

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

FÁBIO DE OLIVEIRA BRAGA

COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE UMA BLINDAGEM
MULTICAMADA UTILIZANDO COMPÓSITO POLIÉSTER-CURAUÁ
COMO CAMADA INTERMEDIÁRIA

Rio de Janeiro

2015

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

FÁBIO DE OLIVEIRA BRAGA

**COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE UMA BLINDAGEM
MULTICAMADA UTILIZANDO COMPÓSITO POLIÉSTER-CURAUÁ
COMO CAMADA INTERMEDIÁRIA**

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

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

Rio de Janeiro

2015

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, 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).

S767 Braga, Fábio de Oliveira

Comportamento balístico de uma blindagem multicamada utilizando compósito poliéster-curauá como camada intermediária / Fábio de Oliveira Braga, orientada por Sérgio Neves Monteiro – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2015.

131p. : il.

Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015.

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

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

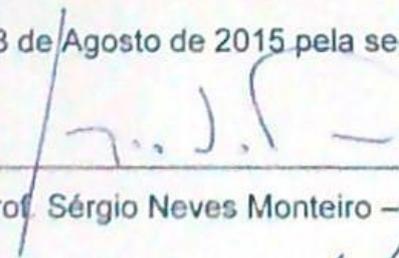
FÁBIO DE OLIVEIRA BRAGA

**COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE UMA BLINDAGEM
MULTICAMADA UTILIZANDO COMPÓSITO POLIÉSTER-CURAUÁ
COMO CAMADA INTERMEDIÁRIA**

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

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

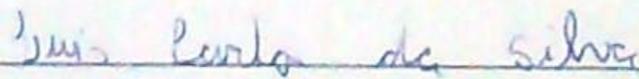
Aprovada em 13 de Agosto de 2015 pela seguinte Banca Examinadora:



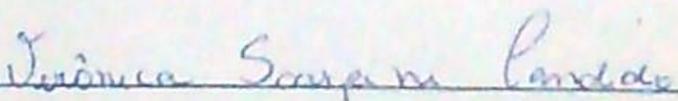
Prof. Sérgio Neves Monteiro – Ph.D. do IME – Presidente



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



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



Prof.ª Verônica Scarpini Cândido – D.C. da UNISUAM

Rio de Janeiro

2015

AGRADECIMENTOS

À toda a minha família pelo apoio à minha decisão de retornar aos estudos. Especialmente aos meus pais José Carlos e Eliza por estarem sempre presentes, provendo suporte material e emocional. À minha namorada Bianca, pelo carinho e compreensão, e pela paciência ao adiar nossos sonhos em prol da minha formação técnica. À família da Bianca, Fátima, Bruna e Henrique, pelo apoio na minha mudança para o Rio de Janeiro e no restante do mestrado.

Ao meu orientador Prof. Sérgio Neves Monteiro pelos seus ensinamentos, pelo apoio financeiro e logístico ao projeto, e por ir muito além da orientação, sendo um grande amigo e mentor.

Aos meus colegas do IME, em especial, aos amigos do grupo de fibras naturais, Bruna Madeira, Cap. Lúcio Nascimento, Fernanda da Luz, Foluke de Assis, Lucas Bolzan, Maj. Thiago Milanezi, Noan Simonassi e Renato Batista. Também aos colegas do laboratório de cerâmicos, Daniel Navarro e Rubens Marçal.

Ao CAEx, por disponibilizar instalações e pessoas qualificadas para a realização dos ensaios balísticos, em especial ao Ten. Cel. Malizia, Cap. D'Mengeon, Sgt. Santiago, Sgt. Furiati, Sgt. Marcelo Alves e ao Sgt. Machado, que possibilitaram a execução dos mesmos. Ao Cap. Édio pelo suporte prestado nos ensaios balísticos.

Ao SC Leonardo e ao Prof. Carlos Elias pela execução dos ensaios mecânicos das placas de alumínio.

À coordenadora da Pós-Graduação Prof.^a Leila Rosa de Oliveira Cruz.

À Pemattec Triangel por fornecer as fibras de Curauá.

Ao IME, por ceder recursos e instalações para o desenvolvimento do projeto. Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, pela dedicação na capacitação dos novos Mestres e Doutores.

Ao CNPq pelo apoio financeiro à pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	8
LISTA DE TABELAS.....	15
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	18
1 INTRODUÇÃO.....	24
1.1 Justificativa do Trabalho.....	27
1.2 Objetivo do Estudo.....	27
1.2.1 Objetivo Geral.....	27
1.2.2 Objetivo Específicos.....	28
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1 Blindagem Balística.....	29
2.2 Comportamento Dinâmico dos Materiais.....	31
2.2.1 Conceitos Gerais sobre Ondas de Tensão.....	32
2.2.2 Interação e Reflexão de Ondas de Choque.....	36
2.3 Sistemas de Blindagem Multicamada.....	40
2.4 Camada Frontal: Material Cerâmico.....	41
2.5 Camada Intermediária: Material Compósito.....	42
2.5.1 Características gerais.....	42
2.5.2 Matrizes Poliéster.....	43
2.5.3 Fibras Naturais Lignocelulósicas.....	45
2.5.4 Fibras de Curauá.....	50
2.5.5 Comportamento Dinâmico das Fibras.....	52
2.6 Camada Posterior: Material Metálico.....	53
2.7 Método Estatístico de Weibull.....	53

3	MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1	Materiais Utilizados.....	55
3.1.1	Alumina e Nióbia.....	55
3.1.2	Polietileno Glicol (PEG).....	56
3.1.3	Fibras de Curauá.....	56
3.1.4	Tecido de Aramida.....	57
3.1.5	Resina Poliéster.....	58
3.1.6	Placas de liga de Alumínio.....	58
3.2	Fabricação das Pastilhas Cerâmicas.....	60
3.2.1	Obtenção do pó.....	60
3.2.2	Prensagem.....	61
3.2.3	Sinterização.....	62
3.3	Fabricação dos Compósitos.....	64
3.4	Colagem das Camadas.....	68
3.5	Ensaio Balístico.....	69
3.6	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	72
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
4.1	Caracterização Preliminar da Camada Frontal da Blindagem (Cerâmica).....	74
4.2	Caracterização Preliminar da Camada Posterior da Blindagem (Liga de Alumínio).....	76
4.2.1	Espessura e Densidade das Placas.....	76
4.2.2	Propriedades Mecânicas.....	77
4.3	Caracterização Preliminar da Camada Intermediária.....	80
4.3.1	Tecido de Aramida.....	80
4.3.2	Compósito Reforçado com Fibras de Curauá.....	81
4.4	Desempenho Balístico das Blindagens Multicamada.....	82
4.4.1	Camada Frontal Cerâmica.....	82
4.4.2	Camada Intermediária de Tecido de Aramida.....	83

4.4.3	Camada Intermediária de Resina Poliéster.....	87
4.4.4	Camada Intermediária de Compósito Reforçado com 10% de Curauá.....	92
4.4.5	Camada Intermediária de Compósito Reforçado com 20% de Curauá.....	97
4.4.6	Camada Intermediária de Compósito Reforçado com 30% de Curauá.....	101
4.4.7	Camada Intermediária de Compósito Reforçado com 30% de Curauá (Fibras Dispostas Bidirecionalmente).....	105
4.5	Desempenho Balístico Individual dos Materiais da Blindagem.....	106
4.6	Interação das Ondas de Choque nas Blindagens Multicamada.....	111
4.7	Comparação entre as Blindagens Multicamada.....	115
5	CONCLUSÕES.....	119
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	121
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 2.1	Trauma promovido pelo projétil medido por indentação no material de referência (NIJ-0101.06, 2008).....	30
FIG. 2.2	Curva tensão deformação para um material dúctil (MEYERS, 1994).....	33
FIG. 2.3	Modelo físico da propagação de uma onda de choque: Sucessivas posições de um pistão idealizado em um cilindro com fluido compressível (MEYERS, 1994).....	34
FIG. 2.4	Sequência de eventos no impacto balístico: (a) antes do impacto; (b) no instante do impacto; (c) Após o impacto (MEYERS, 1994).....	36
FIG. 2.5	Transmissão de uma onda de choque de um meio de baixa impedância para um meio de alta impedância de choque: (a) curva pressão-velocidade da partícula; (b) perfil de tensão (MEYERS, 1994).....	39
FIG. 2.6	Transmissão de uma onda de choque de um meio de alta impedância para um meio de baixa impedância de choque: (a) curva pressão-velocidade da partícula; (b) perfil de tensão (MEYERS, 1994).....	39
FIG. 2.7	Ilustração do mecanismo de absorção do impacto balístico realizado pela blindagem multicamada: (a) antes; (b) durante e (c) após o impacto balístico (DA SILVA <i>et al.</i> , 2014).....	40
FIG. 2.8	Reação de cura de uma resina poliéster (RATNA, 2009).....	44

FIG. 2.9	Microestrutura de uma FNL (KALIA <i>et al.</i> , 2011).....	46
FIG. 2.10	Estrutura química da celulose (MOHANTY <i>et al.</i> , 2002).....	47
FIG. 2.11	Estrutura química da lignina (MOHANTY <i>et al.</i> , 2002).....	47
FIG. 2.12	Curauá: (a) <i>Planata Ananas erectifolius</i> ; (b) fibras prontas para uso; (c) imagem eletrônica de uma fibra individual, após sofrer pull-out de resina poliéster (MONTEIRO <i>et al.</i> , 2013; <i>The Curaua Challenge</i> , 2009).....	50
FIG. 2.13	Fases da produção da cultura do Curauá (SENA, 2006 <i>apud</i> MACIEL, 2010).....	51
FIG. 2.14	Visor automotivo fabricado em Nylon 6 reforçado com 20% de fibras de Curauá (<i>The Curaua Challenge</i> , 2009).....	52
FIG. 2.15	Impacto do projétil em uma única fibra (CHEESEMAN & BOGETTI, 2003).....	53
FIG. 3.1	Fibras de Curauá utilizadas no trabalho: (a) Aspecto como recebido; (b) Fibras limpas, desembaraçadas e cortadas nas dimensões da matriz.....	57
FIG. 3.2	Tecido de aramida: (a) Painel de 8 camadas MENEOKV08 (dimensões 150x150x4 mm); (b) Monocamada de tecido (15x15x1 mm).....	58
FIG. 3.3	Placa de alumínio utilizada como camada posterior da blindagem.....	59
FIG. 3.4	Equipamentos para realização dos ensaios mecânicos nas amostras de liga de alumínio: (a) durômetro Wolpert Testor HT 1aa;	

	(b) máquina de ensaios EMIC DL10000.....	60
FIG 3.5	Moinho de bolas MARCONI MA500.....	61
FIG. 3.6	Matriz utilizada na moldagem dos corpos cerâmicos. (a) Peças individuais; (b) Conjunto montado, pronto para receber a carga.....	62
FIG. 3.7	Prensa hidráulica semiautomática NOWAK, com capacidade para 30 toneladas.....	62
FIG. 3.8	Forno INTI FE 1700, utilizado na sinterização das pastilhas cerâmicas.....	63
FIG. 3.9	Matriz utilizada na fabricação dos compósitos.....	66
FIG. 3.10	Prensa hidráulica SKAY, com capacidade para 30 toneladas.....	66
FIG. 3.11	Etapas da fabricação dos compósitos: (a) lubrificação da matriz; (b) acondicionamento das fibras; (c) acondicionamento da resina; (d) prensagem.....	67
FIG. 3.12	Placa de compósito poliéster-fibra de Curauá produzida pela prensagem uniaxial.....	68
FIG. 3.13	Blindagem multicamada: (a) Diagrama esquemático: A é a camada cerâmica, B é o compósito, poliéster ou aramida, C é o alumínio e D é a plastilina; (b) corpo de prova final utilizado nos ensaios balísticos.....	68
FIG. 3.14	Munição calibre 7,62 mm M1.....	69

FIG. 3.15	Equipamento utilizado no ensaio balístico: (a) Provete calibre 7,62 mm com mira à laser; (b) Alvo posicionado na plastilina; (c) Radar doppler; (d) Esquema ilustrando o sistema com barreira óptica modelo B471 da HPI (Fonte: DA SILVA, 2014b).....	71
FIG. 3.16	Medida do trauma (indentação) no material de referência (plastilina).....	71
FIG. 3.17	Dispositivo de fixação das placas no ensaio de velocidade residual, utilizado para fixar um compósito reforçado com fibra de Curauá.....	72
FIG. 3.18	Microscópio eletrônico de varredura JEOL modelo JSM-6460LV.....	73
FIG. 4.1	Gráfico da distribuição de Weibull para (a) densidade geométrica e (b) espessura das pastilhas cerâmicas.....	75
FIG. 4.2	Gráfico da distribuição de Weibull para (a) densidade e (b) espessura das placas de liga de alumínio 5052 H34.....	77
FIG. 4.3	Curvas tensão versus deformação de amostras das placas de liga de alumínio 5052 H34.....	78
FIG. 4.4	Gráfico da distribuição de Weibull para (a) resistência mecânica e (b) deformação máxima das placas de liga de alumínio 5052 H34.....	79
FIG. 4.5	Gráfico da distribuição de Weibull para (a) densidade e (b) espessura dos conjuntos de aramida.....	80
FIG. 4.6	Aspecto microscópico da cerâmica fraturada: (a) 5000x e (b) 10000x.....	83

