem uma massa de 9,7 gramas (FIG. 3.16);



FIG. 3.16 Munição calibre 7,62 x 51 mm.

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

c) Ângulo de incidência no alvo: 90°;

d) Quantidade de tiros para cada grupo de corpos de prova: 8 (oito) disparos, para que a estatística de Weibull possa ser aplicada. Os grupos se diferenciam pelo material da camada intermediária, como mostrado na TAB. 3.6.

TAB. 3.6 Tipo e designação dos corpos de prova para os ensaios balísticos.

Tipo de camada intermediária	Designação
Compósito poliéster com 10% de manta de Juta	CPM-10%
Compósito poliéster com 20% de manta de Juta	CPM-20%
Compósito poliéster com 30% de manta de Juta	CPM-30%
Compósito poliéster com 10% de tecido de Juta	CPT-10%
Compósito poliéster com 20% de tecido de Juta	CPT-20%
Compósito poliéster com 30% de tecido de Juta	CPT-30%

e) Local: Centro de Avaliações do Exército (CAEx), linha de tiro IV, destinada aos testes que empregam armas e munições até o calibre .50". Para estes ensaios foi utilizado um provete calibre 7,62 x 51 mm (FIG. 3.17a) e um dispositivo de fixação do alvo (FIG. 3.17b).

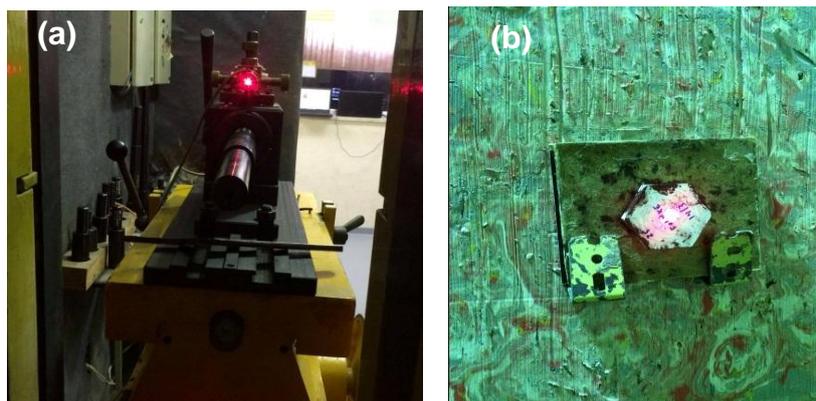


FIG. 3.17 (a) Provete calibre com mira a laser; (b) alvo posicionado na plastilina.

O critério adotado neste trabalho para a caracterização da eficiência balística foi à medida da maior profundidade da deformação na massa de plastilina após o impacto. Foi considerado eficiente o valor igual ou menor a 44 mm, conforme prevê a norma americana NIJ 0101.06 (2008).

No ensaio de velocidade residual, os compósitos poliéster-juta foram fixados em um suporte (FIG. 3.18) e com o auxílio do radar Doppler foi medida a velocidade do projétil antes e após o impacto. Com os dados fornecidos pelo Doppler, foi possível calcular a energia do projétil e estimar a velocidade limite pelas EQ 2.1 e EQ 2.2. As condições gerais para este ensaio foram as mesmas que no ensaio de deformação na plastilina.



FIG. 3.18 Dispositivo de fixação das placas no ensaio de velocidade residual utilizado para fixar um compósito reforçado com manta de juta.

3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Após o ensaio balístico, com o objetivo de identificar os mecanismos de absorção de energia dos materiais da blindagem multicamada, foi realizada avaliação microscópica dos fragmentos com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) FEI Quanta FEG 250 (FIG. 3.19), utilizando elétrons secundários.



FIG. 3.19 Microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta FEG 250.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENSAIO DE DEFORMAÇÃO NA PLASTILINA

4.1.1 DESEMPENHO BALÍSTICO DA PRIMEIRA CAMADA: PASTILHA CERÂMICA

A pastilha cerâmica, primeira camada do sistema de blindagem multicamada, segundo DA SILVA (2014b), é responsável por absorver 55,1% da energia total proveniente do projétil. Em todos os ensaios balísticos realizados neste trabalho, a pastilha cerâmica sofreu estilhaçamento completo, como ilustrado na FIG. 4.1.



FIG. 4.1 Sistema de blindagem multicamada após o disparo da munição de calibre 7,62x51 mm:
(a) Tecido e (b) manta de juta.

As propriedades de densidade, densificação e retração linear das pastilhas cerâmicas são mostradas na TAB. 4.1, com intuito de verificar a qualidade do processamento e metodologia utilizados para confecção das mesmas. No total foram produzidas 48 pastilhas. Pode-se notar que os valores obtidos foram próximos aos valores dos autores DA LUZ (2014), ARAÚJO (2015) e DA CRUZ (2015), que obtiveram em média 87,65% de densificação, 3,46 g/cm³ de densidade e 12,59% de retração linear. Isto constatando que a metodologia e o processamento foram corretos.

TAB. 4.1 Propriedades das cerâmicas sinterizadas.

Densidade (g/cm ³)	Retração Linear (%)	Densificação (%)
3,45 ± 0,06	16,21 ± 0,62	83,96 ± 1,60

Assim como relatado pelos autores, citados acima, e por GOMES (2004), a fratura da cerâmica foi predominantemente intergranular (FIG. 4.2), devido à adição de 4% de nióbia. Esse óxido de nióbio reage com o óxido de alumínio e forma precipitados (AlNbO₄) nos contornos de grão da alumina, fragilizando-os, modificando o mecanismo de fratura de transgranular para intergranular. Isto aumentando a absorção de energia de impacto.

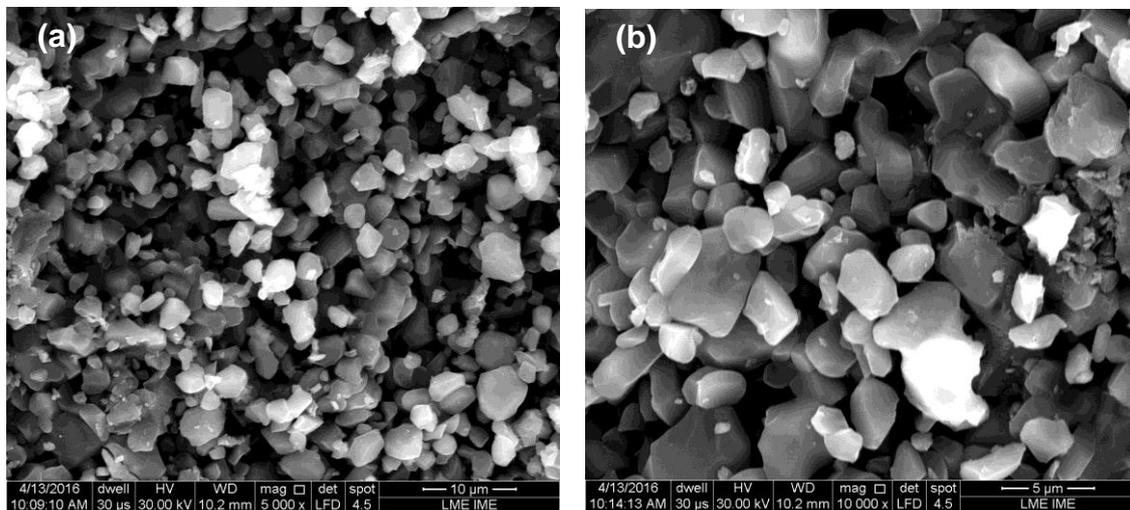


FIG. 4.2 Imagem microscópica da cerâmica fraturada: (a) 5000X e (b) 10000X.

4.1.2 DESEMPENHO BALÍSTICO DA CAMADA INTERMEDIÁRIA: COMPÓSITO POLIÉSTER-JUTA

As blindagens multicamada confeccionadas neste trabalho foram testadas seguindo as especificações da norma NIJ 0101.06 (2008). As fibras de juta utilizadas na camada intermediária do sistema de blindagem foram usadas em duas configurações distintas: manta e tecido; conforme ilustrado na FIG. 4.3. Os compósitos de matriz poliéster foram preparados com diferentes frações volumétricas (10%, 20% e 30%).

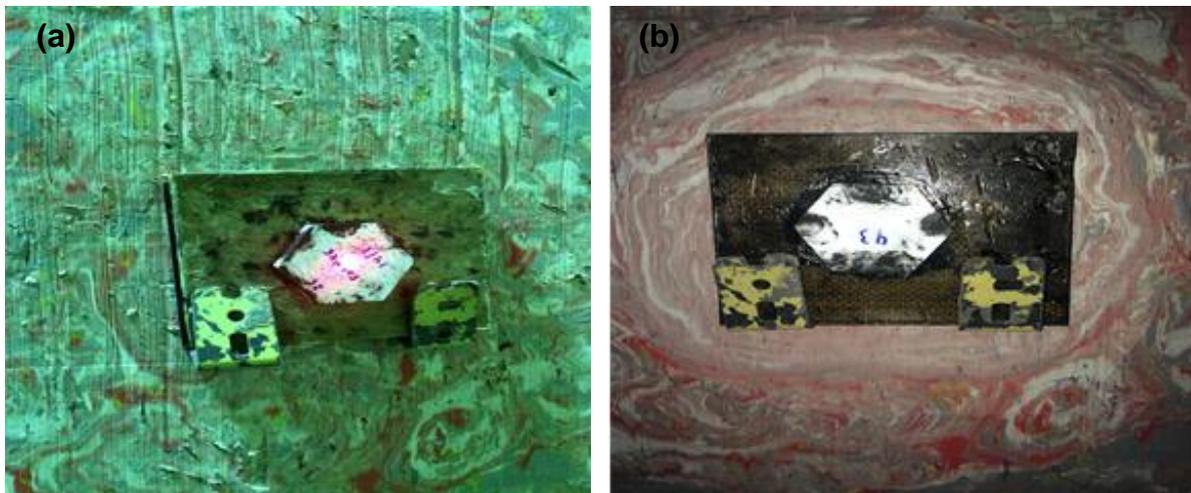


FIG. 4.3 Blindagem multicamada utilizando como camada intermediária compósito poliéster-juta: (a) Manta e (b) tecido.

Para o ensaio de deformação na plastilina, foram utilizados 48 corpos de prova, sendo 24 com o compósito reforçado com manta de juta (8 corpos para cada composição) e 24 com o compósito reforçado com tecido de juta (8 corpos para cada composição). Na FIG. 4.4 são mostrados os sistemas de blindagem com compósito poliéster reforçado com 10% de fibras de juta.

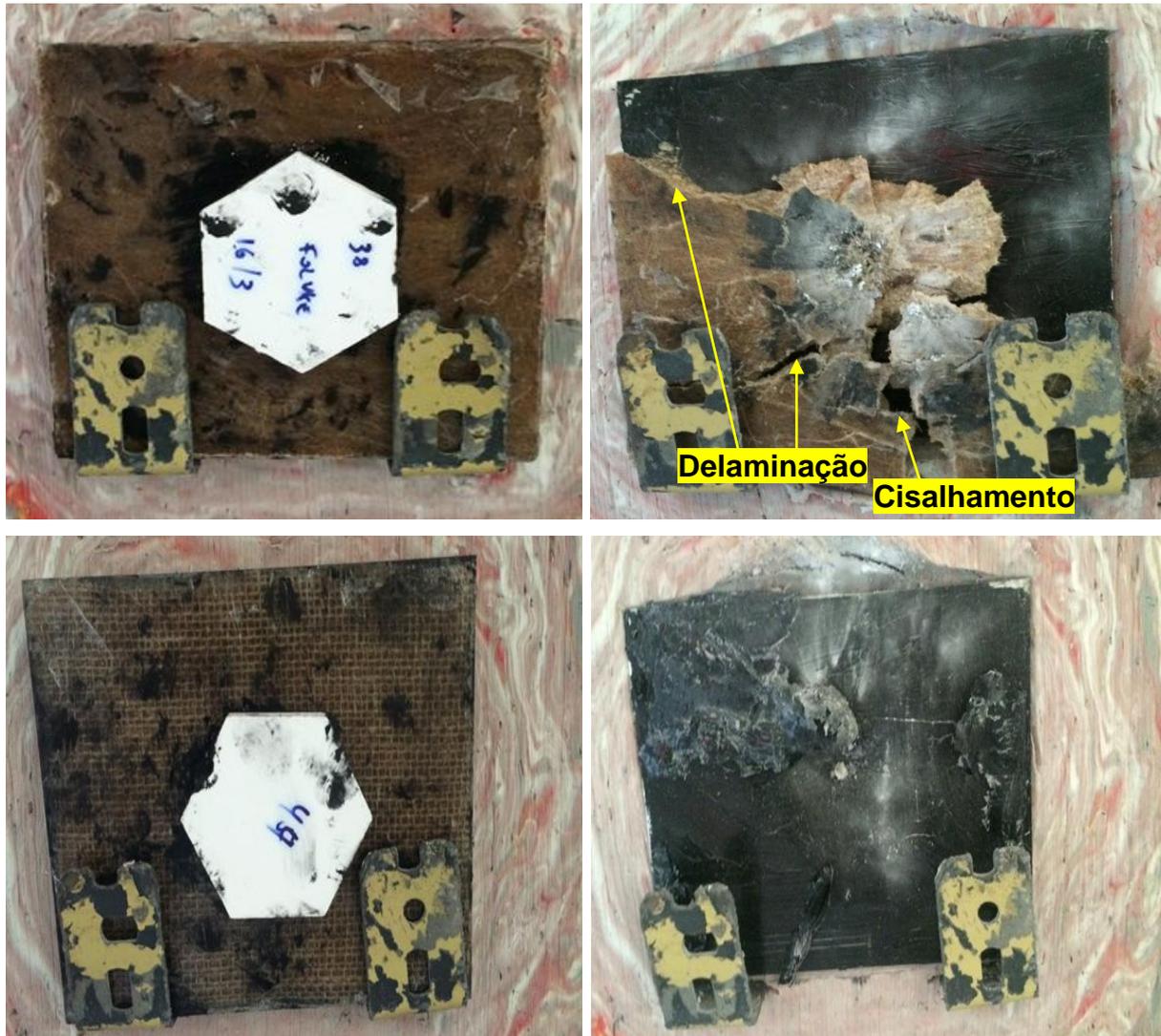


FIG. 4.4 Blindagem multicamada com compósito poliéster-juta (10%), como camada intermediária, na configuração manta e tecido, antes e após ensaio balístico.

Conforme observado na FIG. 4.4, os sistemas de blindagem multicamada com compósito de poliéster reforçado com 10% de fibras de juta, tanto na configuração de manta como de tecido, não apresentaram perfuração do projétil, ou seja, os sistemas de blindagem absorveram sua energia cinética. Aparentemente, o sistema que possui como camada intermediária o compósito poliéster-juta na configuração tecido apresentou maior dissipação de energia, pois esta camada foi completamente destruída após o impacto balístico. No entanto, só com a análise visual, não se pode afirmar que os sistemas (tanto a configuração manta como tecido) atenderam a norma americana NIJ 0101.06 (2008) que determina a deformação na plastilina menor ou igual a 44 mm. Na FIG. 4.5 são mostrados os sistemas de blindagem com compósito de poliéster reforçado com 20% de fibras de juta.

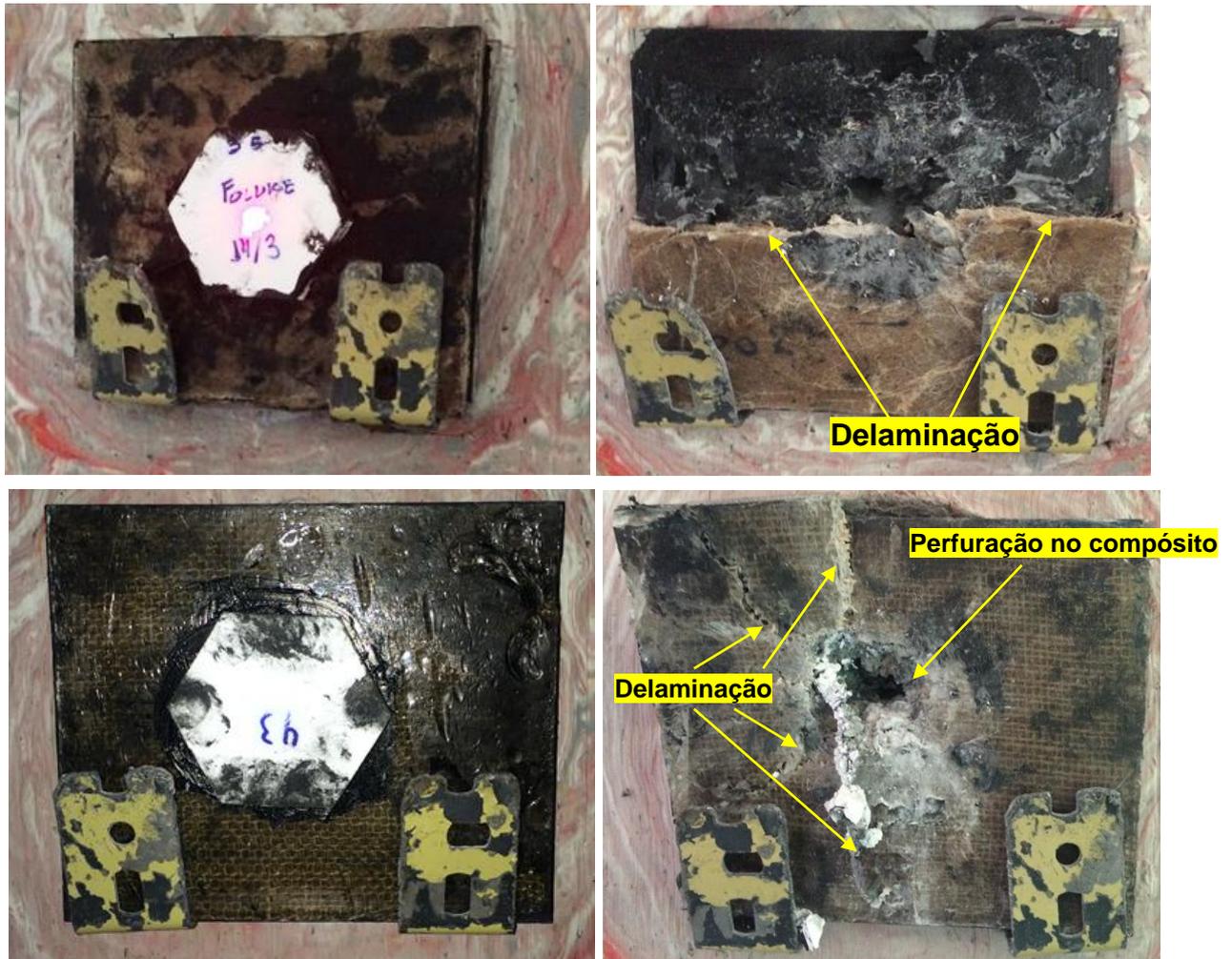


FIG. 4.5 Blindagem multicamada com compósito poliéster-juta (20%), como camada intermediária, na configuração manta e tecido, antes e após ensaio balístico.

Analisando visualmente, os sistemas de blindagem contendo como camada intermediária o compósito poliéster reforçado com 20% de fibras de juta não apresentaram perfuração do projétil. Para o sistema de blindagem com compósito poliéster-juta na configuração de manta, a camada intermediária sofreu fragmentação em duas partes, sendo que a separação das partes foi completa, em sua maioria. O compósito poliéster-juta na configuração de tecido apresentou maior dissipação de energia, pois esse sistema apresentou maior número de regiões de delaminação. Além disto tem maior quantidade de fragmentos capturados, no entanto, o projétil perfurou esta camada que ocasionou uma maior deformação na plastilina. Na FIG. 4.6 são mostrados os sistemas de blindagem com compósito de poliéster reforçado com 30% de fibras de juta.

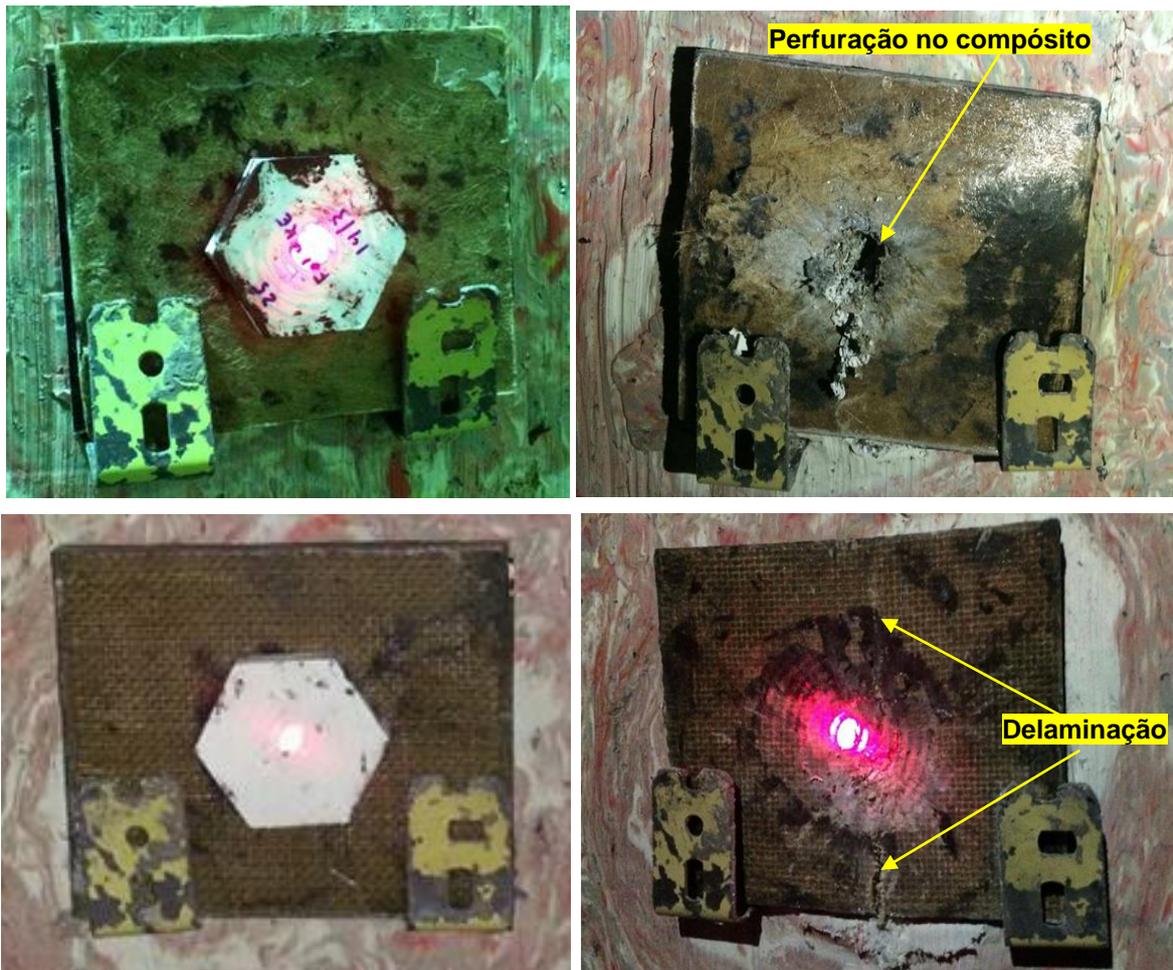


FIG. 4.6 Blindagem multicamada com compósito poliéster-juta (30%), como camada intermediária, na configuração manta e tecido, antes e após ensaio balístico.

Os sistemas de blindagem contendo como camada intermediária o compósito poliéster reforçado com 30% de fibras de juta não apresentaram perfuração do projétil e não houve desfragmentação dos compósitos, permanecendo coesos. Na configuração manta, o projétil perfurou a camada enquanto que a configuração tecido, não houve a perfuração, porém foi observada a propagação de trincas que se estenderam até a borda do compósito.

Através do ensaio de deformação na plastilina (FIG. 4.7), são apresentadas as TAB. 4.1, TAB. 4.2 e TAB.4.3 que mostram os valores obtidos para a profundidade de indentação para os diferentes sistemas de blindagem multicamada estudados, bem como a velocidade de cada projétil, a energia de impacto, o tipo de camada intermediária e sua espessura. Na TAB. 4.4 são mostrados os valores médios obtidos no ensaio balístico.

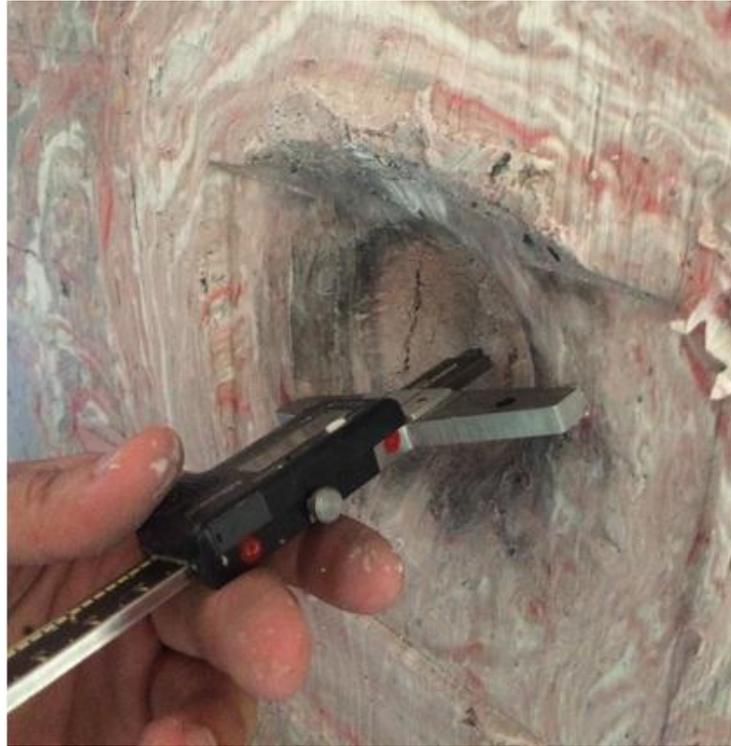


FIG. 4.7 Medição da profundidade de indentação causada na plastilina após o ensaio balístico.

TAB. 4.2 Profundidade da indentação na plastilina, espessura, velocidade de impacto e energia de impacto para as blindagens multicamada com poliéster-juta(10%).