FIG. 4.7	Blindagem multicamada com tecido de aramida: (a) Antes e (b) após o impacto balístico.....	83
FIG. 4.8	Ensaio relativo à indentação atípica: (a) corpo de prova com aramida e (b) indentação.....	85
FIG. 4.9	Gráficos da distribuição de Weibull da indentação para a blindagem com aramida: (a) série de dados completa; (b) com censura da indentação fora da média.....	86
FIG. 4.10	Gráfico da distribuição de Weibull da indentação para a blindagem com aramida, com o acréscimo dos dados de Da Luz, 2014.....	87
FIG. 4.11	Blindagem multicamada com poliéster puro: (a) Antes e (b) após o impacto balístico.....	87
FIG. 4.12	Gráficos da distribuição de Weibull da indentação para a blindagem com poliéster: (a) série de dados completa; (b) com censura da indentação fora da média.....	89
FIG. 4.13	Ensaio relativo à indentação atípica: corpo de prova com poliéster (a) antes e (b) após o impacto.....	89
FIG. 4.14	Fragmentos do poliéster fraturado: (a) Corpo de prova recuperado; (b) Detalhe da região central do corpo de prova. Micrografias eletrônicas: (c) 100x; (d,e) 1000x.....	91
FIG. 4.15	Espectro de EDS de um dos fragmentos capturados pelo poliéster.....	92
FIG. 4.16	Blindagem multicamada com 10% de Curauá: (a) Antes e (b) após	

o impacto balístico.....	93
FIG. 4.17 Gráficos da distribuição de Weibull da indentação para a blindagem com poliéster reforçado com 10% de Curauá: (a) série de dados completa; (b) com censura da indentação fora da média.....	94
FIG. 4.18 Blindagem multicamada com 10% de Curauá: (a) Antes e (b) após o impacto balístico.....	95
FIG. 4.19 Fragmentos do compósito com 10% de Curauá: (a) Corpo de prova recuperado; (b) Detalhe da região central do corpo de prova. Micrografias eletrônicas: (c) 100x; (d) 2000x; (e) 10000x.....	96
FIG. 4.20 Blindagem multicamada com 20% de Curauá: (a) Antes e (b) após o impacto balístico.....	97
FIG. 4.21 Gráfico da distribuição de Weibull da indentação para a blindagem com poliéster reforçado com 20% de Curauá.....	98
FIG. 4.22 Fragmentos do compósito com 20% de Curauá: (a) Corpo de prova recuperado; (b) Detalhe da região central do corpo de prova. Micrografias eletrônicas: (c) 1000x; (d) 5000x; (e) 10000x.....	100
FIG. 4.23 Blindagem multicamada com 20% de Curauá: (a) Antes e (b) após o impacto balístico.....	101
FIG. 4.24 Gráfico da distribuição de Weibull da indentação para a blindagem com poliéster reforçado com 30% de Curauá.....	103
FIG. 4.25 Fragmentos do compósito com 30% de Curauá: (a) Corpo de prova recuperado; (b) Detalhe da região central do corpo de prova. Micrografias eletrônicas: (c) 100x; (d) 1000x; (e) 5000x.....	104

FIG. 4.26	Blindagem multicamada com 30% de fibras de Curauá dispostas bidirecionalmente: (a) Antes e (b) após o impacto balístico.....	105
FIG. 4.27	Ensaio relativo à indentação elevada: corpo de prova com 30% de Curauá bidirecional (a) antes e (b) após o impacto.....	106
FIG. 4.28	Gráficos da distribuição de Weibull da velocidade VL para os diferentes materiais: (a) P-0%C; (b) P-10%C; (c) P-20%C; (d) P-30%C; (e) Aramida; (f) Liga de Alumínio.....	109
FIG. 4.29	Variação da velocidade limite com o percentual de Curauá e a comparação com a aramida.....	110
FIG. 4.30	Comparação entre as indentações em plastilina dos SBMs de fibra de Curauá e Aramida.....	116
FIG. 4.31	Distribuição de probabilidades de trauma para SBMs com Curauá 30% e Aramida.....	116

LISTA DE TABELAS

TAB. 2.1	Níveis de proteção balística (ABNT NBR 15000, 2005).....	29
TAB. 2.2	Propriedades de algumas FNL em comparação com as fibras sintéticas (MONTEIRO, <i>et al.</i> , 2011).....	49
TAB. 3.1	Composição química da Alumina.....	55
TAB. 3.2	Composição química da Nióbia.....	56
TAB. 3.3	Propriedades mecânicas nominais da liga de alumínio utilizada.....	59
TAB. 3.4	Composição química da liga de alumínio 5052 H34, de acordo com o fornecedor.....	59
TAB. 3.5	Cálculo da densidade média das fibras de Curauá.....	65
TAB. 3.6	Quantidade de cada componente para as diferentes placas de compósito.....	65
TAB. 3.7	Tipo e designação dos corpos de prova para os ensaios balísticos.....	70
TAB. 4.1	Valores médios das propriedades das cerâmicas e parâmetros de Weibull.....	74
TAB. 4.2	Parâmetros de Weibull para a densidade e espessura das placas de liga 5052 H34.....	76
TAB. 4.3	Parâmetros de Weibull para as propriedades mecânicas das placas de alumínio 5052 H34.....	78

TAB. 4.4	Parâmetros de Weibull para a densidade e espessura do conjunto de 18 camadas de tecido de aramida.....	80
TAB. 4.5	Valores médios e desvios padrão de espessura e densidade dos compósitos.....	81
TAB. 4.6	Profundidade da indentação, espessura da camada, velocidade e energia de impacto do projétil para as blindagem com camada intermediária de aramida.....	84
TAB. 4.7	Parâmetros de Weibull, média e desvio padrão da indentação para a blindagem com aramida.....	85
TAB. 4.8	Profundidade da indentação, espessura da camada, velocidade e energia de impacto do projétil para as blindagem com camada intermediária de poliéster puro.....	88
TAB. 4.9	Parâmetros de Weibull, média e desvio padrão da indentação para a blindagem com poliéster.....	88
TAB. 4.10	Profundidade da indentação, espessura da camada, velocidade e energia de impacto do projétil para as blindagem com camada intermediária de poliéster com 10%Curauá.....	93
TAB. 4.11	Parâmetros de Weibull, média e desvio padrão da indentação para a blindagem com poliéster reforçado com 10% de Curauá.....	94
TAB. 4.12	Profundidade da indentação, espessura da camada, velocidade e energia de impacto do projétil para as blindagem com camada intermediária de poliéster com 20%Curauá.....	98
TAB. 4.13	Parâmetros de Weibull, média e desvio padrão da indentação	

	para a blindagem com poliéster reforçado com 20% de Curauá.....	98
TAB. 4.14	Profundidade da indentação, espessura da camada, velocidade e energia de impacto do projétil para as blindagem com camada intermediária de poliéster com 30%Curauá.....	102
TAB. 4.15	Parâmetros de Weibull, média e desvio padrão da indentação para a blindagem com poliéster reforçado com 30% de Curauá.....	102
TAB. 4.16	Profundidade da indentação, espessura da camada, velocidade e energia de impacto do projétil para as blindagem com camada intermediária de poliéster com 30%Curauá (0°/90°).....	105
TAB. 4.17	Valores das velocidades médias de impacto e residual, energia absorvida e velocidade limite para cada componente do sistema de blindagem multicamada.....	107
TAB. 4.18	Parâmetros de Weibull, média e desvio padrão da velocidade limite (VL) para os diferentes materiais.....	108
TAB. 4.19	Parâmetros utilizados no Casamento de Impedâncias.....	111
TAB. 4.20	Valores de densidade, módulo de elasticidade e velocidade da onda elástica das fibras, matriz e compósito poliéster-Curauá.....	112
TAB. 4.21	Resultados dos cálculos do casamento de impedâncias.....	113
TAB. 4.22	Relação de peso e custo de blindagens de nível III.....	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	-	American Society for Testing of Materials
CAEx	-	Centro de Avaliações do Exército
EDS	-	Espectroscopia por dispersão de energia dos elétrons
IME	-	Instituto Militar de Engenharia
MEV	-	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	-	Norma Brasileira
NIJ	-	National Institute of Justice
FNL	-	Fibra Natural Lignocelulósica
ISO	-	International Organization for Standardization
PEG	-	Polietileno Glicol
SBM	-	Sistema de Blindagem Multicamada
UFRJ	-	Universidade Federal do Rio de Janeiro

SÍMBOLOS

S	-	Constante da equação de estado do material
ρ	-	Densidade do material

ρ_{sup}	-	Densidade superficial da blindagem
ρ_m	-	Densidade da matriz
ρ_f	-	Densidade da fibra
ρ_{cp}	-	Densidade do compósito
E_L	-	Energia absorvida
V_m	-	Fração volumétrica da matriz
V_f	-	Fração volumétrica das fibras
V	-	Volume específico
$d\sigma/d\varepsilon$	-	Inclinação da curva tensão <i>versus</i> deformação
E	-	Módulo de elasticidade
E_m	-	Módulo de elasticidade da matriz
E_f	-	Módulo de elasticidade da fibra
E_c	-	Módulo de elasticidade do compósito
L	-	Comprimento da fibra
d	-	Diâmetro da fibra
β	-	Módulo de Weibull
R^2	-	Ajuste da curva de Weibull
θ	-	Unidade característica de Weibull
P	-	Pressão

σ	-	Tensão
σ_T	-	Tensão de ruptura
σ_e	-	Tensão limite de escoamento
ε	-	Deformação
$(\Delta L/L_0)$	-	Ductilidade do material
U_s	-	Velocidade da onda de choque
C_o	-	Velocidade da onda elástica
V_{50}	-	Velocidade limite - 50% de probabilidade de perfuração
V_L	-	Velocidade limite
V_s	-	Velocidade de choque
V_R	-	Velocidade residual
U_p	-	Velocidade de partícula
C	-	Velocidade do som no material
V_L	-	Velocidade limite
V_r	-	Velocidade residual
m	-	Massa
m_p	-	Massa de poliéster
m_c	-	Massa de curauá
m_{end}	-	Massa de endurecedor

t	-	Tempo
t _h	-	Espessura
HRB	-	Dureza Rockwell B
Z	-	Impedância de Choque
P-0%C	-	Resina poliéster pura
P-10%C	-	Compósito reforçado com 10% de Curauá
P-20%C	-	Compósito reforçado com 20% de Curauá
P-30%C	-	Compósito reforçado com 30% de Curauá
P-30%C-B	-	Compósito reforçado com 30% de Curauá Bidirecional
P _{10x12"}	-	Peso de placa 10x12"
Custo _{10x12"}	-	Custo de placa 10x12"

RESUMO

O ataque com armas de fogo é motivo de preocupação pessoal, especialmente para soldados em conflitos armados, bem como policiais e civis envolvidos com segurança pública. A proteção contra este tipo de ataque requer proteção adequada, que só pode ser obtida por meio de blindagem balística. Atualmente, a proteção contra projéteis de alta velocidade (>800 m/s), como o 7,62 mm, é comumente composta por diferentes materiais dispostos em camadas, nos denominados Sistemas de Blindagem Multicamada (SBMs). No presente trabalho, foram realizados ensaios com munição 7,62 mm M1 para avaliação do comportamento balístico de SBMs que possuem um cerâmico ($\text{Al}_2\text{O}_3+4\%\text{Nb}_2\text{O}_5$) como camada frontal, liga de alumínio (5052 H34) como camada posterior, e diferentes materiais como camada intermediária. Tecido de aramida, o material mais utilizado atualmente nesta aplicação, e compósitos de matriz poliéster reforçados com 0, 10, 20 e 30% de fibras de Curauá foram testados como parte integrante dos SBMs. Os resultados mostraram que os compósitos de fibras de Curauá são uma boa alternativa ao tecido de aramida como camada intermediária nos SBMs. Assim como a aramida, os compósitos de fibras de Curauá obedeceram ao requisito da norma NIJ-0101.06 (2008) de resistir à penetração do projétil e imprimir deformação menor que 44 mm no material de referência (plastilina). Em relação à camada de poliéster puro, a adição de até 30%vol. de fibras de Curauá na matriz não alterou significativamente a magnitude do trauma registrado no material de referência (~ 20 mm), no entanto, proporcionou uma melhora visível da coesão da camada intermediária após o impacto balístico, afetando positivamente a confiabilidade da blindagem. Deste modo, considera-se o compósito com 30% de fibras de Curauá como potencial substituto para a aramida em SBMs, com a vantagem de utilizar matéria prima nacional, de baixo custo e ambientalmente correta. Observou-se que a contribuição da camada intermediária no comportamento geral da blindagem depende, em grande parte, da captura de fragmentos da cerâmica depositados na superfície das fibras e da matriz. Outras formas de dissipação de energia são o descolamento e fratura das fibras, fratura da matriz e delaminação das camadas de fibras.

ABSTRACT

The assault using firearms is a matter of personal concern, especially to soldiers in armed conflicts, as well as police officers and civilians involved with public security. The protection against this kind of assault requires appropriate protection, which can be obtained only with ballistic armor. Nowadays, the protection against high velocity projectiles (>800 m/s), as 7.62 mm ammunition, is commonly composed of different materials arranged in layers, named Multilayered Armor Systems (MAS). In the present work, tests have been performed using 7.62 mm M1 ammunition to evaluate the ballistic behavior of MAS which possess a ceramic material ($\text{Al}_2\text{O}_3+4\%\text{Nb}_2\text{O}_5$) as front layer, an aluminum alloy (5052 H34) as back layer, and different materials as intermediate layer. An aramid woven fabric, the most common material in this application, and polyester matrix composites reinforced with 0, 10, 20 and 30% of Curaua fibers were tested as part of the MAS. The results showed that Curaua fibers are a good alternative to the aramid fabric as intermediate layer in the MAS. As well as aramid, the composites reinforced with Curaua fibers met the NIJ-0101.06 (2008) standard requirement of resisting to the penetration of the projectile and to imprint a deformation smaller than 44 mm in the backing material (clay witness). Regarding to pure polyester layer, the addition of up to 30%vol. of Curaua fibers in the matrix doesn't significantly change the magnitude of the trauma in the backing material (~20 mm). However, it provided a noticeable improvement in the intermediate layer cohesion after the ballistic impact, positively affecting the reliability of the armor. Thereby, the 30% Curaua fiber composite can be considered as potential substitute to aramid in the MAS, with the advantage of using national raw products, with low cost and environmentally friendly materials. It has been observed that the contribution of the intermediate layer to the general behavior of the armor system depends largely on the capture of ceramic fragments on the surface of the fibers and matrix. Other forms of energy dissipation are debonding and fracture of the fibers, fracture of the matrix and delamination of the fiber layers.