Blindagem Multicamada	Camada Intermediária	Espessura do Compósito (mm)	Indentação (mm)	Velocidade de Impacto (m/s)	Energia de Impacto (kJ)
1	CPM-10%	10,79	17,97	851,61	3,52
2	CPM-10%	11,10	15,81	849,87	3,50
3	CPM-10%	11,26	14,61	847,21	3,48
4	CPM-10%	11,95	26,78	857,12	3,56
5	CPM-10%	10,45	31,34	843,45	3,45
6	CPM-10%	11,32	24,57	849,22	3,50
7	CPM-10%	11,78	20,81	854,45	3,54
8	CPM-10%	10,79	34,27	853,40	3,53
9	CPT-10%	11,06	15,33	854,70	3,54
10	CPT-10%	11,01	17,47	846,60	3,48
11	CPT-10%	10,87	23,13	852,77	3,53
12	CPT-10%	10,30	14,66	845,63	3,47
13	CPT-10%	10,49	19,36	848,92	3,50
14	CPT-10%	10,45	21,74	853,75	3,54
15	CPT-10%	10,42	19,20	853,46	3,53
16	CPT-10%	10,69	18,14	852,70	3,53

TAB. 4.3 Profundidade da indentação na plastilina, espessura, velocidade de impacto e energia de impacto para as blindagens multicamada com poliéster-juta(20%).

Blindagem Multicamada	Camada Intermediária	Espessura do Compósito (mm)	Indentação (mm)	Velocidade de Impacto (m/s)	Energia de Impacto (kJ)
1	CPM-20%	12,34	17,91	843,49	3,45
2	CPM-20%	10,22	32,38	850,05	3,50
3	CPM-20%	10,65	26,21	848,07	3,49
4	CPM-20%	11,46	22,02	855,07	3,55
5	CPM-20%	12,10	16,73	859,00	3,58
6	CPM-20%	12,93	25,78	844,92	3,46
7	CPM-20%	12,41	24,45	858,18	3,57
8	CPM-20%	12,13	25,14	846,02	3,47
9	CPT-20%	11,06	27,11	848,50	3,49
10	CPT-20%	11,17	21,60	849,87	3,50
11	CPT-20%	11,42	24,38	855,25	3,55
12	CPT-20%	10,12	25,37	850,77	3,51
14	CPT-20%	10,15	24,47	847,21	3,48
15	CPT-20%	11,40	20,89	848,57	3,49
16	CPT-20%	10,00	21,01	869,19	3,66

TAB. 4.4 Profundidade da indentação na plastilina, espessura, velocidade de impacto e energia de impacto para as blindagens multicamada com poliéster-juta(30%).

Blindagem Multicamada	Camada Intermediária	Espessura do Compósito (mm)	Indentação (mm)	Velocidade de Impacto (m/s)	Energia de Impacto (kJ)
1	CPM-30%	11,41	29,33	862,55	3,61
2	CPM-30%	11,83	16,20	860,92	3,59
3	CPM-30%	10,85	25,91	854,88	3,54
4	CPM-30%	11,42	37,54	867,23	3,65
5	CPM-30%	12,82	27,58	849,51	3,50
6	CPM-30%	12,45	14,53	843,74	3,45
7	CPM-30%	12,20	32,20	845,56	3,47
8	CPM-30%	12,15	21,39	835,70	3,39
9	CPT-30%	10,71	14,56	848,85	3,49
10	CPT-30%	10,82	18,07	853,64	3,53
11	CPT-30%	10,62	18,99	855,42	3,55
12	CPT-30%	10,05	17,86	850,77	3,51
13	CPT-30%	10,49	17,34	853,15	3,53
14	CPT-30%	10,85	20,27	856,79	3,56
15	CPT-30%	10,59	15,93	852,95	3,53
16	CPT-30%	10,49	19,86	855,28	3,55

TAB. 4.5 Médias dos valores obtidos dos ensaios balísticos.

Camada Intermediária	Espessura Média (mm)	ρ média (g/cm³)	Indentação Média (mm)	Velocidade de Impacto Média (m/s)	Energia de Impacto Média (kJ)
CPM-10%	11,18	1,14	23,32	850,74	3,51
CPM-20%	12,24	1,15	23,79	852,24	3,50
CPM-30%	11,99	1,16	25,67	851,31	3,52
CPT-10%	12,30	1,16	18,57	853,54	3,53
CPT-20%	11,81	1,15	23,32	851,76	3,50
CPT-30%	10,61	1,17	17,80	853,08	3,53

Todos os sistemas de blindagem multicamada (TAB. 4.5) estudados neste trabalho atenderam a norma NIJ 0101.06 (2008), ou seja, obtiveram uma profundidade de indentação inferior a 44 mm. Foi possível observar que as camadas intermediárias apresentaram variações em sua espessura, porém não se pode afirmar se há ou não uma tendência definida do aumento ou redução da profundidade de indentação. Isto se deve ao fato de que a velocidade de impacto do projétil também sofreu variação durante o ensaio balístico, variando a energia absorvida pelo sistema de blindagem. Na TAB. 4.6 são mostrados os parâmetros de Weibull e na FIG. 4.8 são mostrados os gráficos de Weibull.

TAB. 4.6 Parâmetros de Weibull obtidos das indentações das blindagens multicamadas.

Blindagem Multicamada	Módulo de Weibull (β)	Indentação Característica (θ)	Coefficiente de Correlação (R^2)	Indentação Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
CPM-10%	3,38	25,76	0,9462	23,32	7,61
CPT-10%	6,81	19,88	0,9573	18,57	3,22
CPM-20%	4,93	25,93	0,9383	23,79	5,52
CPT-20%	9,29	24,59	0,9430	23,32	3,01
CPM-30%	3,25	28,64	0,9696	25,67	8,69
CPT-30%	9,76	18,73	0,9873	17,80	2,19

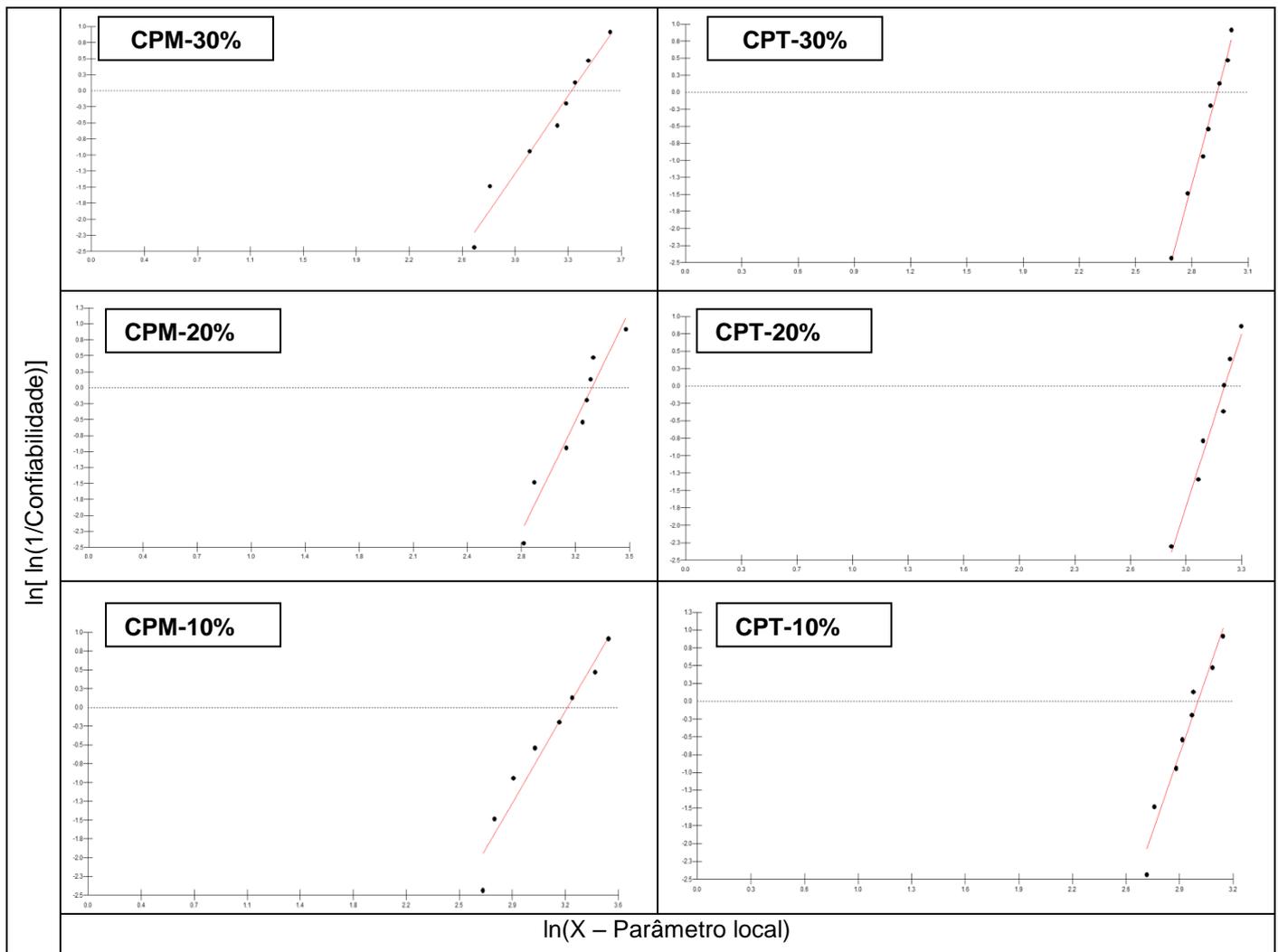


FIG. 4.8 Gráficos de distribuição de Weibull para o sistema de blindagem multicamada contendo como camada intermediária o compósito poliéster-juta.

Para mesma fração volumétrica de fibras de juta no compósito, a configuração tecido apresentou os melhores resultados para os ensaios balísticos em comparação com a configuração manta. Isso pode ser explicado devido à propriedade de tenacidade dos compósitos reforçados com fibras serem influenciados pelo arranjo geométrico das mesmas. Na configuração tecido, a absorção da energia de impacto é bastante influenciada pelo entrelaçamento das fibras, pois as regiões de encontro dos fios da trama atuam como ponto de reflexão e divergência das ondas de choque, proporcionando a distribuição de tensões em varias frentes de trincas de delaminação e, por consequência maior absorção da energia de impacto (HOSUR *et al.*, 2004).

A partir da análise de Weibull (TAB. 4.6), para blindagem com compósitos poliéster-juta na configuração manta, os valores das médias da profundidade de indentações, levando-se em conta o desvio padrão, não evidenciaram uma diferença significativa (23,32 mm, 23,79 mm e 25,67 mm). Já para configuração tecido, embora se tenha os valores de indentações próximos (18,57 mm, 23,32 mm e 17,80 mm), foi observado a variação na predominância do mecanismo de absorção de energia. O compósito reforçado com 10% de juta predominou o mecanismo de fratura frágil da matriz poliéster, devido à baixa porcentagem de fibras, desfragmentando completamente a camada intermediária. Para o compósito reforçado com 30% de juta predominou a propagação de trincas de delaminação, não havendo destruição do compósito, permanecendo coeso.

O coeficiente de correlação (R^2), que indica o grau de precisão da análise estatística, apresentou um valor superior a 0,9 para todos os modelos estudados. Para os compósitos poliéster-juta na configuração manta, todas as frações volumétricas, apresentaram um valor considerável no desvio padrão da indentações média (7,61 mm; 5,52 mm; 8,69 mm). Isso pode ser explicado devido à heterogeneidade das fibras naturais lignocelulósicas, inclusive a fibra de juta que apresenta variações em suas propriedades mecânicas (SATYANARAYANA *et al.*, 2007; MONTEIRO *et al.*, 2011).

O sistema de blindagem com poliéster-juta (30%) na configuração tecido apresentou uma maior homogeneidade em comparação com os outros modelos estudados. Isto se deve ao fato de que o seu módulo de Weibull (β) foi o mais elevado (9,76), e quanto maior o valor deste parâmetro, menor a dispersão dos valores de indentações e mais confiáveis são os resultados.

Nas FIG. 4.9 e FIG. 4.10 são mostrados os gráficos de profundidade de indentações característica (θ), parâmetro que melhor representa o grupo de amostras, em função da variação volumétrica de fibras de juta, para as duas configurações.

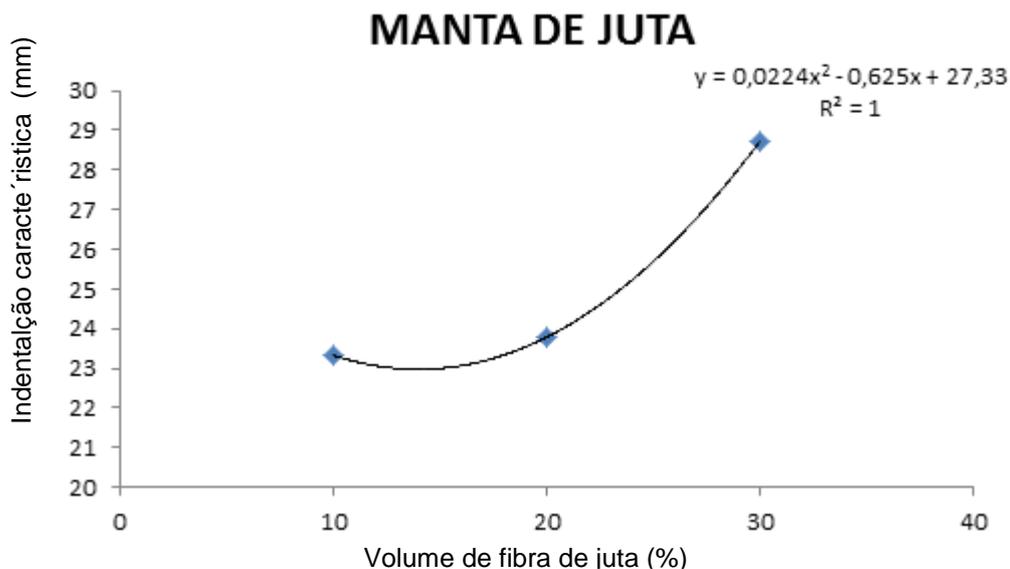


FIG. 4.9 Variação da indentação característica em função da fração volumétrica de fibra de juta.

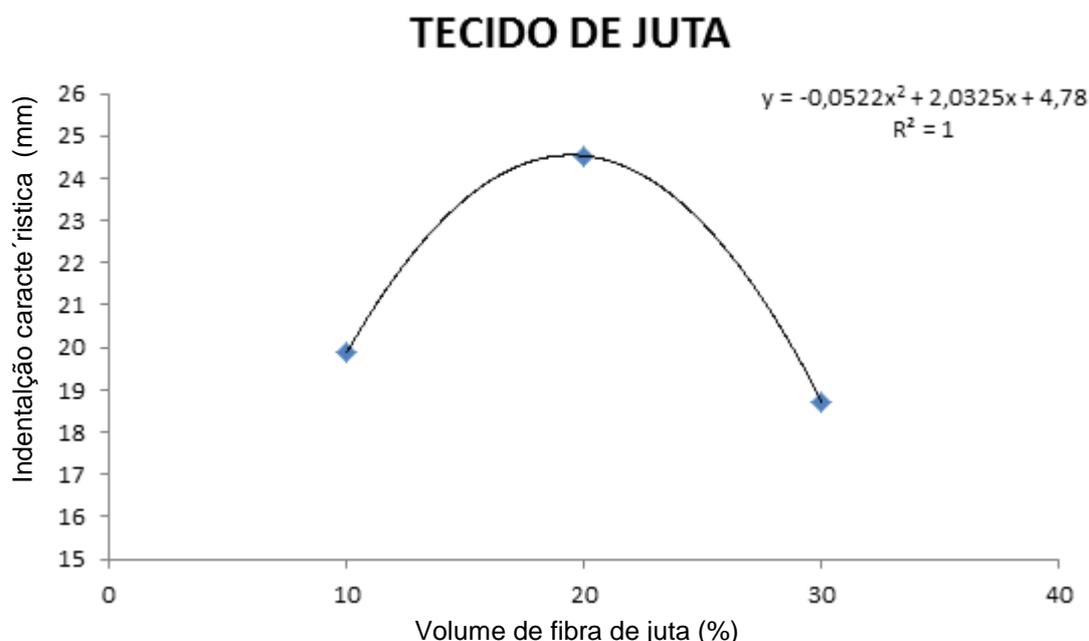


FIG. 4.10 Variação da indentação característica em função da fração volumétrica de fibra de juta.

Com a análise dos gráficos (FIG. 4.9 e FIG. 4.10), evidencia-se que os sistemas de blindagem tendo compósito poliéster-juta, tanto na configuração manta como tecido, apresentaram o comportamento parabólico ($R^2 = 1$) com sentidos opostos. A configuração tecido (FIG. 4.10) com 20% de juta apresentou um valor de indentação característica máxima sendo que, à medida que se distancia dessa porcentagem,

tanto para mais quanto para menos, o seu valor tende a diminuir. Contudo, o mecanismo predominante de absorção de energia variou como discutido anteriormente. Para configuração manta (FIG. 4.9), o menor valor de indentação característica se encontra na faixa entre 10% e 20% e, à medida que se distancia dessa faixa, o valor de indentação característica aumenta. Para valores de acima de 30% de juta, a confecção dos corpos de prova se tornaria mais complicada, principalmente pela dificuldade em molhar todas as fibras de juta, ocasionando redução das propriedades mecânicas.

Outros autores (DA SILVA, 2014b; DA LUZ, 2014; ARAÚJO, 2015; DA CRUZ, 2015) trabalharam com blindagem multicamada utilizando como camada intermediária um compósito polimérico reforçado com fibras naturais, porém utilizando a fração volumétrica de 30%. Na TAB. 4.7 são mostrados os valores obtidos deste trabalho (apenas 30% de fibra de juta) em conjunto com os trabalhos de outros autores.

TAB. 4.7 Médias dos valores obtidos nos ensaios balísticos.

Camada Intermediária	Espessura Média (mm)	ρ Média (g/cm³)	Indentação Média (mm)	Velocidade de Impacto Média (m/s)	Energia de Impacto Média (kJ)	Referências
Poliéster-juta (manta)	11,99	1,16	25,67	851,31	3,52	*PT
Poliéster-juta (tecido)	10,61	1,17	17,80	853,08	3,53	*PT
Epóxi-juta (manta)	15,00	1,16	17,51	826,77	3,32	DA LUZ, 2014
Epóxi-juta (tecido)	11,42	1,17	20,67	833,81	3,37	DA LUZ, 2014
Aramida	10,00	1,40	22,67	835,72	3,39	DA LUZ, 2014
Epóxi-bambu (fibra)	10,99	0,99	17,58	825,01	3,30	DA CRUZ, 2015
Epóxi-bambu (plaquetas)	11,07	0,96	18,68	827,7	3,32	DA CRUZ, 2015
Epóxi-sisal (fibra)	11,63	1,1	18,17	822,21	3,28	ARAÚJO, 2015
Epóxi-sisal (tecido)	11,73	1,14	16,03	827,95	3,32	ARAÚJO, 2015
Epóxi-curauá	-	1,15	16,42	874,09	-	DA SILVA, 2014b

*PT: Presente trabalho.

Os compósitos poliméricos (poliéster ou epóxi) reforçados com fibras de juta na configuração tecido apresentaram valores próximos de indentação média, 17,80 mm (matriz poliéster) e 20,67 mm (matriz epóxi), levando uma leve vantagem o compósito poliéster-juta. O mesmo não aconteceu para configuração manta, 25,67 mm (matriz poliéster) 17,51 mm (matriz epóxi). Segundo DA LUZ (2014), teve-se uma variação da espessura do compósito epóxi-juta em virtude do aprisionamento de ar durante a confecção da placa resultante do material poroso e essa porosidade age como uma barreira adicional, o que auxilia na absorção da energia de impacto gerada pelo projétil.

Em relação à aramida (22,67 mm) (DA LUZ, 2014), estatisticamente o compósito poliéster-juta, em ambas as configurações e frações volumétricas, apresentaram desempenho balístico próximos, com exceção as fração volumétrica de 10% (18,57 mm) e 30% (17,80 mm) de tecido de juta. Este fato pode ser explicado devido ao mecanismo de fratura frágil da matriz poliéster para fração de 10%. Com 30% de juta, essa fração ocasionou uma melhor distribuição das tensões em varias frentes de trincas de delaminação.

Os compósitos poliéster-juta na configuração tecido obtiveram um desempenho balístico (17,80 mm), levando em conta a profundidade de indentação, inferior ao compósito epóxi-curauá (16,42 mm), epóxi-sisal-tecido (16,03 mm) e epóxi-bambu-fibra (17,58 mm), porém demonstraram melhor desempenho balístico em relação ao compósito epóxi-sisal-fibra (18,17 mm), epóxi-bambu-plaquetas (18,68 mm).

4.2 ENSAIO DE VELOCIDADE RESIDUAL

Com intuito de verificar somente a resistência balística dos compósitos de poliéster reforçados com fibras de juta (FIG. 4.11), nas configurações tecido e manta, com as diferentes frações volumétricas (10%, 20%, 30%), foi realizado o ensaio de velocidade residual (seção 3.5), que tem como finalidade medir a velocidades de impacto e residual do projétil, captados pelo radar Doppler, sendo possível determinar a energia absorvida (E_{abs}) e a velocidade limite (V_L) de cada amostra, utilizando as EQ 2.1 e EQ 2.2. Um detalhe importante, todas as amostras foram perfuradas, conforme é ilustrado na FIG. 4.11 (b; d).

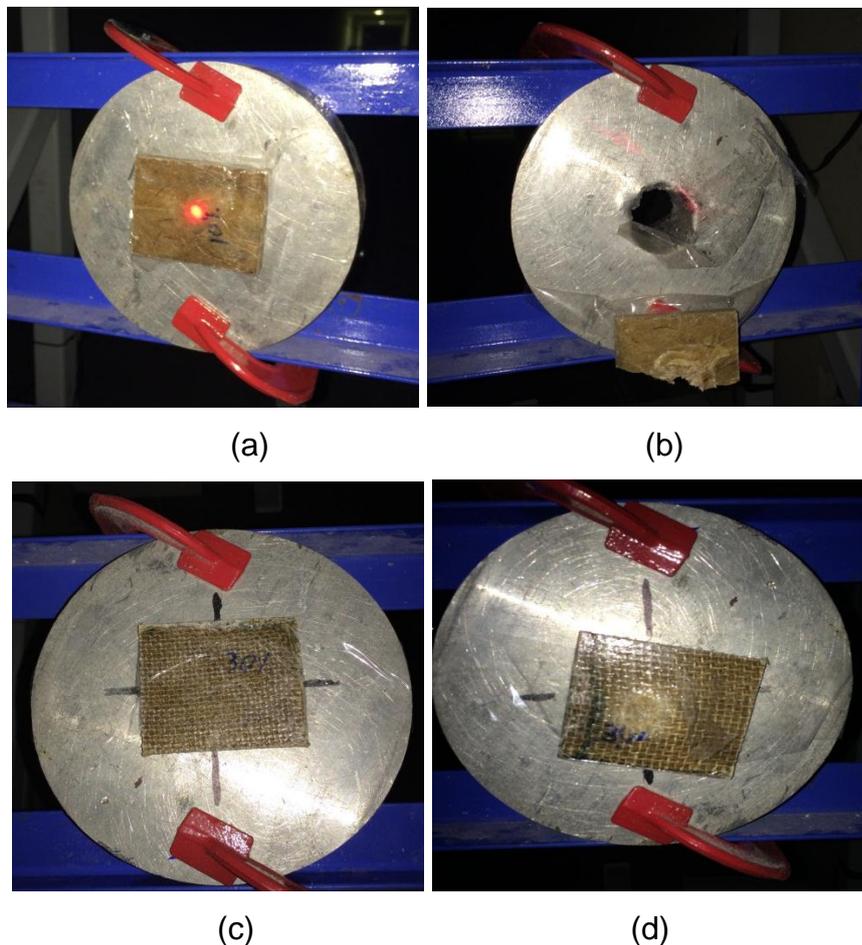


FIG. 4.11 Ensaio de velocidade residual nos compósitos poliéster-juta: (a, c) Antes e (b, d) após o impacto do projétil.

Os pontos experimentais obtidos a partir do espectro de radar Doppler de um corpo de prova do compósito poliéster-juta e a curva polinomial contínua ajustada são mostrados na FIG. 4.12. É possível notar que aproximadamente 840m/s ocorre uma queda abrupta de velocidade que indica o momento de impacto no alvo. Essa velocidade é definida como velocidade de impacto (V_i) e a velocidade mínima atingida nessa queda é a velocidade residual (V_r). Gráficos semelhantes foram obtidos para o compósito poliéster com tecido de juta e o compósito poliéster com manta de juta. Com base nos dados extraídos desses gráficos pôde-se determinar a velocidade limite (V_L) para os compósitos poliéster-juta (TAB. 4.8). São apresentados os resultados de outros autores (DA SILVA, 2014b; DA LUZ, 2014; ARAÚJO, 2015; DA CRUZ, 2015; BRAGA, 2015) para fins comparativos.