1 INTRODUÇÃO

O ataque com armas de fogo é motivo de preocupação pessoal, tanto para soldados em conflitos, quanto para policiais e civis envolvidos com segurança pública. A proteção contra este tipo de ataque requer proteção adequada, que só pode ser obtida por meio de blindagem balística.

Segundo o Instituto Nacional de Justiça Americano (NIJ Standard-0101.06, 2008), blindagem balística é “um item ou equipamento que promove proteção contra ameaças balísticas específicas dentro da sua área coberta”. Cada tipo de ameaça (projétil) exige um nível de proteção específico para que seja barrado e não cause dano à pessoa ou equipamento posicionado em sua rota. Os níveis podem variar de proteção contra ameaças mais leves (níveis I, IIA e II), que incluem os calibres .38, .357 e 9 mm, até as mais pesadas (níveis IIIA, III e IV) como .44, e 7,62 mm.

As estatísticas brasileiras de violência revelam que, nas últimas décadas, houve um aumento significativo nas mortes por armas de fogo no país. Entre 1980 e 2012, acima de 880 mil pessoas morreram no Brasil como resultado de disparos de algum tipo de arma de fogo, sendo que neste período houve um aumento de 556,6% dos homicídios utilizando estas armas, contrastando com crescimento de 60% da população (WAISELFISZ, 2015).

O aumento da violência, juntamente com o desenvolvimento recente na tecnologia de armas e munições, tem desafiado os pesquisadores da área de blindagem balística a inovarem na pesquisa de novos materiais que resistam aos mais diversos artefatos, buscando desenvolver produtos que atendam as aplicações civis e militares. Vários materiais têm sido testados para resistirem às mais diversas ameaças (MEDVEDOVSKI, 2010; SERJOU EI *et al.* 2015; TABIEI & NILAKANTAN, 2008; WANG *et al.*, 2014).

Atualmente, nenhum material apresenta, isoladamente, as propriedades necessárias para suportar as tensões resultantes de um impacto balístico como o de nível III, exceto no caso de grandes espessuras. Um material cerâmico, em geral, apresenta alta resistência à compressão, mas sua resistência à tração costuma ser baixa, e ao ser submetido ao impacto balístico, sofre esforços de tração na face

oposta ao impacto e é totalmente fragmentado. Um material metálico, por outro lado, é pesado para uso em blindagem pessoal, limitando a mobilidade do combatente (DA SILVA *et al.*, 2014; MEDVEDOVSKI, 2006; SERJOUEI *et al.* 2015; YADAV & RAVICHANDRAN, 2003).

Uma solução é a fabricação de sistemas de blindagem multicamada (SBMs), que combinam as propriedades de diferentes materiais. Na camada frontal, um material cerâmico é capaz de resistir à carga de compressão da chegada do projétil e de deformar e/ou fragmentar a sua ponta, absorvendo grande parte da energia. A energia residual dos fragmentos do projétil e da cerâmica é absorvida por outra camada, que pode ser formada por materiais poliméricos ou metálicos. Uma terceira camada também pode ser considerada. Para estas camadas posteriores, em geral, pode ser usado alumínio aeronáutico, fibras de aramida, entre outros materiais. Portanto, o SBM tem a função de absorver a energia do projétil, bem como evitar a penetração de fragmentos do projétil e de componentes da blindagem (DA SILVA *et al.*, 2014; MEDVEDOVSKI, 2010; MONTEIRO *et al.*, 2014; SERJOUEI *et al.* 2015).

Ao entrar em contato com a blindagem, o projétil em alta velocidade gera uma onda de compressão que se propaga nas direções longitudinal e transversal, com velocidade característica. Nos SBMs, ocorre transmissão e reflexão das ondas de tensão nas interfaces entre os diferentes materiais, e a impedância das camadas é que irá ditar se a onda refletida terá natureza trativa ou compressiva. Segundo Meyers, 1994, a impedância de choque de um material é proporcional à sua densidade. Se o material da segunda camada possui impedância de choque menor do que o material da primeira camada, a onda refletida terá natureza trativa, e a energia da onda transmitida pelo pulso de compressão será menor. Assim, é natural que a segunda camada da blindagem seja composta de materiais mais leves, por apresentarem menor impedância de choque, e assim uma maior parcela da energia incidente é absorvida pela primeira camada da blindagem. Materiais cerâmicos ($\sim 3.5 \text{ g/cm}^3$) são geralmente utilizados na camada frontal da blindagem, por possuírem alta impedância de choque, sendo estilhaçados após o impacto, absorvendo grande parte da energia na criação de superfícies de fratura. Na segunda camada, tecidos ou compósitos de fibras leves ($\sim 1.5 \text{ g/cm}^3$) são utilizados. Uma terceira camada de um metal leve dúctil, como uma liga de alumínio ($\sim 2.7 \text{ g/cm}^3$) pode ser considerada.

Atualmente, tecidos de fibras sintéticas de alto desempenho, como a aramida (Kevlar® e Twaron®) e o polietileno de ultra alto peso molecular (Spectra® e Dyneema®), têm sido utilizados na segunda camada da blindagem (MOBASSERI *et al.*, 2013. MONTEIRO *et al.* 2014; WANG, 2014). No entanto estas fibras são caras, não-renováveis e tem vida útil relativamente curta. Neste cenário, os compósitos reforçados com fibras naturais lignocelulósicas (FNL) surgem como alternativa aos tecidos de fibras sintéticas em SBMs, por serem leves, de baixo custo e ambientalmente corretos (FARUK *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2009). Estes materiais podem apresentar boa eficiência de proteção balística, e nos últimos anos, há um crescente interesse dos pesquisadores em desenvolver as propriedades destes compósitos para a presente aplicação (ABIDIN *et al.*, 2013; ALI *et al.*, 2011; MARSYAHYO *et al.*, 2009; MONTEIRO *et al.*, 2015; RADIF *et al.*, 2011; WAMBUA *et al.*, 2007).

O Brasil 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 é área agricultável, o que equivale a 152,5 milhões de hectares (BRASIL, 2004). Dentre as FNL, destacam-se as fibras de Curauá, que são extraídas das folhas do *Ananas erectifolius*, da mesma família do abacaxi (bromeliáceas). Além de sua utilização tradicional (redes, cobertores e tapetes), as fibras de Curauá têm sido largamente utilizadas em compósitos na indústria automobilística (MONTEIRO *et al.*, 2013; *The Curaua Challenge*, 2009). Tendo em vista as boas propriedades das FNL, bem como o potencial brasileiro para sua produção, é de grande interesse a pesquisa de novas aplicações para estas fibras, especialmente aplicações de alta tecnologia, em produtos de mais alto valor agregado que beneficiem as comunidades produtoras.

No presente trabalho, foi investigado o desempenho balístico de um SBM, utilizando metodologia especificada pela norma NIJ-0101.06, baseada na deformação que a blindagem provoca em um bloco de plastilina, material argiloso que simula a consistência do corpo humano. Esse SBM é constituído de uma camada frontal de alumina dopada com nióbia (GOMES, 2004), seguida de um compósito de matriz poliéster reforçado com fibras de Curauá, e uma camada posterior de liga de alumínio 5052 H34. O desempenho balístico destas blindagens foi comparado com o de uma blindagem convencional com tecido de aramida tipo

Kevlar®. Foi avaliada também a contribuição de cada material através de testes balísticos individuais e os seus mecanismos de fratura foram estudados.

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 contribuirá 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 FNL são mais baratas, e, 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®). Algumas destas FNL e seus tecidos possuem desempenho similar às sintéticas, quando utilizadas em blindagens multicamada (DA CRUZ, 2015; DA LUZ, 2014; DA SILVA, 2014b; DE ARAÚJO, 2015; MILANEZI, 2015; MONTEIRO *et al.*, 2015).

1.2 OBJETIVO DO ESTUDO

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de um SBM que possua um compósito de matriz poliéster reforçado com fibras de Curauá como camada intermediária. As fibras de Curauá serão incorporadas em duas configurações distintas, fibras contínuas e alinhadas, nas frações de 10, 20 e 30% em volume, e fibras contínuas e alinhadas bidirecionalmente (0°/90°). Serão comparados os

resultados com os de camada intermediária de poliéster puro e de tecido de aramida.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do presente trabalho estão relacionados abaixo:

1. Verificar se os SBMs satisfazem um dos critérios de resistência balística da norma NIJ 0101.06 (2008);
2. Comparar o desempenho dos materiais da camada intermediária por meio dos valores de indentação característica na plastilina, e pelo valor da velocidade limite;
3. Associar o desempenho balístico com a impedância de choque dos materiais testados como camada intermediária;
4. Verificar a fração de fibras de Curauá (10, 20 ou 30% vol.) que leva ao melhor desempenho balístico;
5. Comparar o peso resultante e o custo dos SBMs analisados, visando o uso comercial em blindagem pessoal;
6. Verificar os mecanismos de fratura atuantes nos materiais testados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BLINDAGEM BALÍSTICA

Para o Instituto Nacional de Justiça Americano (NIJ Standard-0101.06, 2008), blindagem balística é o “item ou equipamento que promove proteção contra ameaças balísticas específicas dentro da sua área coberta”. No Brasil, o decreto nº 3665 da Presidência da República (2000) utiliza a seguinte definição: “O artefato projetado para servir de anteparo a um corpo de modo a deter o movimento ou modificar a trajetória de um projétil contra ele disparado, protegendo-o, impedindo o projétil de produzir seu efeito desejado” (BRASIL, 2000).

As especificações de desempenho para os materiais utilizados em blindagem pessoal (coletes) e os seus métodos de teste, são estabelecidas pela norma americana NIJ-0101.06 (2008), e no Brasil pela norma ABNT NBR 15000. A TAB. 2.1 mostra as condições de teste para a avaliação do nível de proteção da blindagem, bem como a velocidade que o projétil deve alcançar.

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

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15000, 2005.

Ainda que não haja perfuração no sistema de blindagem, para que este seja classificado de acordo com algum nível de proteção, é necessário que não sofra uma deformação excessiva, que poderia causar trauma importante no usuário. Segundo a NIJ-0101.06, a deformação máxima permitida é de 44 mm, e deve ser medida em um material de referência que simule a consistência do corpo humano. O material de referência (*backing material*) deve ser um bloco homogêneo de massa de modelar à base de óleo, não-endurecível, colocado em contato com a face posterior da placa de blindagem no momento do ensaio balístico, como é mostrado na FIG. 2.1.

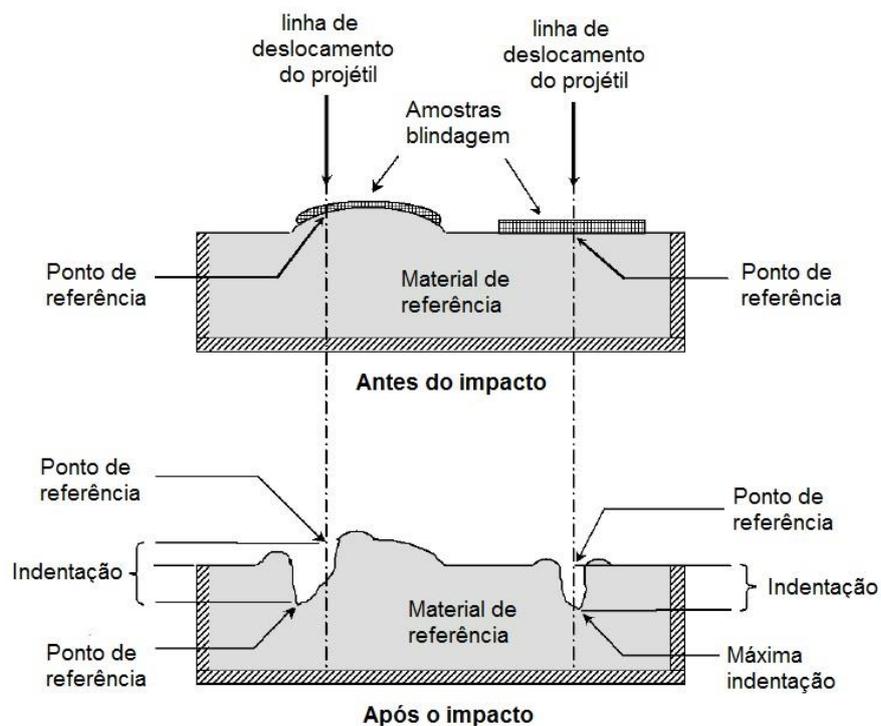


FIG. 2.1 Trauma promovido pelo projétil medido por indentação no material de referência.

Fonte: Adaptado de NIJ-0101.06, 2008.

Existem outras formas de avaliar a eficácia de um sistema de blindagem balística. As mais importantes são baseadas em medidas de velocidade em que um projétil específico atinge a blindagem, buscando-se determinar a velocidade limite (V_L) abaixo da qual o projétil é barrado, e acima da qual a blindagem é perfurada. O principal estimador para V_L é o parâmetro conhecido como V_{50} , denominado limite balístico, que é a velocidade em que a probabilidade do projétil perfurar a blindagem

é de 50% (WANG *et al.*, 2014; ZUKAS, 1980). O objetivo deste ensaio é conseguir no mínimo três tiros que penetram a blindagem e outros três que são barrados pela blindagem. Com base nos valores de velocidade dos tiros o parâmetro V_{50} pode ser calculado (WANG *et al.*, 2014).

Em alguns casos, não é possível o cálculo do parâmetro V_{50} devido à natureza do projétil. No caso de munição 7,62 mm, por exemplo, mesmo após ajuste da massa do propelente, o disparo é efetuado a uma velocidade relativamente alta para o cálculo de V_{50} , para certos tipos de blindagem, e em outras situações o projétil não abandona o equipamento de disparo.