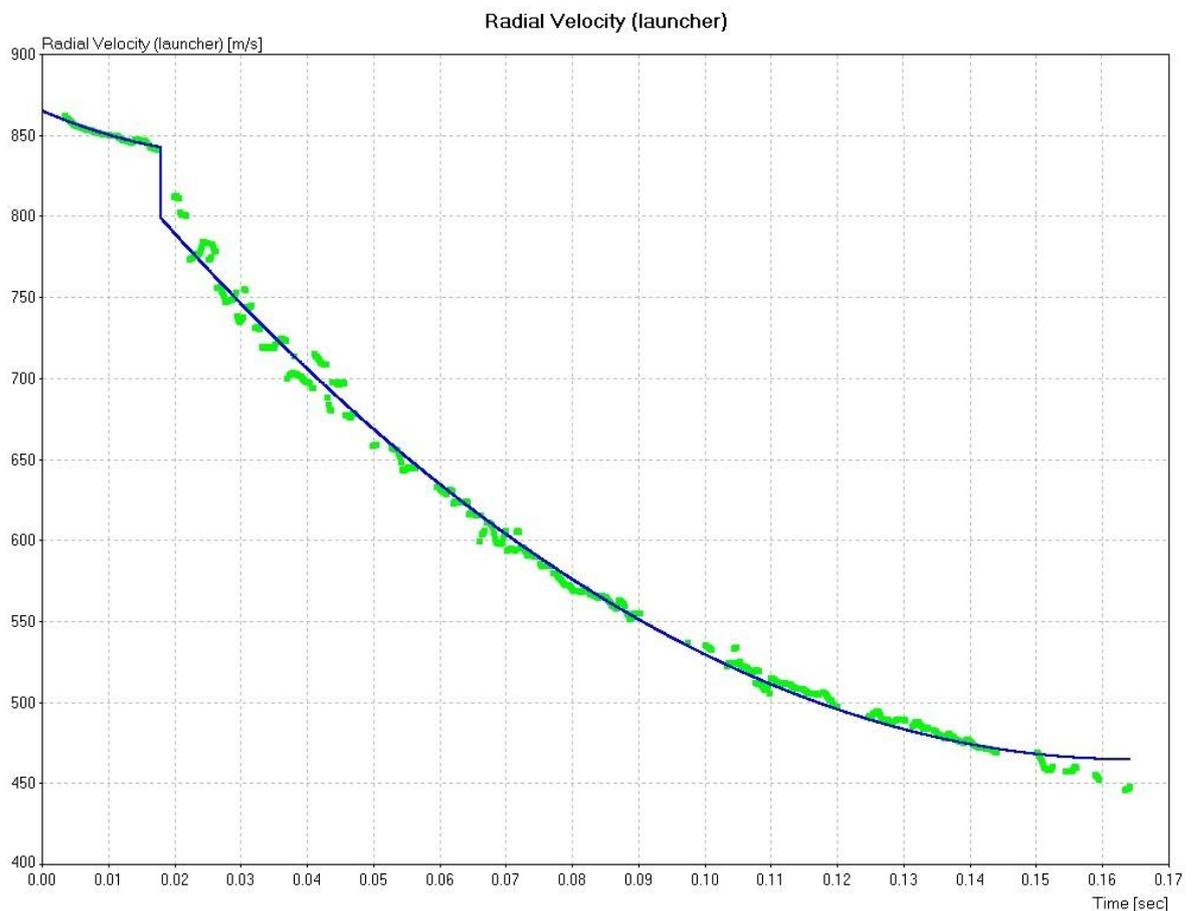


FIG. 4.12 Gráfico de pontos experimentais do ensaio de velocidade residual do compósito poliéster-juta.

TAB. 4.8 Valores das velocidades médias de impacto e residual, energia absorvida e velocidade limite para cada componente do sistema de blindagem multicamada

Materiais	\bar{V}_i (m/s)	\bar{V}_r (m/s)	E_{abs} (J)	% E_{abs}	V_L (m/s)	Referência
Poliéster-juta-10% (manta)	841,93 ± 4,99	802,38 ± 12,04	304,26	8,67	251,90	*PT
Poliéster-juta-10% (tecido)	838,02 ± 3,31	805,81 ± 7,36	219,72	6,22	211,60	*PT
Poliéster-juta-20% (manta)	841,96 ± 5,02	799,48 ± 8,12	357,40	10,21	260,80	*PT
Poliéster-juta-20% (tecido)	837,36 ± 4,50	807,74 ± 4,96	242,91	6,94	220,00	*PT
Poliéster-juta-30% (manta)	844,36 ± 5,92	810,27 ± 9,34	244,31	6,94	227,90	*PT
Poliéster-juta-30% (tecido)	839,32 ± 8,25	812,99 ± 8,65	189,45	5,37	200,00	*PT
Epóxi-juta-30% (tecido)	841,45 ± 6,50	822,81 ± 6,41	150,5	4,40	176,16	DA LUZ, 2014
Epóxi-juta-30% (manta)	843,80 ± 4,78	819,18 ± 7,19	198,54	5,70	202,33	DA LUZ, 2014
Epóxi-bambu-30% (fibra)	844,71 ± 3,18	821,11 ± 4,06	190,67	5,70	198,28	DA CRUZ, 2015
Epóxi-bambu-30% (plaquetas)	842,29 ± 7,96	819,15 ± 8,15	186,46	5,60	196,08	DA CRUZ, 2015
Epóxi-sisal-30% (fibra)	845,06 ± 3,54	823,86 ± 5,10	171,58	5,00	188,09	ARAÚJO, 2015
Epóxi-sisal-30% (tecido)	844,91 ± 6,04	817,46 ± 4,82	221,33	6,40	213,62	ARAÚJO, 2015
Poliéster-curauá-30%	858,00 ± 3,00	833,00 ± 10,00	210,00	5,80	207,00	BRAGA, 2015
Epóxi-curauá-30%	848,30 ± 6,36	835,29 ± 6,17	106,16	3,00	147,95	DA SILVA, 2014b
Alumínio 5052 H34	860,00 ± 6,00	832,00 ± 9,00	234,00	6,50	228,00	BRAGA, 2015
Alumina	847,52 ± 5,51	566,67 ± 4,32	1920,41	55,10	629,25	DA SILVA, 2014b
Tecido de aramida	848,00 ± 5,00	835,00 ± 10,00	221,00	6,10	212,00	BRAGA, 2015

*PT: Presente trabalho.

Com base na TAB. 4.8, observa-se que o material cerâmico foi quem mais dissipou energia cinética proveniente do projétil, em torno de 55,1%, devido a sua alta resistência a compressão (DA SILVA, 2014b). Através deste ensaio, constata-se que nenhum material, quando aplicado individualmente, se mostrou eficiente contra munições de calibre 7,62 x 51 mm.

Em geral, os valores da velocidade limite (V_L), para os compósitos de matriz poliéster, foram superiores quando comparados a matriz epóxi, principalmente para os compósitos poliéster-juta na configuração manta, com valores 251,90 m/s (10% de juta), 260,80 m/s (20% de juta) e 227,90 m/s (30% de juta). Os valores para esses compósitos (poliéster-juta), comparam-se aos valores da liga de alumínio 5052 H34 (228 m/s) e tecido de aramida (212 m/s). Isso pode ser explicado devido aos compósitos de poliéster-fibra dissiparem uma maior quantidade de energia cinética do projétil através dos mecanismos de fratura frágil da matriz poliéster, delaminação entre camadas, deformação elástica do compósito, cisalhamento das camadas e tensão à ruptura das fibras (MORYE *et al.*, 2000; DA LUZ, 2014).

Os compósitos poliméricos reforçados fibras naturais na configuração tecido, no presente trabalho e ARAÚJO (2015), apresentam desempenhos balísticos superiores quando comparados aos compósitos reforços na configuração manta (juta) ou fibras contínuas e alinhadas (curauá e sisal) (DA SILVA, 2014b; ARAÚJO, 2015; BRAGA; 2015) quando aplicados como camada intermediária nos sistemas de blindagem multicamada, pois as fibras na configuração tecido propiciam uma distribuição de tensões, provenientes das partículas cerâmicas, em várias frentes de trincas de delaminação (HOSUR *et al*, 2004). Quando testados individualmente, os compósitos de poliéster com manta de juta apresentaram valores de velocidade limite (V_L) superiores em relação aos compósitos de poliéster reforçados com tecido de juta. Uma possível explicação é de que os compósitos poliéster-juta (tecido) exibiram baixa capacidade de distribuir a energia de impacto do projétil.

A análise de Weibull foi aplicada no ensaio de velocidade residual com intuito de analisar as velocidades limites dos compósitos poliéster-juta. Na FIG. 4.13 são mostrados os gráficos de Weibull e na TAB. 4.9 são mostrados os parâmetros de Weibull.

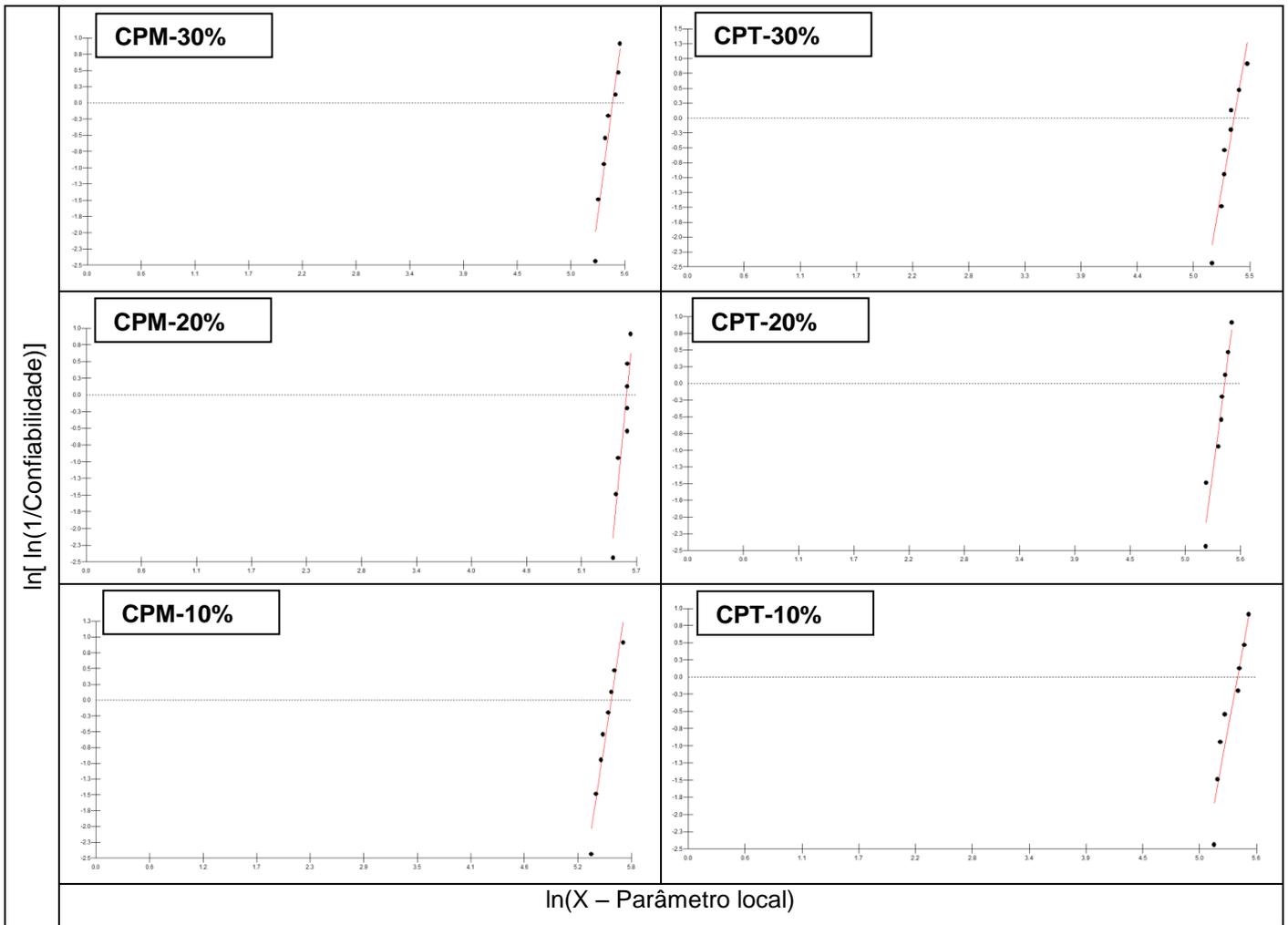


FIG. 4.13 Gráficos de Weibull da velocidade limite (V_L) para os compósitos poliéster-juta nas configurações manta e tecido.

TAB. 4.9 Parâmetros de Weibull obtidos das velocidades limite dos compósitos poliéster-juta.

Camada Intermediária	Módulo de Weibull (β)	Velocidade Limite Característica (θ)	Coefficiente de Correlação (R^2)	Velocidade Limite Média (m/s)	Desvio Padrão (m/s)
CPM-10%	9,51	265,42	0,9519	251,90	31,79
CPT-10%	8,11	224,80	0,9034	211,60	31,61
CPM-20%	15,14	270,61	0,9084	260,80	21,14
CPT-20%	10,92	230,40	0,9338	220,00	24,35
CPM-30%	11,08	238,50	0,9367	227,90	24,88
CPT-30%	9,81	210,40	0,9225	200,00	24,50

Conforme ilustrado na TAB. 4.9, o coeficiente de correlação apresentou um valor superior a 0,9 para todos os modelos estudados. Referente a módulo de Weibull (β), todos os valores se apresentaram altos. Quanto maior o valor deste parâmetro, menor a dispersão dos valores de velocidade limite e mais confiáveis são os resultados.

Referente à velocidade de limite característica (θ), os compósitos poliéster-juta na configuração manta apresentaram valores superiores em relação aos compósitos poliéster-juta na configuração tecido, ou seja, dissiparam uma maior quantidade de energia de impacto proveniente do projétil. Por outro lado, quando aplicados no sistema de blindagem multicamada, os compósitos na configuração manta apresentaram uma média de profundidade indentação superior (23,32 mm, 23,79 mm e 25,67 mm) em relação ao tecido (18,57 mm, 23,32 mm e 17,80 mm), uma vez que o objetivo da camada intermediária do sistema de blindagem multicamada é absorver a energia residual dos fragmentos do projétil e da própria cerâmica (DA SILVA *et al.*, 2014). A configuração tecido possui desempenho superior à configuração manta quando aplicada no sistema de blindagem, conforme visto na seção 4.1.2.