Por estes motivos, um modelo analítico pode ser necessário para estimativa da V_L , e um modelo simples pode ser baseado na energia absorvida pela blindagem (MORYE *et al.*, 2000). Se a velocidade de choque de um projétil é V_S e a velocidade residual V_R , a energia perdida durante impacto, E_L é dada pela EQ. 2.1.

$$E_L = \frac{1}{2}m(V_S^2 - V_R^2) \quad \text{EQ. 2.1}$$

Assim, se a velocidade residual for zero, ou seja, se sistema de blindagem absorver totalmente a energia cinética do projétil, o limite balístico pode ser estimado pela EQ. 2.2.

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

2.2 COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS MATERIAIS

Como o impacto de um projétil no sistema de blindagem possui natureza dinâmica, serão necessárias algumas considerações acerca do comportamento dinâmico dos materiais, isto é, quando estes são submetidos a altas taxas de deformação. Tais considerações serão realizadas nas seções que se seguem.

2.2.1 CONCEITOS GERAIS SOBRE ONDAS DE TENSÃO

Ainda que a aplicação de uma força externa sobre um corpo seja, por definição, um processo dinâmico, se a taxa de deformação é baixa (10^{-5} a 10^{-1} s^{-1}), o processo de deformação consistirá de uma sequência de passos na qual o corpo pode ser considerado como em equilíbrio estático. Para altas taxas de deformação (acima de 10^2 s^{-1}), as tensões internas não são transmitidas instantaneamente da região de aplicação da carga para as outras regiões. Isto quer dizer que as tensões têm de “viajar” através do corpo como ondas, com velocidade característica, que pode ser medida ou estimada com boa aproximação (MEYERS, 1994; ZUKAS, 1980).

Uma onda de tensão, portanto, pode ser entendida como uma sucessão de impactos entre átomos adjacentes. Cada átomo, ao ser acelerado a uma certa velocidade, transmite parte de seu momento para o átomo vizinho. A massa, distância interatômica e as forças de atração e repulsão entre os átomos determinam a forma com que o pulso será transmitido de um ponto a outro (MEYERS, 1994).

Quando o estímulo externo não supera a tensão de escoamento do material, o pulso gerado é chamado de onda elástica. A velocidade desta onda depende da densidade do material (ρ) e do módulo de elasticidade (E), e, supondo que o material é contínuo, pode ser obtida através da EQ. 2.3 (KANEL, 2000; MEYERS, 1994).

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

Quando o estímulo supera a tensão de escoamento de um material dúctil, ocorre a deformação plástica. Se o processo é dinâmico, o pulso de tensão que excede o limite elástico irá se decompor em uma onda elástica e uma onda plástica. A velocidade da onda plástica pode ser calculada pela EQ. 2.4 (MEYERS, 1994).

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

Como pode ser visto na FIG. 2.2, o gradiente $d\sigma/d\epsilon$ é constante e igual ao módulo de elasticidade do material no regime elástico, e variável no regime plástico. Portanto, a EQ. 2.3 é um caso especial da EQ. 2.4, para o regime elástico linear. Adicionalmente, como $d\sigma/d\epsilon$ é maior no regime elástico, as ondas elásticas possuem velocidade superior às plásticas.

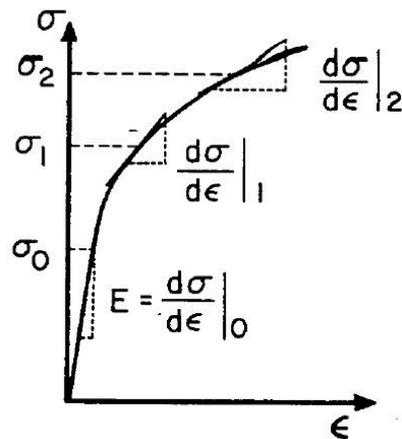


FIG. 2.2 Curva tensão deformação para um material dúctil.

Fonte: Adaptado de MEYERS, 1994.

Quando a amplitude das ondas de tensão excede grandemente a tensão de escoamento dinâmico do material, as tensões cisalhantes podem ser desprezadas em comparação com a componente hidrostática (normal) compressiva da tensão. Por este motivo, o tratamento dado a fluidos pode ser empregado (MEYERS, 1994).

Neste caso, como as regiões de maior amplitude da frente de onda se propagam com velocidade maior que as de menor amplitude, a perturbação causada provoca uma descontinuidade na pressão, temperatura (ou energia interna) e na densidade. Tal descontinuidade é denominada onda de choque (MEYERS, 1994; ZEL'DOVICH, 1967).

O conceito da propagação de uma onda de choque e as equações de conservação envolvidas podem ser melhor entendidos com o auxílio de um modelo simples, de um cilindro de seção reta unitária penetrado por um pistão (FIG. 2.3) (MEYERS, 1994).

Inicialmente, o pistão está em repouso. Este é empurrado a uma velocidade U_p , em direção a um material compressível de densidade ρ_0 , que se encontra no interior

do cilindro a uma pressão P_0 . Após um tempo t_1 , a região altamente comprimida à frente do pistão se move uma distância $U_s t_1$, onde U_s é a velocidade de propagação da perturbação à frente do pistão. Ao mesmo tempo, o pistão se move uma distância $U_p t_1$. A região comprimida possui pressão $P > P_0$ e densidade $\rho > \rho_0$. A interface que separa a região que se move (comprimida) da região estacionária é chamada frente de choque. Portanto, a onda de choque se move a uma distância $U_s t_1$, maior que a distância que o pistão percorre ($U_p t_1$), e a tendência é que a região comprimida se torne maior com o passar do tempo.

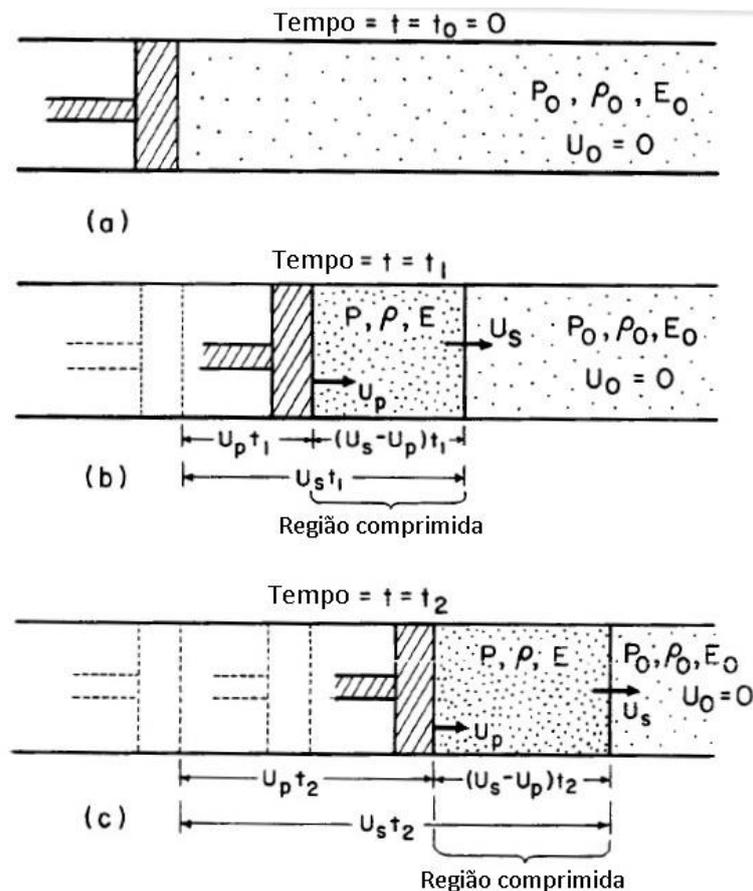


FIG. 2.3 Modelo físico da propagação de uma onda de choque: Sucessivas posições de um pistão idealizado em um cilindro com fluido compressível.

Fonte: Adaptado de MEYERS, 1994.

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

Conservação de massa: $\rho_0 U_s = \rho(U_s - U_p)$ EQ. 2.5

Conservação de momento: $(P - P_0) = \rho_0 U_s U_p$ EQ. 2.6

Conservação de energia: $E - E_0 = \frac{1}{2}(P + P_0)(V_0 - V)$ EQ. 2.7

Estas relações assumem as seguintes premissas:

- a) O choque é uma superfície descontínua e sem espessura aparente;
- b) O módulo de cisalhamento do material é zero, de forma que o material se comporta como um fluido;
- c) Forças externas ao sistema (como forças gravitacionais) e condução de calor na frente de choque podem ser desprezadas;
- d) Não há comportamento elasto-plástico;
- e) O material não sofre transformações de fase.

Mas o requisito fundamental para o estabelecimento de uma onda de choque é que a velocidade do pulso, U , aumenta com o aumento da pressão. Matematicamente (EQ. 2.8):

$$\left(\frac{\partial^2 P}{\partial U^2}\right) > 0, P \uparrow, U \uparrow \quad \text{EQ. 2.8}$$

Nas equações de conservação (EQ. 2.5, 2.6 e 2.7), cinco variáveis estão presentes: Pressão (P), velocidade da partícula (U_p), velocidade da frente de choque (U_s), volume específico (V), ou densidade (ρ) e energia (E). Portanto, uma equação adicional é necessária para determinação de todos os parâmetros, para que sejam calculados como função de um destes. A equação adicional, obtida experimentalmente, é uma equação polinomial com parâmetros $C_0, S_1, S_2, S_3, (\dots), S_n$, que descreve empiricamente a relação entre U_s e U_p (EQ. 2.9), e é conhecida como equação de estado do material.

$$U_s = C_0 + S_1 U_p + S_2 U_p^2 + (\dots) + S_n U_p^n \quad \text{EQ. 2.9}$$

Onde: $S_1, S_2, (\dots), S_n$ são parâmetros empíricos e C_0 é a velocidade do som no material à pressão zero.

Para a maioria dos materiais os termos de ordem superior são nulos, e então a EQ. 2.9 se reduz a uma relação linear (EQ. 2.10).

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

A EQ. 2.10 descreve com boa precisão a resposta ao choque dos materiais que não sofrem transformações de fase, e que não sejam porosos. Os valores de C_0 e S_1 são frequentemente tabelados na literatura. Considerando o conjunto das EQs. 2.5, 2.6, 2.7 e 2.10, podem ser calculadas as relações $P-U_s$, $P-U_p$, $P-\rho$, $P-(V/V_0)$, $E-U_s$, entre outras.

2.2.2 INTERAÇÃO E REFLEXÃO DE ONDAS DE CHOQUE

A interação de uma onda de choque com os diferentes materiais da blindagem e suas interfaces pode ser analisada pelo método do casamento de impedâncias (MEYERS, 1994). Em trabalhos recentes, vários autores tem utilizado esta abordagem, especialmente na discussão de blindagens multicamada (DA CRUZ, 2015; DA LUZ, 2014; DA SILVA, 2014b; DE ARAÚJO, 2015; DOS SANTOS, 2012).

Considerando a geometria mostrada na FIG. 2.4, será mostrado que o método do casamento de impedâncias é uma solução gráfica adequada para o cálculo dos parâmetros de choque de um material ao sofrer o impacto balístico.

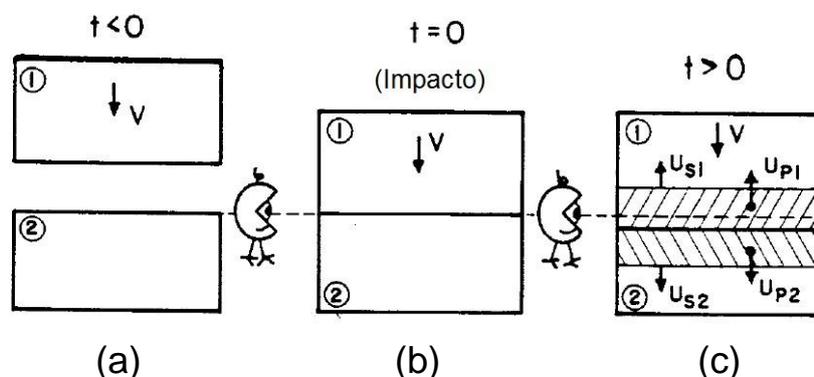


FIG. 2.4 Sequência de eventos no impacto balístico: (a) antes do impacto; (b) no instante do impacto; (c) Após o impacto;

Fonte: Adaptado de MEYERS, 1994.

A FIG. 2.4 ilustra um modelo simples que pode ser utilizado para que haja produção de ondas de choque. É o chamado impacto planar. Este modelo considera que as superfícies que sofrem o impacto (projétil e alvo) são planos paralelos entre si e normais ao eixo de movimentação do projétil. “Planos paralelos”, neste caso, significa que todos os pontos das duas superfícies estabelecem contato ao mesmo tempo. Antes do impacto, o projétil viaja a uma velocidade V , enquanto o alvo está em repouso. Após o impacto, duas ondas de choque compressivas são criadas: Uma viaja pelo alvo com velocidade U_{s2} e outra pelo projétil, com velocidade U_{s1} . A porção não comprimida do projétil ainda se move com velocidade V enquanto a porção não comprimida do alvo ainda está em repouso. A fim de prever a pressão no alvo e no projétil, duas condições são assumidas para desenvolvimento das equações (MEYERS, 1994):

a) O material tem de ser contínuo ao longo da interface, o que significa que a mesma velocidade existe na região comprimida de ambos os lados, projétil e alvo (regiões hachuradas na FIG. 2.4c). Se as velocidades de partícula fossem diferentes, seriam formadas regiões com vazios ou regiões superdensas. Matematicamente (EQ.2.11):

$$V_s - U_{p1} = U_{p2} \quad \text{EQ. 2.11}$$

b) A pressão deve ser a mesma, senão haveria a formação de outro pulso (EQ. 2.12).

$$P_1 = P_2 \quad \text{EQ. 2.12}$$

Como a interface de impacto se move para manter a pressão constante (observar a mudança em relação ao observador, FIG 2.4c), a velocidade U_{p1} deve ser medida em relação a um referencial móvel denominado referencial Lagrangeano.