4.3 INTERAÇÃO DAS ONDAS DE CHOQUE NAS BLINDAGENS MULTICAMADA

Para análise da interação de choque no sistema de blindagem multicamada deste trabalho, foi aplicado o método de casamento de impedância e as equações de conservação de *Rankine-Hugoniot* (EQ 2.7 e EQ 2.8). Foi calculada a impedância de choque, as velocidades de partículas e pressão na interface para os diferentes modelos de blindagem multicamada. Não foi possível obter, na literatura, os parâmetros específicos para o compósito poliéster-juta, então, foi utilizada a velocidade da onda elástica (C_0), expressa pela EQ. 2.3, no lugar da velocidade de onda de choque (U_s). Foi também utilizada a equação da regra das misturas, onde se puderam estimar os valores para o módulo de elasticidade (EQ 4.1) e a densidade (EQ 4.2) do compósito poliéster-juta. Para alumina dopada com nióbia (4%), também foi utilizada a velocidade da onda elástica no lugar da velocidade da onda de choque (DA SILVA, 2014b).

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

Onde:

E_{cp} → Módulo de elasticidade do compósito;

E_m → Módulo de elasticidade da matriz;

E_f → Módulo de elasticidade da fibra;

V_m → Fração volumétrica da matriz;

V_f → Fração volumétrica da fibra.

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

Onde:

ρ_{cp} → Densidade do compósito;

ρ_m → Densidade da matriz;

ρ_f → Densidade da fibra;

V_m → Fração volumétrica da matriz;

V_f → Fração volumétrica da fibra.

Para a resina poliéster e para fibra de juta, foram encontrados, na literatura (MONTEIRO *et al.*, 2011), valores mínimos e máximos referente ao módulo de elasticidade. Nas TAB. 4.10 e TAB. 4.11 são mostrados os valores característicos dos materiais que são utilizados no sistema de blindagem multicamada.

TAB. 4.10 Valores da velocidade da onda de choque e dos parâmetros característicos de cada material.

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

TAB. 4.11 Valores da densidade, módulo de elasticidade e da onda elástica do compósito poliéster-juta.

Material	ρ (g/cm ³)	$E_{\text{mín.}}$ (GPa)	$E_{\text{máx.}}$ (GPa)	C_0 (mín.) (m/s)	C_0 (máx.) (m/s)
Juta	1,30	13,00	27,00	-	-
Poliéster	1,10	2,06	4,46	-	-
Compósito Poliéster-Juta (10%)	1,12	3,15	6,67	1678,12	2440,18
Compósito Poliéster-Juta (20%)	1,14	4,25	8,93	1930,37	2798,50
Compósito Poliéster-Juta (30%)	1,16	5,34	11,19	2145,97	3105,47

O gráfico do método de casamento de impedância é mostrado na FIG. 4.14, analisando a interação das ondas de choque em cada interface do sistema de blindagem multicamada. Neste gráfico foi utilizado como camada intermediária o compósito de matriz poliéster reforçado com 30% juta. Para os outros modelos estudados, o esquema gráfico foi parecido. A resolução dos cálculos nas interfaces pode ser resumida em três etapas: interface projétil/alumina; interface alumina/compósito; e interface compósito/alumínio. Também foram consideradas as interfaces alumina/aramida e aramida/alumínio para fins comparativos. A velocidade de projétil (chumbo) adotada foi a mesma utilizada por DA SILVA (2014b), DA LUZ (2014), ARAÚJO (2015) e DA CRUZ (2015) de 863,63 m/s, para estabelecer uma base comparativa e utilizou-se a configuração tecido, pois a fibra aramida é comercializada nessa configuração.

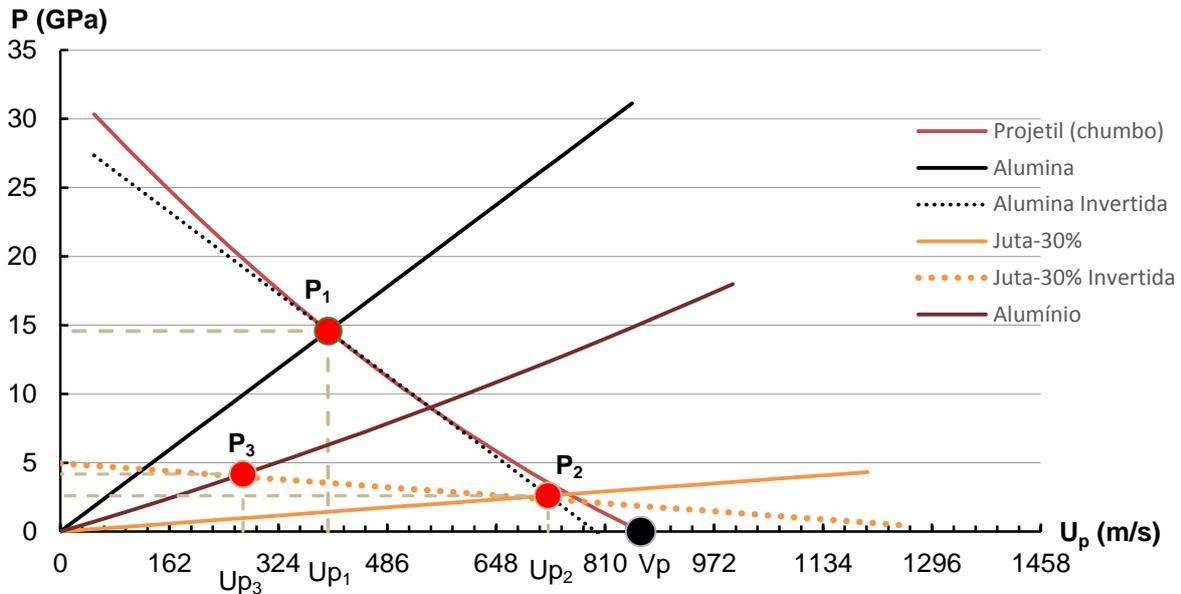


FIG. 4.14 Gráfico do casamento de Impedâncias na blindagem multicamada com composto poliéster-juta como camada intermediária.

Os valores encontrados para interação das ondas de choque, nas interfaces dos sistemas de blindagem multicamada, utilizando o método de casamento de impedância são mostrados na TAB. 4.12.

TAB. 4.12 Valores da velocidade de partícula, velocidade de onda de choque e pressão nas interfaces de cada componente da blindagem multicamada e a natureza da onda de choque.

Interfaces		U_p (m/s)	Pressão (GPa)	U_s (m/s)	Natureza da onda de choque
Chumbo/Alumina		398,14	14,58	10375,35	Compressiva
Alumina/Poliéster-juta (10%)	Mín.	757,41	1,42	1678,12	Trativa
	Máx.	740,99	2,02	2440,18	Trativa
Poliéster-juta (10%)/Alumínio	Mín.	160,26	2,38	5542,43	Compressiva
	Máx.	217,18	3,31	5618,59	Compressiva
Alumina/Poliéster-juta(20%)	Mín.	751,15	1,65	1930,37	Trativa
	Máx.	732,48	2,34	2798,50	Trativa
Poliéster-juta (20%)/Alumínio	Mín.	182,41	2,77	5572,06	Compressiva
	Máx.	246,94	3,77	5658,41	Compressiva
Alumina/Poliéster-juta (30%)	Mín.	745,6	1,86	2145,97	Trativa
	Máx.	724,97	2,61	3105,47	Trativa
Poliéster-juta (30%)/Alumínio	Mín.	202,13	3,06	5598,45	Compressiva
	Máx.	271,47	4,17	5691,23	Compressiva
Alumina/Aramida		714,55	2,99	2909,211	Trativa
Aramida/Alumínio		365,84	5,75	5817,49	Compressiva

Na TAB. 4.13 são mostrados os valores de impedância de choque de cada componente da blindagem multicamada.

TAB. 4.13 Valores de densidade, velocidade de onda e impedância de choque nas interfaces da blindagem multicamada.

Material	Densidade (kg/m ³)	Velocidade de onda (m/s)	Impedância (kg/(m ² .s))	Referência
Poliéster-juta (10%) (mín.)	1120	1678,12	1,88 x 10 ⁶	*PT
Poliéster-juta (10%) (máx.)	1120	2440,18	2,74 x 10 ⁶	*PT
Poliéster-juta (20%) (mín.)	1140	1930,37	2,20 x 10 ⁶	*PT
Poliéster-juta (20%) (máx.)	1140	2798,50	3,19 x 10 ⁶	*PT
Poliéster-juta (30%) (mín.)	1160	2145,97	2,49 x 10 ⁶	*PT
Poliéster-juta (30%) (máx.)	1160	3105,47	3,60 x 10 ⁶	*PT
Chumbo	11300	2.066,00	23,35 x 10 ⁶	*PT
Alumínio	2700	5.817,49	15,85 x 10 ⁶	*PT
Aramida	1440	2.909,21	4,19 x 10 ⁶	*PT
Epóxi-juta (mín.)	1167	2.188,03	2,55 x 10 ⁶	DA LUZ, 2014
Epóxi-juta (máx.)	1167	2.895,94	3,38 x 10 ⁶	DA LUZ, 2014
Epóxi-bambu (mín.)	983,4	4.082,11	4,01 x 10 ⁶	DA CRUZ, 2015
Epóxi-bambu (máx.)	983,4	5.372,88	5,64 x 10 ⁶	DA CRUZ, 2015
Epóxi-sisal (mín.)	1155	1.948,91	2,25 x 10 ⁶	ARAÚJO, 2015
Epóxi-sisal (máx.)	1155	2.955,22	3,41 x 10 ⁶	ARAÚJO, 2015
Curauá 30%	1150	2.132,56	2,45 x 10 ⁶	DA SILVA, 2014b
Alumina	3530	10.375,39	36,62 x 10 ⁶	DA SILVA, 2014b

*PT: Presente trabalho.

O projétil (chumbo) viaja com velocidade média de 863,63 m/s ao incidir na camada cerâmica (alumina dopada com 4% de nióbia) é capaz de gerar na interface entre os dois materiais altas pressões (14,58 GPa) e ondas de choque com velocidade de 10375,39 m/s. A alumina foi capaz de erodir e deformar a ponta do projétil devido a sua elevada resistência à compressão, distribuindo a pressão em uma área maior (DA SILVA *et al.*, 2014) além de reduzir a velocidade do projétil de 863,63 m/s para 398,14 m/s, absorvendo 55,1% da energia de impacto.

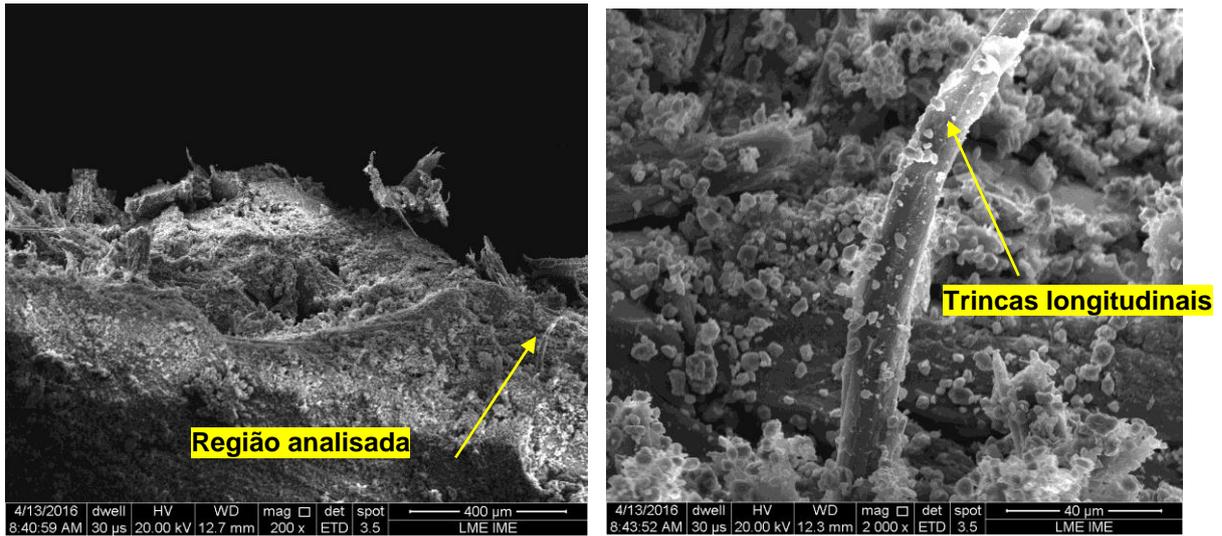
A onda de choque, de caráter compressivo, que se propaga na alumina (velocidade de 10375,39 m/s) ao incidir na interface com o material compósito poliéster-juta, terá parte do pulso transmitido e parte refletirá de volta. Como a impedância da alumina (36,62 x 10⁶ kg/m²s) é maior que a impedância do material compósito poliéster-juta, a onda refletida é de caráter trativo, ocasionando completa fragmentação da alumina. Segundo a TAB. 4.13, todos os materiais utilizados como

camada intermediária possuem impedâncias de choque menores que a alumina (TAB. 4.13), ou seja, o pulso refletido sempre será de caráter trativo.

Dos materiais utilizados como camada intermediária, o compósito epóxi-bambu-30% possui o maior valor de impedância de choque ($4,01-5,64 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$), em seguida vem à aramida ($4,19 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$), poliéster-juta-30% ($2,49-3,6 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$), epóxi-juta-30% ($2,55-3,38 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$), epóxi-sisal-30% ($2,25-3,41 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$), poliéster-juta-20% ($2,2-3,19 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$), poliéster-juta-10% ($1,88-2,74 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$) e epóxi-curauá-30% ($2,45 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$). Segundo DA LUZ (2014), a camada intermediária transmitira uma maior energia do pulso de compressão para a camada metálica (alumínio 5052 H34) conforme aumenta a sua impedância de choque. Os valores de impedância de choque e os valores médios de profundidade de indentação na plastilina das camadas intermediárias (poliéster-juta na configuração tecido) foram próximos e se tratando do ensaio balístico de blindagem multicamada, que é um ensaio complexo, a diferença de impedância pode ser desprezível. Segundo MEYERS (1994), o ensaio balístico de multicamada envolve diversos fenômenos dinâmicos como interações e reflexões entre ondas, atenuações das ondas de choque e transformações de fase. Isso demonstra os valores próximos da média de indentação dos sistemas de blindagem multicamada tendo como camada intermediária compósito poliéster juta na configuração tecido e a aramida.

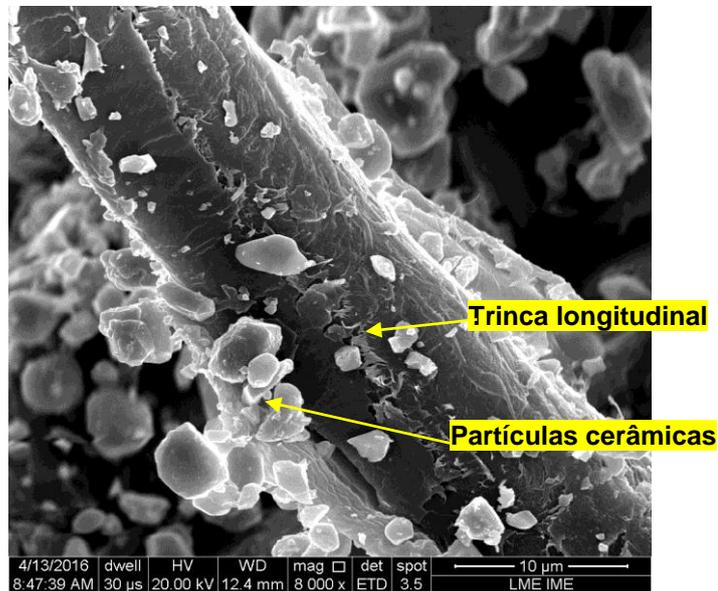
4.4 ANÁLISE DAS MICROGRAFIAS OBTIDAS NO MEV

Após o ensaio balístico de deformação na plastilina, alguns fragmentos do compósito poliéster-juta, tanto na configuração manta como tecido, foram coletados para serem analisados utilizando a técnica de microscopia eletrônica de varredura. Na FIG. 4.15 são mostradas imagens referentes ao compósito poliéster-juta na configuração manta. Na FIG. 4.15(a) é mostrada a superfície de fratura do material e pode-se observar que esta região ficou coberta por partículas cerâmicas, indicando que o compósito absorveu energia cinética dos fragmentos através do mecanismo de incrustação mecânica. As cargas eletrostáticas e forças atuantes na superfície do compósito, como a de Van der Waals, possuem força suficiente para manter as partículas cerâmicas incrustadas, deixando-as empilhadas (MONTEIRO *et al.*, 2014). Na FIG. 4.15(b) foi destacada uma região onde se tem fibras de juta cobertas de partículas cerâmicas. Na FIG. 4.15 (c) é mostrada somente a fibra de juta, onde se observou a propagação de trinca longitudinal na própria fibra, que é um mecanismo de dissipação de energia, bem como empilhamento de partículas cerâmicas.



(a)

(b)



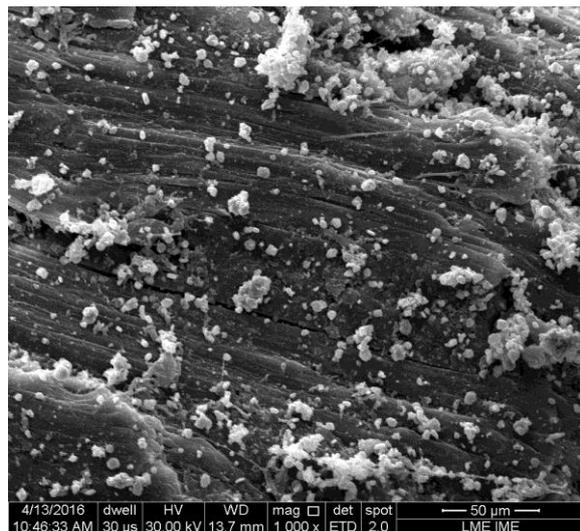
(c)

FIG. 4.15 Micrografia por MEV: (a) Partículas Cerâmicas na superfície do composto poliéster juta, configuração manta (200x); (b) Partículas cerâmicas na superfície das fibras de juta (2000x); (c) Propagação de trincas na superfície da fibra de juta (8000x).

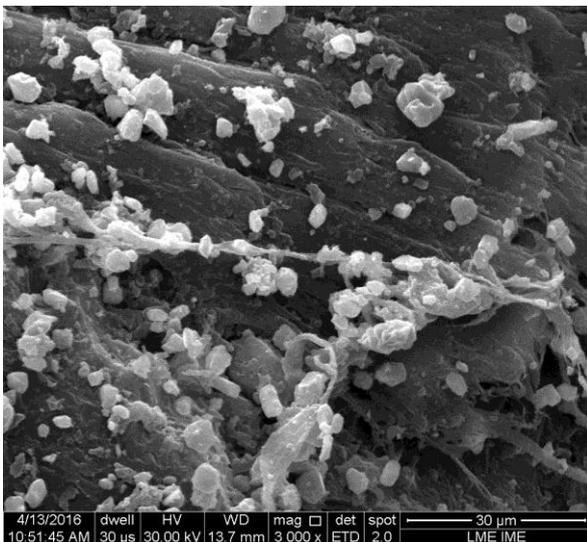
Na FIG. 4.16 são mostradas as imagens da superfície do compósito poliéster-juta na configuração tecido, onde foi possível observar que esse material também capturou os fragmentos da cerâmica através do mecanismo de incrustação mecânica. Na FIG. 4.16(b) é mostrado o aspecto frágil da matriz poliéster (DA SILVA, 2014c), que é um dos mecanismos de dissipação de energia dos compósitos. Na FIG. 4.16 (c; d) são mostrados empilhamentos de partículas cerâmicas nas microfibrilas de juta.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIG. 4.16 Micrografia por MEV: (a) Partículas cerâmicas na superfície do compósito poliéster-juta, configuração tecido (300x); (b) Fratura do compósito poliéster-juta, configuração tecido (1000x); (c, d) Partículas cerâmicas na superfície das microfibrilas de juta (3000x, 5000x).

A partir de um dos fragmentos do compósito, foi realizado um EDS (FIG. 4.17) do compósito poliéster-juta, confirmando que as partículas incrustadas na fibra são fragmentos cerâmicos (predominantemente Al_2O_3), com picos referentes ao alumínio (Al) e ao oxigênio (O). O pico referente ao silício (Si) pode estar relacionado às impurezas provenientes do ensaio balístico, os picos referentes à platina (Pt) são referentes ao recobrimento condutor utilizado e o pico referente ao carbono (C) está relacionado com a fibra de juta ou a resina poliéster.

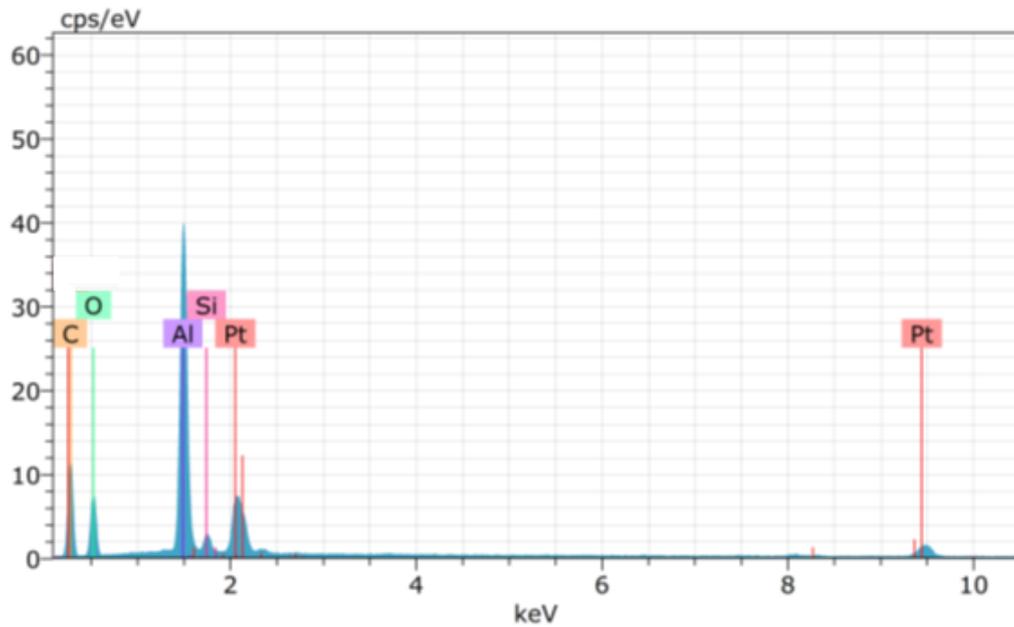


FIG. 4.17 Espectro de EDS de um dos fragmentos do compósito poliéster-juta.

O mecanismo de descolamento (“pull out”) da fibra de juta na matriz poliéster durante a fratura do compósito, que é um mecanismo de dissipação de energia do compósito, é mostrado na FIG. 4.18. Esse mecanismo ocorre devido à baixa adesão entre a fibra de juta (caráter hidrofílico) e a matriz poliéster (caráter hidrofóbico), um fato comum entre os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais lignocelulósicas (BLEDZKI *et al.*, 1999; SATYANARAYANA *et al.*, 2007; MONTEIRO *et al.*, 2011; DA SILVA, 2014c).

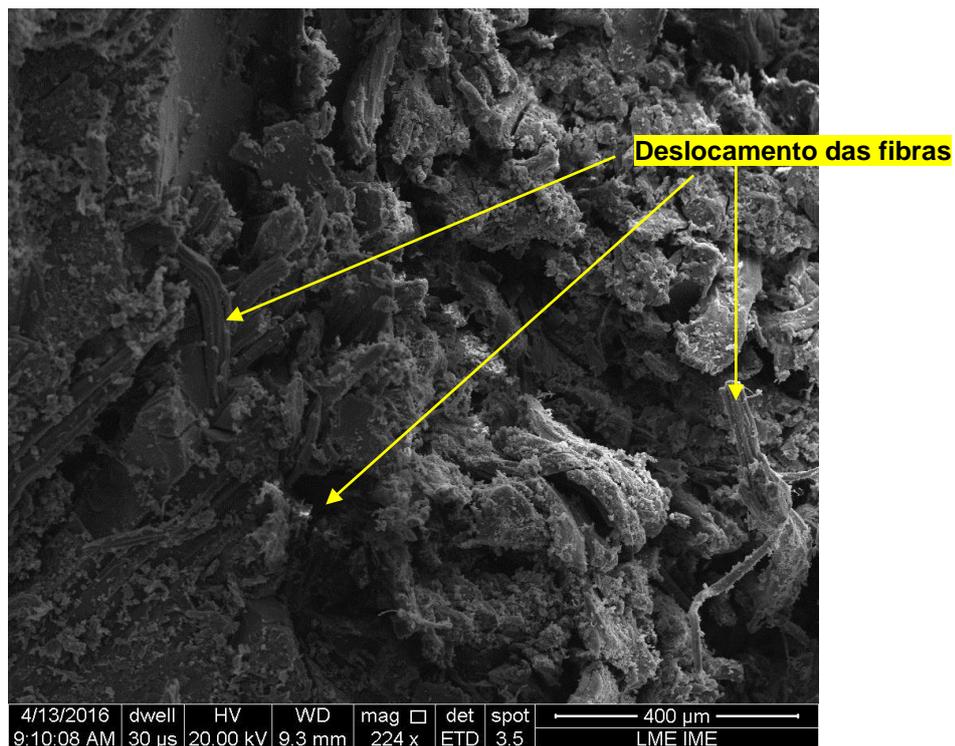


FIG. 4.18 Micrografia por MEV das fibras de juta arrancadas da matriz poliéster.

4.5 CUSTO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA BLINDAGEM MULTICAMADA

Os resultados mostrados nos ensaios de deformação da plastilina do presente trabalho indicaram que os compósitos de poliéster reforçados com fibras de juta utilizados como camada intermediária no sistema de blindagem multicamada, tanto na configuração manta como tecido, cumpriram a exigência da norma NIJ 0101.06 (2008). Na TAB. 4.14 é mostrada a relação de custo para todos os componentes do sistema de blindagem multicamada. Os valores dos materiais utilizados para realização dos cálculos foram obtidos através da literatura (SATYARAYANA *et al.*, 2007; CALLISTER & RETHWISCH, 2012; DA SILVA, 2014b). De acordo com a TAB. 4.14, os sistemas de blindagem multicamada tendo como camada intermediária os compósitos poliéster-juta são mais leves e de menor custo que os sistemas contendo tecido de aramida.

TAB. 4.14 Relação de custo dos componentes utilizados na blindagem multicamada.