Utilizando-se as equações EQ. 2.6 e 2.10 é possível chegar às equações que relacionam às pressões com as velocidades de partícula (EQ. 2.13 e EQ. 2.14).

$$P_1 = \rho_{01} C_1 U_{p1} + \rho_{01} S_1 U_{p1}^2 \quad \text{EQ. 2.13}$$

$$P_2 = \rho_{02} (C_2 + S_2 U_{p2}) U_{p2} \quad \text{EQ. 2.14}$$

Fazendo $P_1=P_2$, obtém-se (EQ. 2.15):

$$P_1 = \rho_{01}C_1(V - U_{p2}) + \rho_{01}S_1(V - U_{p2})^2 \quad \text{EQ. 2.15}$$

Uma série de cálculos e considerações deve ser feita para se obter as velocidades de partícula em função da velocidade de incidência do projétil. A fim de acelerar e facilitar os cálculos utiliza-se uma solução gráfica chamada de método do casamento de impedâncias, que consiste basicamente em representar as equações EQ. 2.14 e 2.15 graficamente. Para o projétil é necessário uma mudança de coordenadas: A origem é deslocada de 0 para V_s , e a curva é invertida (U_p para $-U_p$). A solução é dada pela interseção entre as curvas, portanto, P , U_{p1} e U_{p2} podem ser determinados.

O método do casamento de impedâncias pode ser aplicado à passagem da onda de choque pelas interfaces de uma blindagem multicamada, ou seja, a pressão P que será gerada para uma certa velocidade de partícula U_p poderá ser medida através de um parâmetro denominado impedância de choque (MEYERS, 1994).

A impedância de choque é definida como o produto da densidade ρ_0 e a velocidade da onda de choque (U_s). Na falta de U_s , este parâmetro pode ser aproximado pela velocidade da onda sônica C_0 . Dois casos serão analisados:

a) *A transmissão de uma onda de choque de um material A de baixa impedância para um material B de alta impedância:* Este é o caso, por exemplo, de um material A, da camada externa, ser menos denso que o material B, da camada intermediária. A FIG. 2.5a mostra a curva $P-U_p$ para os materiais A e B. A inclinação da linha pontilhada na pressão P_1 é a impedância de choque ρ_0U_s , e a curva AR consiste na inversão da curva A, como mencionado anteriormente, sendo o ponto (U_{p1}, P_1) comum entre A e AR. A curva AR deve passar por P_1 e alcançar a curva B em P_2 , pois esta é a pressão no meio B.

Como mostram os perfis de pressão da FIG. 2.5b, ao atingir a interface, a pressão P_1 da frente de choque é aumentada descontinuamente para P_2 , para que o equilíbrio seja alcançado. A partir daí, uma onda de choque passa a se propagar em A e outra em B. Entre t_3 e t_4 esta frente de pressão encontra a onda remanescente e a pressão cai para $P_1 - P_2$ (onda compressiva). Como a velocidade de partícula na região de alta pressão é U_{p2} em A e B, a continuidade de pressão é assegurada.

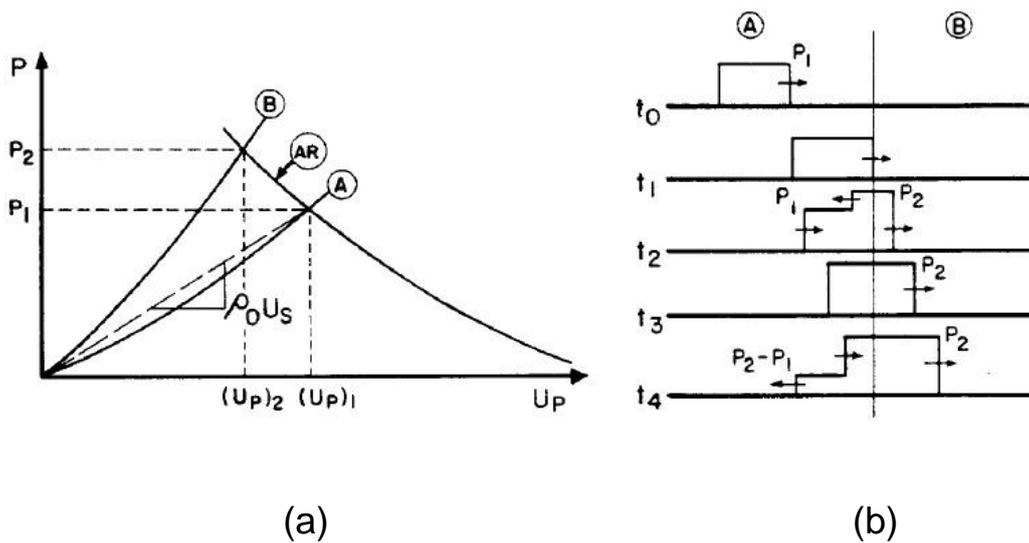


FIG. 2.5 Transmissão de uma onda de choque de um meio de baixa impedância para um meio de alta impedância de choque: (a) curva pressão-velocidade da partícula; (b) perfil de tensão.

Fonte: Adaptado de MEYERS, 1994.

b) A transmissão de uma onda de choque de um material A de alta impedância para um material B de baixa impedância: É a situação inversa (FIG. 2.6), como de um material A, da camada externa, ser mais denso que o material B, da camada intermediária. A diferença é que $P_2 < P_1$, e no tempo t_4 , um pulso trativo é que será formado, e irá se propagar em ambas as direções (FIG. 2.6b). Caso a onda trativa possua uma amplitude suficientemente alta ocorrerá o estilhaçamento do material.

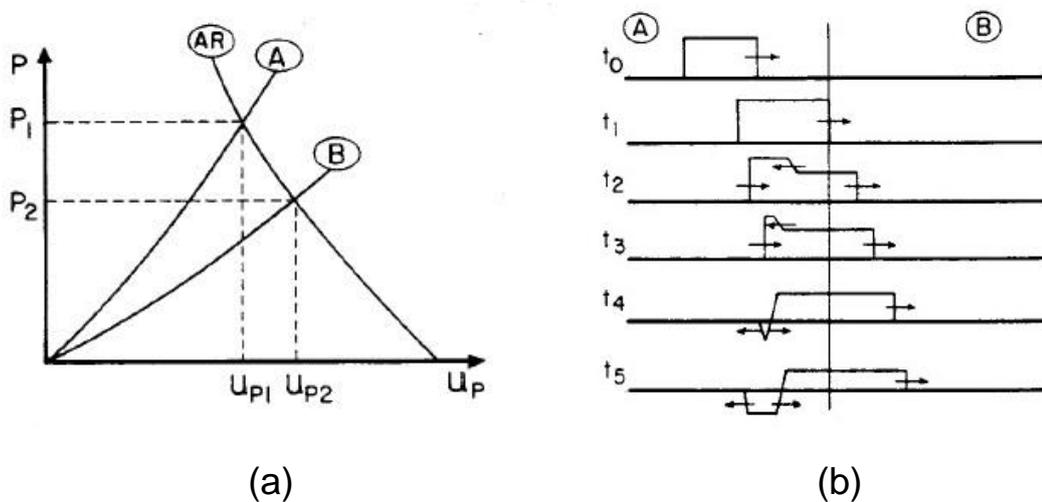


FIG. 2.6 Transmissão de uma onda de choque de um meio de alta impedância para um meio de baixa impedância de choque: (a) curva pressão-velocidade da partícula; (b) perfil de tensão.

Fonte: Adaptado de MEYERS, 1994.

2.3 SISTEMAS DE BLINDAGEM MULTICAMADA

Atualmente, nenhum material apresenta, isoladamente, as propriedades necessárias para suportar as tensões resultantes de um impacto balístico como o de nível III, exceto no caso de grandes espessuras. Um material cerâmico, em geral, apresenta alta resistência à compressão, mas sua resistência à tração costuma ser baixa, e ao ser submetido ao impacto balístico, sofre esforços de tração na face oposta ao impacto e é totalmente fragmentado. Um material metálico, por outro lado, é pesado para uso em blindagem pessoal, limitando a mobilidade do combatente (DA SILVA *et al.*, 2014; MEDVEDOVSKI, 2006; SERJOUEI *et al.* 2015; YADAV & RAVICHANDRAN, 2003).

Uma solução é a fabricação de sistemas de blindagem multicamada, que combinam as propriedades de diferentes materiais. A FIG. 2.7 ilustra as etapas do impacto balístico em um sistema de blindagem multicamada. Na camada frontal, um material cerâmico é capaz de resistir à carga de compressão da chegada do projétil e de fragmentar a sua ponta, absorvendo grande parte da energia. A energia residual dos fragmentos do projétil e da cerâmica é absorvida por outra camada, que pode ser formada por materiais poliméricos e/ou metálicos. Uma terceira camada também pode ser considerada. Para estas camadas posteriores, em geral, pode ser usado alumínio aeronáutico, fibras de aramida, entre outros materiais (DA SILVA *et al.*, 2014; MEDVEDOVSKI, 2010; MONTEIRO *et al.*, 2014; SERJOUEI *et al.* 2015).

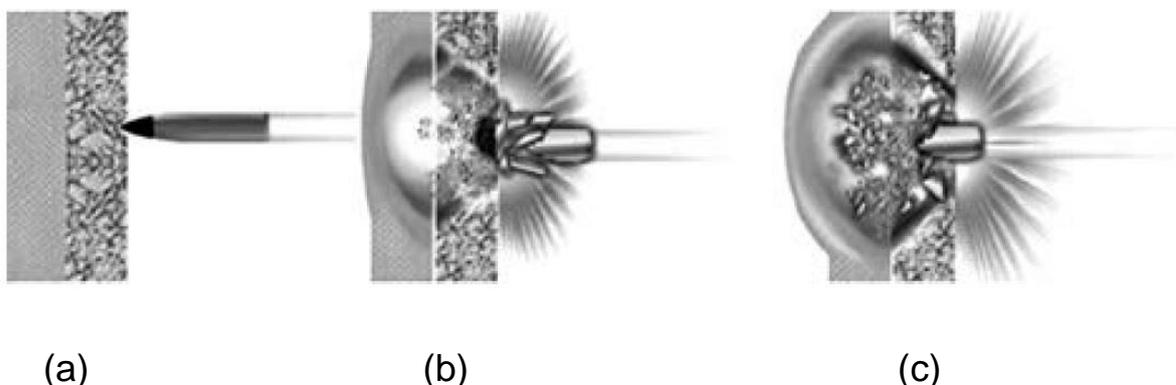


FIG. 2.7 Ilustração do mecanismo de absorção do impacto balístico realizado pela blindagem multicamada: (a) antes; (b) durante e (c) após o impacto balístico.

Fonte: Adaptado de DA SILVA *et al.*, 2014.

Como foi visto anteriormente, cada camada da blindagem possui diferentes funções e necessitam de materiais com propriedades adequadas. Neste trabalho, como em trabalhos anteriores (DA CRUZ, 2015; DA LUZ, 2014; DA SILVA, 2014b; DE ARAÚJO, 2015), optou-se pela seguinte configuração: camada externa de alumina dopada com nióbia, camada intermediária de material compósito reforçado com fibra natural e camada interna de alumínio 5052 H34. Dada a importância e a complexidade destes materiais (e de seu comportamento dinâmico), as peculiaridades das camadas serão analisadas individualmente nas próximas seções.

2.4 CAMADA FRONTAL: MATERIAL CERÂMICO

Cerâmicos são materiais inorgânicos formados por elementos metálicos e não-metálicos, geralmente processados em altas temperaturas para obtenção de uma estrutura densa e resistente (CALLISTER & RETHWISCH, 2012). São materiais rígidos, resistentes à compressão, duros, frágeis e pouco resistentes ao impacto. No caso de impacto balístico, são muito eficientes em absorver a energia cinética do projétil e em dissipá-la na produção de superfícies de fratura (GOMES, 2004). Como já foi mencionado na seção 2.2.2, ocorre o estilhaçamento do material frágil devido a uma onda trativa que é resultado da reflexão da onda de choque na face oposta ao impacto.

Diferentes materiais cerâmicos vêm sendo utilizados em proteção balística. Alumina (Al_2O_3), carbetos de silício (SiC), carbetos de boro (B_4C), bem como alguns nitretos e boretos são exemplos. A alumina, apesar de relativamente densa (cerca de $3,95 \text{ g/cm}^3$), tem sido largamente utilizada em proteção balística por suas boas propriedades físicas, bom desempenho, baixo custo e pela facilidade de fabricação por diversos métodos (DA SILVA *et al.*, 2014; MEDVEDOVSKI, 2010).

A presença de aditivos pode alterar a processabilidade da alumina bem como o seu mecanismo de fratura. Por exemplo, a adição de 4 a 6% em peso de nióbia (Nb_2O_5) diminui a temperatura de sinterização, melhora a densificação e faz com que o mecanismo de fratura da alumina passe de transgranular para intergranular,

devido à formação de precipitados de AlNbO_4 nos contornos de grãos. Isso aumenta a absorção de energia durante o impacto balístico (GOMES, 2004).

2.5 CAMADA INTERMEDIÁRIA: MATERIAL COMPÓSITO

2.5.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Compósitos são combinações 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; DE MOURA *et al.*, 2011).

Os compósitos binários são os mais simples e mais utilizados. Estes são formados por uma fase contínua e uma fase dispersa. As propriedades são dependentes das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas, da ligação interfacial e da geometria da fase dispersa. Por geometria da fase dispersa entende-se como a sua forma, tamanho, distribuição e orientação. Tecnicamente, os compósitos mais importantes são os reforçados com fibras, em virtude de suas resistências e módulos serem excepcionalmente elevados (CALLISTER & RETHWISCH, 2012).

A segunda camada da blindagem, aqui chamada de camada intermediária, é geralmente formada por um painel laminado de compósito ou por camadas de tecido de alto desempenho balístico, ambos mais leves que o material cerâmico. Esta camada tem a finalidade de absorver mais uma parcela da energia proveniente do impacto balístico, absorvendo os fragmentos do projétil e da cerâmica fraturada (CHEESEMAN & BOGETTI, 2003; WANG *et al.*, 2014).