Materiais da Blindagem Multicamada		Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)	Peso (kgf)	Preço por kg (dólares)	Custo do Material (dólares)
Alumina		190	3,72	0,707	33,00	23,32
Aramida		190	1,44	0,274	63,60	17,40
Compósito Poliéster(90%)-Juta(10%)	Poliéster-90%	190	1,10	0,188	4,3	1,13
	Juta-10%		1,30	0,025	0,3	
Compósito Poliéster(80%)-Juta(20%)	Poliéster-80%	190	1,10	0,167	4,3	1,07
	Juta-20%		1,30	0,049	0,3	
Compósito Poliéster(70%)-Juta(30%)	Poliéster 70%	190	1,10	0,146	4,3	1,00
	Juta-30%		1,30	0,074	0,3	
Liga de Alumínio 5052 H34		95	2,68	0,255	5,1	1,30

Na TAB. 4.15 é apresentado o comparativo do peso e do custo total entre a blindagem multicamada utilizando o tecido de aramida e compósito poliéster-juta (10%, 20% e 30% de fibra juta) como camada intermediária. É possível observar que ambos os modelos analisados apresentaram uma redução tanto do peso total da blindagem quanto do custo, porém, observa-se que os compósitos poliéster-juta exibem uma relação inversamente proporcional entre a redução do peso total da blindagem e a redução de custo, que pode ser explicado devido ao fato da resina

poliéster ser menos densa (1,1 g/cm³) que a fibra juta (1,3 g/cm³), porém com custo mais elevado (US\$ 4,3 contra US\$ 0,3).

TAB. 4.15 Comparativo de custo e peso total das blindagens multicamada.

Camada Intermediária	Peso Total (kgf)	Redução de Peso (%)	Custo Total (US\$)	Redução de Custo (%)
Aramida	1,235		42,02	
Compósito Poliéster(90%)-Juta(10%)	1,174	4,92	25,76	38,71
Compósito Poliéster(80%)-Juta(20%)	1,178	4,62	25,69	38,87
Compósito Poliéster(70%)-Juta(30%)	1,182	4,31	25,63	39,02

5 CONCLUSÕES

- 1) Os sistemas de blindagem multicamada tendo como camada intermediária o compósito de matriz poliéster reforçada com fibras de juta nas configurações manta e tecido, com diferentes frações volumétricas (10%, 20% e 30%) atenderam as especificações da norma americana NIJ 0101.06 (2008), ou seja, apresentaram profundidades de indentações inferiores a 44 mm.
- 2) Os compósitos poliéster-juta na configuração tecido apresentaram os melhores valores de profundidade de indentação (18,57 mm, 23,32 mm e 17,80 mm) quando comparados aos compósitos poliéster-juta na configuração manta (23,32 mm, 23,79 mm e 25,67 mm), sendo que nesta configuração foi constatada a mudança no mecanismo de absorção de energia à medida que aumentou a fração volumétrica de tecido de juta. Com exceção aos compósitos poliéster-juta com 10% e 30% de tecido de juta, os outros modelos estudados, neste trabalho, apresentaram valores próximos de profundidade indentação na plastilina em comparação com o tecido de aramida (22,67 mm).
- 3) Analisando a integridade dos compósitos poliéster-juta, após o ensaio de deformação na plastilina, somente o sistema de blindagem tendo como camada intermediária o compósito poliéster com 30% em volume de tecido permaneceu coeso, ou seja, o projétil não conseguiu perfurar esta camada.
- 4) Através do ensaio de velocidade residual, constatou-se que nenhum dos materiais, quando aplicados individualmente, mostrou-se eficiente contra munições de calibre 7,62 x 51 mm. Os compósitos de matriz poliéster apresentam os maiores valores de velocidade limite, dissipando uma maior quantidade de energia cinética proveniente do projétil através dos mecanismos de fratura frágil da matriz poliéster, delaminação entre as camadas, deformação elástica do compósito, cisalhamento das camadas e tensão à ruptura das fibras de juta. Os compósitos poliéster-juta na configuração manta apresentaram valores de velocidade limite (V_L) superiores

em relação aos compósitos poliéster-juta na configuração tecido, ou seja, dissiparam uma maior quantidade de energia de impacto proveniente do projétil.

- 5) Em virtude dos compósitos poliéster-juta apresentarem valores de impedância de choque menores (máximo de $3,60 \times 10^6$ kg/m²s) que a camada cerâmica ($36,62 \times 10^6$ kg/m²s), a onda refletida para a alumina foi de caráter trativo, causando estilhaçamento do material cerâmico. O valor impedância de choque do tecido de aramida ($4,19 \times 10^6$ kg/m²s) em comparação com os valores de impedância dos modelos estudados mostraram-se próximos e se tratando do ensaio balístico de blindagem multicamada, essa pequena diferença pode ser desprezível.
- 6) Com auxílio das imagens obtidas no MEV foi possível observar nas superfícies fraturadas do material cerâmico, o mecanismo de fratura intergranular que auxiliou na dissipação de energia de impacto. Foi possível observar os mecanismos de dissipação de energia da camada intermediária, tais como: incrustação mecânica, ruptura frágil da matriz poliéster e deslocamento (“pull out”) das fibras de juta na matriz poliéster.
- 7) O sistema de blindagem multicamada tendo como camada intermediária o compósito de matriz poliéster reforçadas com fibras de juta apresentou redução do custo em até 39,02% e redução do peso em até 4,92% em comparação com o sistema de blindagem multicamada tendo como camada intermediária o tecido de aramida.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a influência causada pela variação da fração volumétrica de fibras de juta em 40%, 50% e 60% na matriz poliéster, em ambas as configurações (manta e tecido) no comportamento balístico do sistema de blindagem multicamada;
- Estudar detalhadamente a influência da fração de vazios dos compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais no comportamento balístico e nas propriedades mecânicas desse compósito.
- Estudar o comportamento balístico de uma blindagem multicamada tendo como camada intermediária o compósito de matriz polimérica (poliéster ou epóxi) reforçada com alguma fibra natural ainda não estudada (piaçava, rami, cânhamo e fique);
- Analisar o compósito epóxi-juta como camada intermediária do sistema de blindagem multicamada, variando a sua fração volumétrica;
- Desenvolver um protótipo de colete utilizando o compósito poliéster-juta.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABERNETHY, R. B.; BRENEMAN, J. E.; MEDLIN, C.H.; REINMAN, G.L. **Weibull Analysis Handbook**. Disponível em: www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a143100.pdf.>. 1983.
- ABNT NBR 15000. **Blindagens para impactos balísticos - classificação e critérios de avaliação**, 2005.
- ALVES, R.T. **Embrapa Cerrados celebra centenário da imigração japonesa. Cerrados Informa**. Planaltina, v. 9, n. 88, p. 2. 2008.
- 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.
- BLEDZKI, A.K.; GASSAN, J. **Composites reinforced with cellulose based fibers**. Progress in Polymer Science, Vol. 24, p. 221-274. 1999.
- BRAGA, F.O. **Comportamento Balístico de uma Blindagem Multicamada Utilizando Compósito Poliéster-Curauá como Camada Intermediária**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2015.
- BRASIL. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. O Estado da Arte da Agricultura Brasileira. Rio de Janeiro, 2004**. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/seminario/EduardoSampaio.pdf>. Acesso em: 25 Set. 2015.
- BRYDSON, J.A. **Plastics Materials**. 7ª ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. 1999.
- CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D.G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 8ª ed. Danvers: John Wiley & Sons. 2012.
- CANTWELL, W.J.; MORTON, J. **The Impact Resistance of Composites Materials – a Review – Composites**; vol. 22, n.5. 1991.
- CARVALHO, E.A. **Avaliação da influência do fator de localização e rank mediano no valor do módulo de Weibull em materiais frágeis**. In: 62º Congresso Anual Do Congresso Anual Da Associação Brasileira De Metalurgia E Materiais – ABM, Vitória, ES, Brasil, P. 1-10.2007.
- CHAGAS, C.F.M.C. **Minimização do Efeito de Aresta em Blindagem Cerâmica à Base de Alumina**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2014.

- 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 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 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. 2014b.
- DA SILVA, I. L. A. **Propriedades e Estruturas de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Contínuas de Juta.** Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências de Materiais na Universidade Estadual do Norte Fluminense. 2014c.
- EMBRAPOL. Disponível em: <<http://www.embrapol.com.br/resina.htm>>. Acesso em: 5 Set 2015.
- FARUK, O.; BLEZKI, A.K.; FINK, H. SAIN, M. **Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010.** *Progress in Polymer Science*, nº 37, p.1552-1596. 2012.
- 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.
- HOMMA, A. K.O. **Amazônia: como aproveitar os benefícios da destruição?** *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 54, n. 19, p. 115-135. 2005.
- HOSUR, M. V.; VAIDYA, U. K.; ULVEN, C.; JEELANI, S. **Performance of stitched/unstitched woven carbon/epoxy composites under high velocity impact loading.** *Composite Structures*, v.64, p.455-466. 2004.
- JOHN, M.J.; THOMAS, S. **Biofibres and Biocomposites.** *Carbohydrate Polymers*, Vol. 71, p. 343-364. 2008.
- KALIA, S.; KAITH, B.S.; KAUR, I. (Eds.). **Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites.** 1ª ed. New York: Springer. 2011.
- LACH, D.E. **Developments and Applications of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastics**, New York: Van Nostrand Reinhold Co, 576-588p. 1998.

- LIMA, A. C. **Caracterização e propriedades de compósitos de tecido de juta reforçando matriz de polietileno reciclado**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências de Materiais na Universidade Estadual do Norte Fluminense. 2009.
- MEDVEDOVSKI, E. **Ballistic Performance of Armour Ceramics: Influence of Design and Structure**. Part 1. *Ceramics International*. Vol. 36, p. 2103-2115. 2010.
- MELLO, M.L.S.; CONTENTE, S.; VIDAL, B.C.; PLANDING, W., SCHENCK, U. **Modulation of ras transformation affecting chromatin supraorganization as assessed by image analysis**. *Exp. Cell Res*, v. 220, p. 374-382. 1995.
- MEYERS, M.A. **Dynamic behavior of materials**. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- MOHANTY, A.K.; MISRA, M.; DRZAL, L.T. **Sustainable Bio-Composites from Renewable Resources: Opportunities and Challenges in the Green Materials World**. *Journal of Polymers and the Environment*, Vol. 10, nº 1/2, p. 19-26. 2002.
- 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.; 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 aramida fibers in multilayered ballistic armor**. Accept for publication un *Metallurgical and Materials Transactions A*, November, 2014.
- 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.
- NETO, J. R. A.; CARVALHO, L. H.; ARAÚJO, E. M. **“Influência da Adição de uma Carga Nanoparticulada no Desempenho de Compósitos Poliuretano/Fibra de Juta”**, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 17, nº 1, p. 10-15. (2007)
- NIJ Standards-0101.06.**Ballistic Resistance of Body Armor.U.S.** Department of Justice/Office of Justice Programs - National Institute of Justice. 2008.
- NORONHA, K. F., MELO, F. C. L, 2010. **“Avaliação do desempenho de adesivos poliméricos na interface dyneema®/alumina”**. In: 6º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010.

- O'CONNOR, P.D.T.; KLEYNER, A. **Practical Reliability Engineering**. 5^a ed. Chichester: John Wiley & Sons. 2012.
- RATNA, D. **Handbook of Thermoset Resins**. 1^a ed Shawbury: Smithers Rapra. 2009.
- REGIANI, A. M. **Eletrólitos sólidos poliméricos à base de polissacarídeos: síntese e caracterização**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciências na área de Físico-química no Instituto de Química de São Carlos. 2000.
- SATYANARAYANA, K.G.; GUIMARÃES, J.L.; WYPYCH, F. **Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications**. Composites: Part A, v. 38, p. 1694-1709, 2007.
- THAKUR, V.K.; THAKUR, M.K.; GUPTA, R.K. **Review: Raw Natural Fiber-Based Polymer Composites**. International Journal of Polymer Analysis & Characterization, Vol. 19, p. 256-271. 2014.
- TRINDADE, W. **Influência da Geometria e da Microestrutura no Comportamento Dinâmico da Alumina Aditivada com Nióbia**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2012.
- TRINDADE, W.; GOMES, A. V.; LOURO, L.H.L. **Elaboração de uma Nova Rota de Eliminação de Ligante da Cerâmica de Alumina**. Revista Militar de Ciência & Tecnologia. Vol. 4, p. 71-79. 2013.
- VIEIRA, M.C.O. **Ensaio Destrutivos de Tubos Poliméricos Reforçados Internamente com Aço**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas na Universidade de Brasília. 2010.
- WAMBUA, P.; VANGRIMDE, B.; LOMOV, S.; VERPOEST, I. **The Response of Natural Fibre Composites to Ballistic Impact by Fragment Simulating Projectiles**. Composite Structures, Vol. 77, p. 232–240. 2007.
- WANG, L.; KANESALINGAM, S.; NAYAK, R.; PADHYE, R. **Recent trends in Ballistic Protection**. Textiles and Light Industrial Science and Technology (TLIST), Vol. 3. P. 37-47. 2014.
- ZUKAS, J.A.; NICHOLAS, T.; SWIFT, H.F.; GRESZCZUK, L.B.; CURRAN, D.R. **“Impact dynamics”**. 1^o editioned, New York: John Wiley & Sons, 1982.