Diversos materiais foram estudados para possível aplicação nesta camada, incluindo fibras de vidro (D'ALMEIDA *et al.*, 2004; DeLUCA *et al.*, 1998), carbono (LEE & SUN, 1993; ULVEN *et al.*, 2003), aramida (MOBASSERI *et al.*, 2013; MONTEIRO *et al.*, 2014), polietileno (ALVES *et al.*, 2004), e, mais recentemente, fibras naturais lignocelulósicas, como juta (DA LUZ, 2014), sisal (DE ARAÚJO,

2015), bambu (DA CRUZ, 2015), rami (MARSYAHYO *et al.*, 2009; MILANEZI, 2015), kenaf (ABIDIN *et al.*, 2013), entre outras (WAMBUA *et al.*, 2007). Da Silva, 2014, considerou a aplicação de compósitos epóxi-Curauá como camada intermediária de uma blindagem, sendo o Curauá aplicado na forma de fibras contínuas e alinhadas. No presente trabalho será considerado o compósito poliéster-Curauá.

Nas próximas seções, serão abordadas as principais características do material compósito utilizado neste estudo, enfatizando seus constituintes, como a matriz poliéster e as fibras de Curauá.

2.5.2 MATRIZES POLIÉSTER

Poliésteres são polímeros termofixos que possuem ligações éster na cadeia principal, e são produzidos pela condensação de um diácido ou dianidrido com um composto di-hidróxido (diol). São utilizados como resinas para laminação, moldagem e recobrimentos, para fabricação de fibras, filmes, borrachas e plastificantes (BRYDSON, 1999; RATNA, 2009).

As resinas de poliéster são classificadas em duas grandes classes, designadas como saturadas e insaturadas. No primeiro grupo encontram-se os poliésteres comercializados na forma de filmes e fibras, resinas termoplásticas ou plastificantes poliméricos. As resinas insaturadas são mais utilizadas na fabricação de materiais compósitos, devido ao seu baixo custo, facilidade de processamento e bom compromisso entre propriedades mecânicas, elétricas e químicas (DE MOURA *et al.*, 2011).

A cura da resina tem início imediatamente após a adição do endurecedor, que é normalmente um peróxido orgânico, e aceleradores especiais (FIG. 2.8). O processo ocorre em duas etapas: Primeiramente, a resina líquida transforma-se em um material gelatinoso, etapa designada como “ponto de gel”. A segunda fase conduz ao endurecimento final, através de um processo exotérmico. A velocidade reação depende de vários fatores, tais como reatividade da resina, teor de endurecedor e de acelerador e as condições ambientais (DE MOURA *et al.*, 2011; RATNA, 2009).

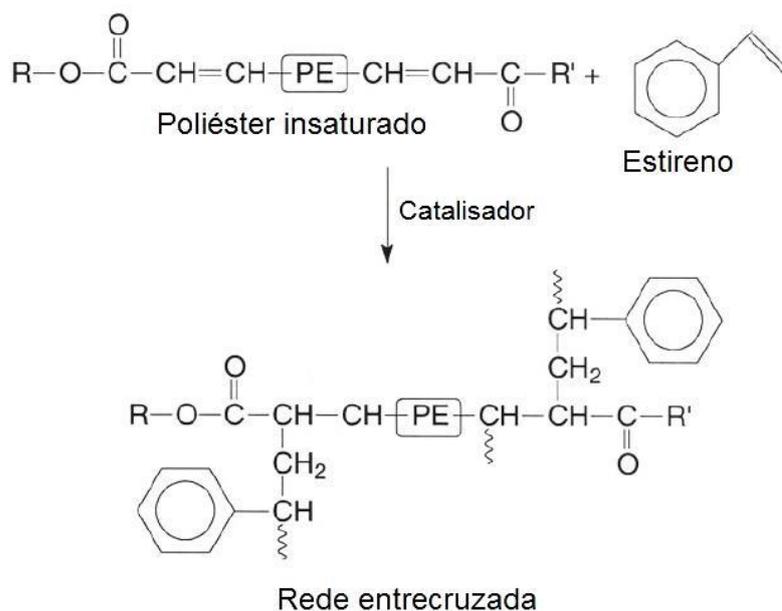


FIG. 2.8 Reação de cura de uma resina poliéster.

Fonte: Adaptado de RATNA, 2009.

Por ordem crescente de resistência química, as resinas de poliéster insaturado dividem-se em três grandes grupos: Ortoftálicas, de aplicação geral; Isoftálicas, de melhor resistência mecânica e térmica, e são normalmente aplicadas em meios levemente agressivos; e as Bisfenólicas, usadas em meios particularmente agressivos, sobretudo com características ácidas (DE MOURA *et al.*, 2011; RATNA, 2009).

As resinas poliéster para laminação são viscosas, e geralmente possuem baixo grau de polimerização (~8-10), com peso molecular de cerca de 2000. Na prática, pode variar de um líquido altamente viscoso até um sólido frágil, dependendo da composição, e por este motivo é adicionado um diluente reativo como o estireno. Isto facilita o manuseio, reduz o custo e melhora a reatividade do poliéster. Estireno é o mais utilizado por seu baixo preço, baixa viscosidade e boa compatibilidade com a resina (BRYDSON, 1999, RATNA, 2009).

Como o entrecruzamento ocorre por um mecanismo de adição sobre as duplas ligações no poliéster e no diluente reativo, não há evolução de voláteis durante o processo de cura, como ocorre com as resinas fenólicas, e, portanto, é possível

realizar a cura sem aplicação de pressão. Como a cura na temperatura ambiente também é possível, estas resinas são úteis para a fabricação de grandes estruturas com barcos e partes de carros (BRYDSON, 1999).

2.5.3 FIBRAS NATURAIS LIGNOCELULÓSICAS

Fibras naturais são classificadas com base em sua origem, animal, vegetal ou mineral. As fibras de origem animal consistem basicamente de proteínas (cabelo, seda e lã). Por outro lado, as fibras de origem vegetal possuem predominância de celulose e lignina em sua estrutura, e por isso são denominadas fibras naturais lignocelulósicas (FNL) (JOHN & THOMAS, 2008; MONTEIRO *et al.*, 2009).

É sabido que os recursos naturais não renováveis, como os derivados do petróleo, têm se tornado cada vez mais escassos, portanto, é necessária a sua substituição gradativa por outros materiais que sejam renováveis, de forma que a dependência em relação aos produtos não renováveis seja diminuída. Além disso, os conceitos de sustentabilidade e as novas regulações ambientais também tem estimulado a busca por materiais “verdes”, compatíveis com o meio ambiente. Neste cenário, as FNL têm ganhado importância, por serem ambientalmente corretas e por possuírem propriedades adequadas para muitas aplicações (KALIA, *et al.*, 2011; MONTEIRO *et al.*, 2009; SATYANARAYANA *et al.* 2009).

Há uma tendência crescente de se utilizar FNL como cargas ou reforços em compósitos de matriz polimérica (CMP). As principais vantagens de se utilizar estas fibras são a sua flexibilidade quanto ao processamento (são menos abrasivas para as ferramentas), sua alta rigidez específica, e seu baixo custo, características que as tornam atrativas para os fabricantes dos CMP. Com o aumento do número de publicações na área, os compósitos reforçados com FNL têm sido aceitos como materiais de engenharia com boa variedade de propriedades, sendo cada vez mais utilizados em aplicações estruturais (FARUK *et al.*, 2012; KALIA, *et al.*, 2011; MONTEIRO *et al.*, 2011; SATYANARAYANA *et al.* 2009).

Uma fibra vegetal elementar possui comprimento que varia de 1 a 50 mm e diâmetro entre 10 e 50 μm e são similares a tubos microscópicos, com paredes

celulares ao redor do lúmen (cavidade) central. A FIG. 2.9 mostra o arranjo microestrutural das FNL. Tais paredes celulares são formadas por uma matriz de hemicelulose-lignina de composição variável reforçada 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).

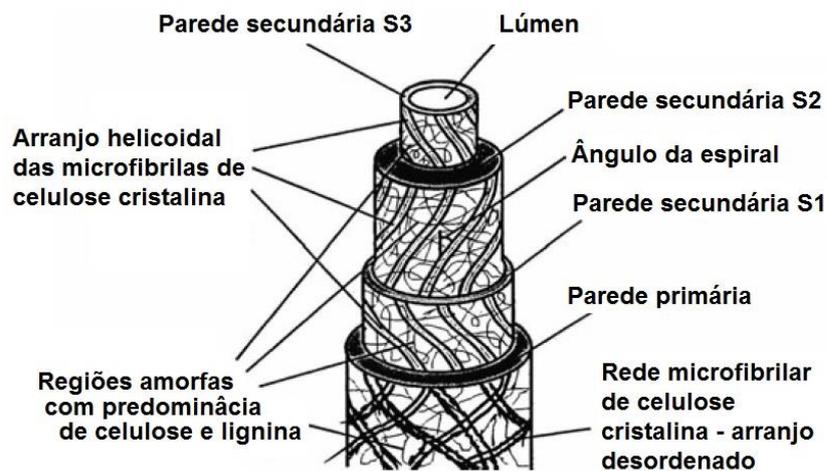


FIG. 2.9 Microestrutura de uma FNL.
Adaptado de KALIA *et al.*, 2011.

Segundo Bledzki & Gassan, 1999, a celulose é um polímero linear que consiste unidades de D-anidroglicopirranose (também chamadas de anidroglicose ou glicose) juntas por ligações β -1,4-glicosídicas, como mostra a FIG. 2.10. A hemicelulose consiste de um grupo de polissacarídeos que, com exceção da pectina, permanece associada à celulose após a remoção da lignina. A estrutura da hemicelulose é similar à da celulose (FIG. 2.10), com três diferenças importantes: (1) Contém unidades de diferentes açúcares enquanto a celulose só possui as unidades 1,4- β -glicopirranose; (2) Possui alto grau de entrecruzamento enquanto a celulose é um polímero linear; (3) Possui grau de polimerização 10 a 100 vezes menor que o da celulose.

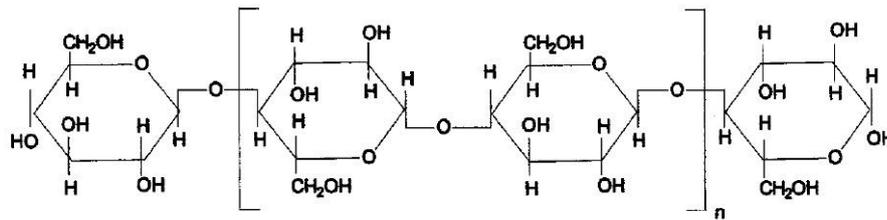


FIG. 2.10 Estrutura química da celulose.

Fonte: Adaptado de MOHANTY *et al.*, 2002.

As ligninas são hidrocarbonetos complexos que possuem grupos alifáticos e aromáticos e formam estruturas amorfas (FIG. 2.11).

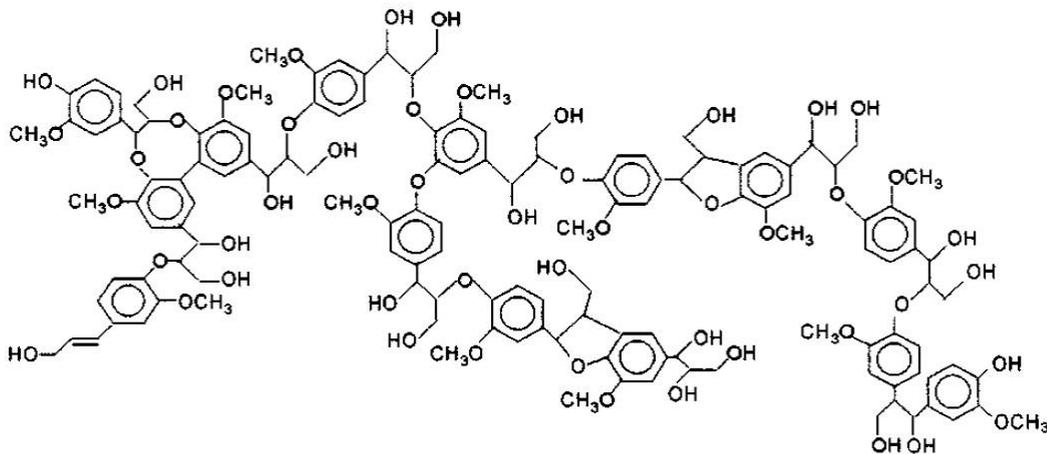


FIG. 2.11 Estrutura química da Lignina.

Fonte: Adaptado de MOHANTY *et al.*, 2002.

As moléculas de hemicelulose são unidas à celulose por ligações de hidrogênio e agem 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).

As paredes celulares são divididas em duas seções: a parede celular primária, que contém uma rede aberta e irregular de microfibrilas de celulose, e a parede secundária, composta por três camadas, S1, S2 e S3 (FIG. 2.9). S2 é a camada mais espessa e a de maior influência nas propriedades mecânicas da fibra. As

camadas diferem entre si pela composição química (razão entre os teores de celulose e hemicelulose/lignina) e pelo ângulo da espiral microfibrilar. Este ângulo é definido a partir do eixo da fibra, e varia de fibra para fibra. Quanto menor o ângulo microfibrilar, maior a resistência mecânica da fibra (KALIA, *et al.*, 2011; THAKUR *et al.*, 2014).

Fibras celulósicas possuem domínios amorfos e cristalinos, estes com alto grau de organização. O grau de cristalinidade depende da origem do material. Algodão, linho, rami, sisal e banana possuem alto grau de cristalinidade (65-70%). A cristalinidade da celulose resulta das ligações de hidrogênio entre as cadeias de celulose, ainda que haja ligações de hidrogênio também nos domínios amorfos. Na celulose, existem muitos grupos hidroxila disponíveis para interagirem com moléculas de água por ligações de hidrogênio, o que dá às FNL caráter altamente hidrofílico, o que dificulta a ligação na interface com a matriz polimérica hidrofóbica em CMPs (KALIA, *et al.*, 2011).

As propriedades das FNL podem variar consideravelmente dependendo da 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). A TAB. 2.2 mostra as propriedades de algumas FNL, em comparação com as fibras de vidro, carbono e aramida. A sua última coluna destaca a resistência específica de cada fibra (FARUK *et al.*, 2012; MONTEIRO *et al.*, 2011; THAKUR *et al.*; 2014).

TAB. 2.2 Propriedades de algumas FNL em comparação com as 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
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.

Pode-se observar que as fibras de Curauá estão entre as FNL com melhores propriedades mecânicas, especialmente em relação à resistência específica (σ/ρ), cujos valores máximos se aproximam ao das fibras sintéticas. Por este motivo, diversos pesquisadores apontam o Curauá como substituto natural e ambientalmente correto das fibras de vidro e carbono, em indústrias como a automobilística (ANGRIZANI *et al.*, 2014; DE OLIVEIRA *et al.*, 2012; GEHLEN, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2013; SPINACÉ *et al.*, 2009; TOMCZAK *et al.*, 2007). Neste trabalho, optou-se pela fibra de Curauá para reforçar a matriz polimérica de poliéster em um sistema de blindagem multicamada.

2.5.4 FIBRAS DE CURAUÁ

As fibras de Curauá são extraídas das folhas do *Ananas erectifolius*, da mesma família do abacaxi (bromeliáceas). Esta planta é cultivada em condições semi-áridas na região amazônica, particularmente na região oeste do Pará, em duas variedades, denominadas de Curauá roxo e o Curauá branco. (MONTEIRO *et al.*, 2013; SPINACÉ *et al.*, 2009). Sua composição química média é 73,6% de celulose, 9,9% de hemicelulose, 7,5% de lignina e 0,9% de cinzas (CARASCHI & LEÃO, 2001 *apud* SPINACÉ *et al.*, 2009; TOMCZAK *et al.*, 2007). Suas longas folhas podem chegar a 1,7 m de altura e 4 cm de largura. São rígidas, eretas e possuem superfície lisa. A FIG. 2.12a mostra a planta que dá origem às fibras de Curauá. As figuras FIG. 2.12b e 2.12c são, respectivamente, as imagens das fibras de Curauá e de uma fibra individual visualizada no microscópio eletrônico de varredura.

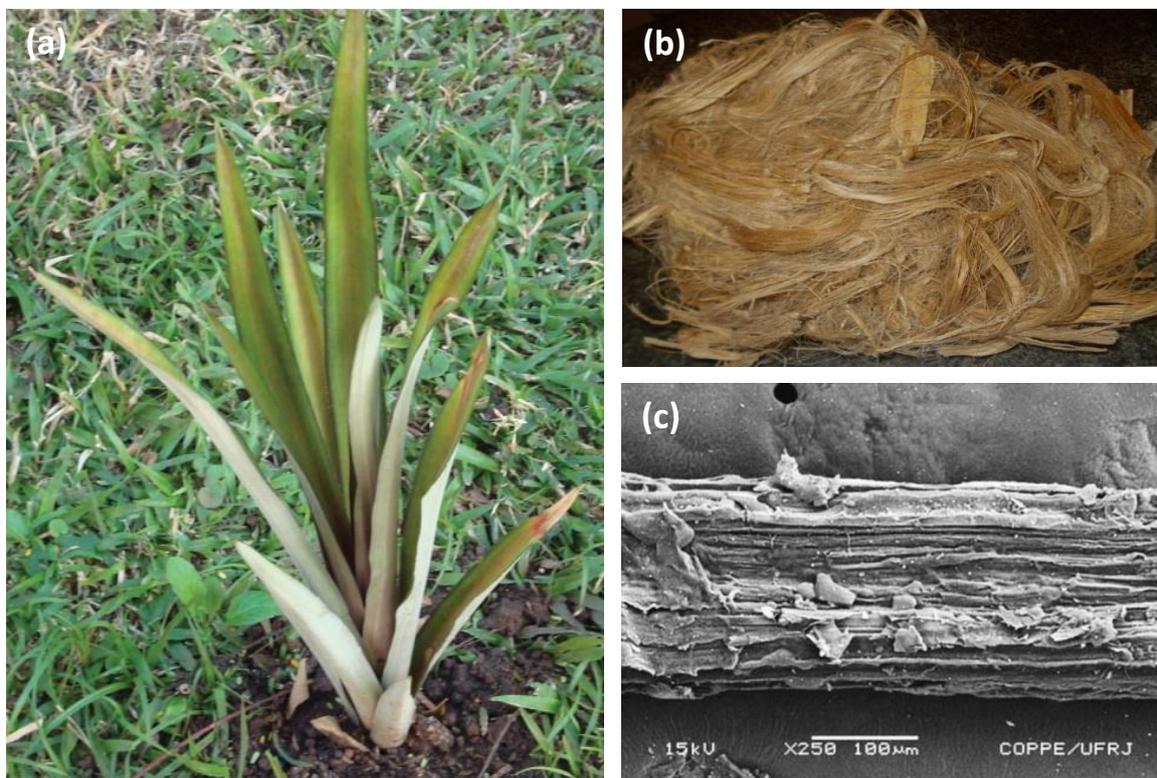


FIG. 2.12 Curauá: (a) Planata *Ananas erectifolius*; (b) fibras prontas para uso; (c) imagem eletrônica de uma fibra individual, após sofrer *pull-out* de resina poliéster.

Fonte: Adaptado de *The Curaua Challenge*, 2009 e MONTEIRO *et al.*, 2013.

O processo produtivo do Curauá nas comunidades rurais da Amazônia se dá basicamente em cinco etapas: Plantio, colheita (após um ano), desfibramento, lavagem e secagem da fibra. A FIG. 2.13 mostra estas fases da produção das fibras de Curauá. O aproveitamento médio em cada colheita chega ser de até 24 folhas por planta, com peso médio total de 2 kg. Em 2010, para cada plantio de 10 hectares de Curauá eram gerados 18 empregos no campo (SENA, 2006 *apud* MACIEL, 2010).



FIG. 2.13 Fases da produção da cultura do Curauá.
Fonte: Adaptado de SENNA, 2006 *apud* MACIEL, 2010.

Como mencionado anteriormente, as fibras de Curauá tem grande potencial para serem utilizados em CMP. Além de sua utilização tradicional (redes, cobertores e tapetes), as fibras de Curauá têm sido largamente utilizadas em compósitos na indústria automobilística. A FIG. 2.14 mostra um item de automóvel que está sendo fabricado industrialmente com fibras de Curauá (*The Curaua Challenge*, 2009).



FIG. 2.14 Visor automotivo fabricado em Nylon 6 reforçado com 20% de fibras de Curauá.

Fonte: Adaptado de *The Curaua Challenge*, 2009.

2.5.5 COMPORTAMENTO DINÂMICO DAS FIBRAS

Para proteção balística as fibras utilizadas devem possuir as seguintes características: baixa densidade, alta resistência mecânica e alta capacidade de absorver energia. Os mecanismos de proteção balística dos materiais podem ser divididos em duas categorias: (1) absorção da energia de impacto e (2) redistribuição da energia de impacto. Assim, a eficácia de um material em proteção balística está baseada na rápida conversão e dispersão da energia cinética do projétil incidente em energia de deformação do material da blindagem (WANG *et al.*, 2014)

Quando o projétil entra em contato com a fibra, duas ondas são criadas, uma longitudinal e outra transversal. A onda de tensão longitudinal viaja ao longo do eixo da fibra na velocidade sônica do material (EQ. 2.3). À medida que esta se propaga para longe do ponto de impacto, o material por trás da frente de onda flui para o ponto de impacto, e a fibra é defletida na direção de deslocamento do projétil, adquirindo forma de V (FIG. 2.15). O movimento transversal da fibra é conhecido como onda transversal, e a sua propagação ocorre em velocidade menor que a velocidade sônica (CHEESEMAN & BOGETTI, 2003; WANG *et al.*, 2014).

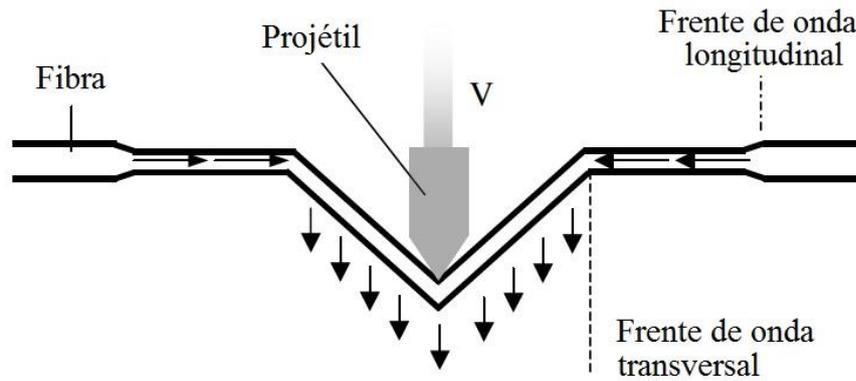


FIG. 2.15 Impacto do projétil em uma única fibra.
 (Fonte: Adaptado de CHEESEMAN & BOGETTI, 2003).

2.6 CAMADA POSTERIOR: MATERIAL METÁLICO

A última camada da blindagem, também chamada de camada anti-trauma, é formada mais comumente por um material deformável, comumente um material metálico, que tem por finalidade reduzir o dano potencial no corpo do usuário causado pela deformação dinâmica da blindagem (WANG, 2014; WILKINS, 1978).

2.7 MÉTODO ESTATÍSTICO DE WEIBULL

A distribuição de Weibull é a distribuição estatística mais popular para cálculos de engenharia de confiabilidade, entre outras aplicações. Ela tem a grande vantagem de se adequar a diversos casos reais apenas pelo ajuste de poucos parâmetros (ABERNETHY *et al.*, 1983; O'CONNOR & KLEYNER, 2012). A função de distribuição cumulativa de Weibull é dada pela equação 2.16

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\theta} \right)^\beta \right] \quad \text{EQ. 2.16}$$

Onde: θ e β são parâmetros estatísticos, conhecidos, respectivamente, como unidade característica (ou parâmetro de escala) e módulo de Weibull (ou parâmetro de forma).

Rearranjando-se a EQ. 2.16, é obtida a EQ. 2.17:

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(x)} \right) \right] = \beta \ln(x) - [\beta \ln(\theta)] \quad \text{EQ. 2.17}$$

A EQ. 2.17 consiste de uma reta com coeficiente angular igual a β e coeficiente linear igual a $-\beta \cdot \ln(\theta)$. Assim, os parâmetros de Weibull podem ser obtidos com relativa facilidade, por meio de um método gráfico, desde que os dados sejam ordenados de forma crescente (O'CONNOR & KLEYNER, 2012).

Diferentes dados deste trabalho foram tratados pela análise de Weibull, utilizando o software *Weibull Analysis*, em especial, os valores de indentação característica e de energia absorvida pela camada intermediária da blindagem.

No capítulo seguinte serão apresentados os materiais utilizados neste trabalho, bem como os métodos de fabricação de amostras e alvos. Serão também apresentados os procedimentos dos testes balísticos, além dos ensaios de caracterização dos materiais e amostras.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 ALUMINA E NIÓBIA

A cerâmica utilizada neste trabalho é à base de Alumina (Al_2O_3), fornecida pela empresa Treibacher Schleifmittel Brasil Ltda. A TAB. 3.1 mostra a composição química do pó, como 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	---

A Nióbia (Nb_2O_5), adicionada como aditivo na cerâmica, foi fornecida pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração. A TAB. 3.2 mostra a composição química do pó, como 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

3.1.2 POLIETILENO GLICOL (PEG)

A fim de viabilizar a conformação do pó cerâmico, e o manuseio dos “corpos verdes”, foi utilizado o ligante orgânico Polietileno Glicol (PEG), fornecido pela empresa VETEC.

3.1.3 FIBRAS DE CURAUÁ

Neste trabalho foram utilizadas fibras de Curauá gentilmente fornecidas pela empresa Pematec Triangel do Brasil Ltda., sob a forma de cachos (FIG. 3.1a). As fibras devem ser limpas e desembaraçadas com o auxílio de uma escova, cortadas nas dimensões da matriz (15 cm, FIG. 3.1b), e secas em estufa por 24h, a 60°C, para preparação dos compósitos reforçados com fibras.



FIG. 3.1 Fibras de Curauá utilizadas no trabalho: (a) Aspecto como recebido; (b) Fibras limpas, desembaraçadas e cortadas nas dimensões da matriz.

3.1.4 TECIDO DE ARAMIDA

O tecido de aramida utilizado neste trabalho, de trama S745 e gramatura 460 g/m², foi fornecido pela empresa LFJ Blindagens, Comércio e Serviços S.A (Conquext), sob a forma de painéis de 8 camadas impregnadas com borracha cloroprênica (modelo MENEOKV08, FIG. 3.2a) e em monocamadas isoladas (FIG. 3.2b). Em cada corpo de prova balístico, foram unidos dois painéis MENEOKV08 juntamente com duas monocamadas de tecido, com o auxílio de um adesivo de poliuretano, para que a espessura fosse próxima a 10 mm.

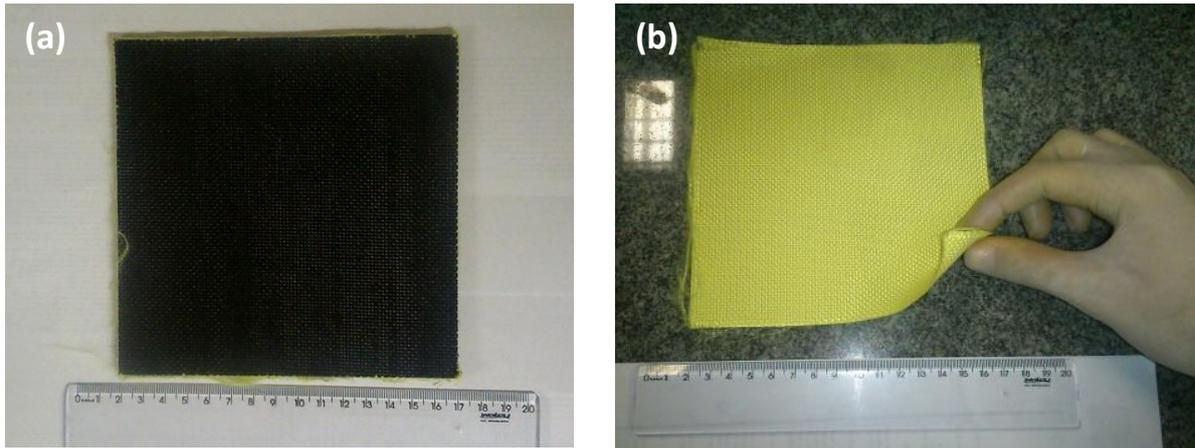


FIG. 3.2 Tecido de aramida: (a) Painel de 8 camadas MENEOKV08 (dimensões 150x150x4 mm); (b) Monocamada de tecido (15x15x1 mm).

3.1.5 RESINA POLIÉSTER

A matriz polimérica utilizada nos compósitos reforçados com fibras de Curauá foi uma resina de poliéster insaturado, designada “Poliéster Cristal”, fornecida pela empresa Resinpoxy Ltda. Segundo o fornecedor, consiste de uma resina Isoftálica, que deve ser misturada ao endurecedor na proporção de 1% em peso. É de fácil manuseio, de cura rápida e em temperatura ambiente.

3.1.6 PLACAS DE LIGA DE ALUMÍNIO

As placas de liga de alumínio 5052 H34 utilizadas neste trabalho foram fornecidas pela empresa Metalak Comércio Indústria Metais Ltda., nas dimensões 120 x 150 x 4,76 mm (FIG. 3.3). Os valores fornecidos pelo fabricante, e as especificações de resistência à tração (σ_T), limite de escoamento (σ_e), ductilidade ($\Delta L/L_0$) da liga são mostrados na TAB. 3.3. Os valores de composição química fornecidos pelo fabricante, por sua vez, são mostrados na TAB. 3.4. A liga de alumínio 5052 H34 foi selecionada devido à sua boa resistência, e à sua boa disponibilidade no mercado.



FIG. 3.3 Placa de alumínio utilizada como camada posterior da blindagem.

TAB. 3.3 Propriedades mecânicas nominais da liga de alumínio utilizada.

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

TAB. 3.4 Composição química da liga de alumínio 5052 H34, de acordo com o fornecedor.

Elemento	Concentração (%)	Especificação ¹ (%)
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

¹Fonte: ASM Aerospace Specification Metals Inc., 2015.

Para verificar se as placas atendem à especificação, foram realizados os ensaios de dureza e tração em amostras das placas fornecidas. O ensaio de dureza foi realizado de acordo com a norma ASTM E18, em escala Rockwell B, utilizando um Durômetro Wolpert Testor HT 1aa (FIG. 3.4a). O ensaio de tração foi realizado de acordo com a norma NBR ISO 6892:2013, utilizando 6 corpo de prova *subsize* fabricados segundo a norma ASTM E8, e utilizando a máquina de ensaios EMIC

DL10000 (FIG. 3.4b) com velocidade de 3mm/min. Ambos os equipamentos estão disponíveis no Laboratório de Ensaio Mecânico do IME.



FIG. 3.4 Equipamentos para realização dos ensaios mecânicos nas amostras de liga de alumínio: (a) durômetro Wolpert Testor HT 1aa; (b) máquina de ensaios EMIC DL10000.

3.2 FABRICAÇÃO DAS PASTILHAS CERÂMICAS

3.2.1 OBTENÇÃO DO PÓ

A primeira etapa da fabricação das pastilhas cerâmicas é a preparação da mistura de pós. Pós de Alumina (700g, 94,5%p), de Nióbia (29,15 g, 3,94%p) e o ligante PEG líquido (11,3g, 1,53%p) foram misturados em um moinho com bolas de alumina, modelo MA 500 (FIG. 3.5), por 8 horas. O moinho está disponível no Laboratório de Materiais Cerâmicos do IME.

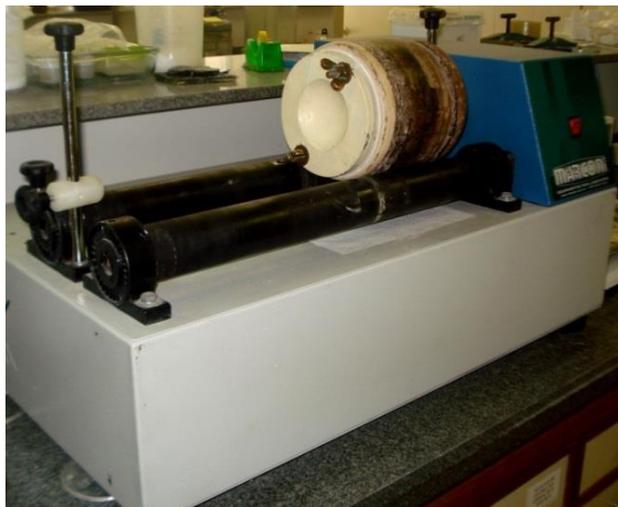


FIG. 3.5 Moinho de bolas MARCONI MA500

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

3.2.2 PRENSAGEM

O pó cerâmico peneirado na quantidade de 100 g foi prensado em uma matriz hexagonal (FIG. 3.6), formada por dois punções e uma camisa flutuante (FIG. 3.6a). Um par de calços foi utilizado para manter a camisa na posição correta (FIG. 3.6b). Uma carga de 12 toneladas, equivalente a 30 MPa será aplicada, com o auxílio da prensa hidráulica semiautomática NOWAK (FIG. 3.7), disponível no laboratório de Fundição e Tratamentos Termomecânicos do IME.



FIG. 3.6 Matriz utilizada na moldagem dos corpos cerâmicos. (a) Peças individuais; (b) Conjunto montado, pronto para receber a carga.



FIG. 3.7 Prensa hidráulica semiautomática NOWAK, com capacidade para 30 toneladas.

3.2.3 SINTERIZAÇÃO

As pastilhas cerâmicas “verdes” foram sinterizadas no forno INTI, modelo FE 1700 (FIG. 3.8), disponível no Laboratório de Materiais Cerâmicos do IME. A rota de sinterização já foi utilizada por outros autores (TRINDADE *et al.*, 2013; DA LUZ, 2014), e será detalhada a seguir:

- (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, e, sendo assim, a composição do material passa a ser 96% de Alumina e 4% de Nióbia.



FIG. 3.8 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, 2014; TRINDADE, 2012). Elas apresentaram densificação média de 88,1% na sinterização, e densidade média do sinterizado de 3,53 g/cm³. Da Luz, 2014, avaliou a retração linear destas peças e obteve o valor 12,6 ±1,4%. Neste trabalho será medida a espessura, densidade e densificação dos corpos cerâmicos, para controle da qualidade da blindagem multicamada. A densidade (ρ) será avaliada pela relação entre a massa (m) e o volume (V) da cerâmica sinterizada (EQ. 3.1).

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

3.3 FABRICAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Os compósitos reforçados com fibras de Curauá foram preparados nas proporções de 10, 20 e 30% em volume, num mínimo de 9 placas cada composição, 7 para ensaio de blindagem multicamada, e 2 para a avaliação individual da camada. Para fins de comparação dos resultados, foram preparadas placas de poliéster puro, de tecido de aramida, e de compósito reforçado com fibras de Curauá em duas direções (0°/90°).

Para saber a massa de poliéster a ser utilizada em cada placa, foram utilizados dados de densidade do poliéster encontrados na literatura (DA SILVA, 2010; GEHLEN, 2014), e verificados experimentalmente, com a medição da densidade da placa de poliéster puro. O valor utilizado foi de 1,10 g/cm³. A densidade deve ser multiplicada pela fração volumétrica de resina para obter a massa de resina para cada compósito. No entanto, um excesso de 30% de resina teve de ser considerado devido às perdas (resina aderida no copo após vazamento na matriz, e resina que vaza da matriz na prensagem).

No caso do Curauá, o valor de densidade utilizado será baseado no trabalho de Simonassi *et al.*, 2012, que estudaram a variação da densidade das fibra de acordo com o seu diâmetro. Foram selecionadas 120 fibras para terem seu diâmetro, comprimento e massa medidos, com o auxílio de um projetor de perfil, de um paquímetro e de uma balança analítica, respectivamente. A densidade (ρ) de cada fibra foi calculada pela EQ. 3.2.

$$\rho = \frac{4m}{\pi L d^2} \quad \text{EQ. 3.2}$$

Onde m é a massa da fibra, L é o comprimento e d é o diâmetro.

As fibras foram então divididas em 6 intervalos de classe, segundo seu diâmetro, com frequência f de ocorrência. Foi calculada a média ponderada das densidades, levando em conta a frequência de cada intervalo de diâmetro (TAB. 3.5).

TAB. 3.5 Cálculo da densidade média das fibras de Curauá.

Intervalo de d (mm)	f (%)	ρ (g/cm ³)	$\rho_{\text{média}}$ (g/cm ³)
0,05-0,08	12	1,454	
0,08-0,11	31	1,067	
0,11-0,14	21	0,923	
0,14-0,17	18	0,884	0,996
0,17-0,20	13	0,796	
0,20-0,23	5	0,684	

Assim, o valor 0,996 g/cm³ foi utilizado para calcular a quantidade em peso de fibras de Curauá a serem utilizadas em cada placa de compósito. Este valor é próximo de 1,1 ±0,91 g/cm³ obtido por SPINACÉ, *et al.* 2009.

Assim, dado que as dimensões da cavidade da matriz são 119 x 150 x 10 mm (FIG. 3.9), a TAB. 3.6 mostra a massa de poliéster (m_p), a quantidade de endurecedor (m_{end}), e a massa das fibras de Curauá (m_c) e a serem adicionados na matriz para os diferentes corpos de prova.

TAB. 3.6 Quantidade de cada componente para as diferentes placas de compósito.

Tipo	m_p (g)	m_{end} (gotas)	m_c
0%	252,70	119	0
10%	227,43	107	17,78
20%	202,16	95	35,55
30%	176,89	83	53,33

A preparação dos compósitos consiste na prensagem uniaxial em matriz metálica da resina poliéster com as fibras de Curauá, nas composições citadas anteriormente, com o auxílio da prensa hidráulica SKAY (FIG. 3.10), disponível no laboratório de materiais cerâmicos do IME.



FIG. 3.9 Matriz utilizada na fabricação dos compósitos.



FIG. 3.10 Prensa hidráulica SKAY, com capacidade para 30 toneladas.

Antes da prensagem, deve ser aplicada graxa de silicone na matriz metálica, como desmoldante do compósito (FIG. 3.11a). Após a preparação da matriz, é realizado o acondicionamento das fibras (FIG. 3.11b) e da resina (FIG. 3.11c) em várias camadas no seu interior, e o conjunto é prensado (FIG. 3.11d) até uma carga de 5 ton e deixado sob pressão para curar à temperatura ambiente por um período de 24 horas. Uma das placas de compósito produzidas é mostrada na FIG. 3.12. É

importante mencionar que as fibras foram previamente secas em estufa a 60°C por 24h, antes da fabricação dos compósitos.



FIG. 3.11 Etapas da fabricação dos compósitos: (a) lubrificação da matriz; (b) acondicionamento das fibras; (c) acondicionamento da resina; (d) prensagem.



FIG. 3.12 Placa de compósito poliéster-fibra de Curauá produzida pela prensagem uniaxial.

3.4 COLAGEM DAS CAMADAS

A preparação dos corpos de prova multicamada foi realizada por meio da colagem das camadas de alumínio, de compósito e da cerâmica, utilizando um adesivo à base de poliuretano. A FIG. 3.13 mostra o esquema de montagem de uma blindagem multicamada e o corpo de prova final obtido.

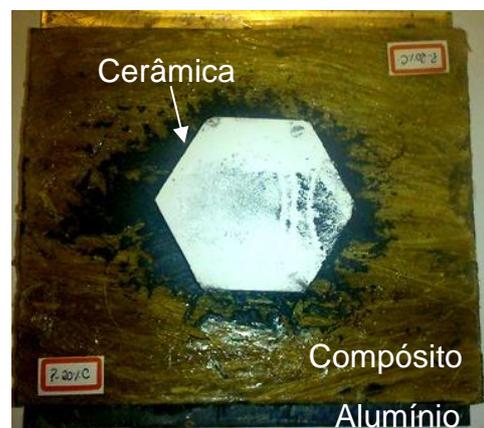
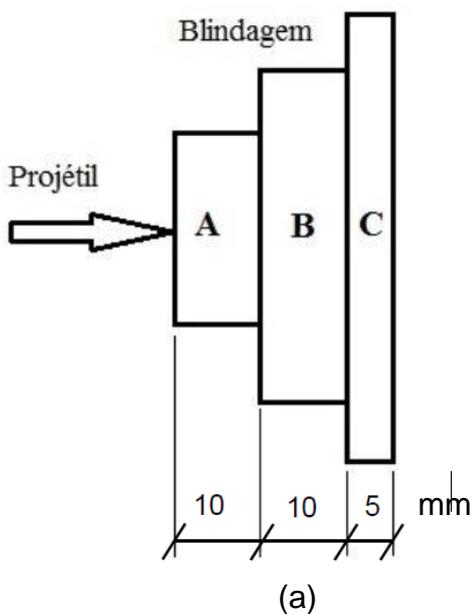


FIG. 3.13 Blindagem multicamada: (a) Diagrama esquemático: A é a camada cerâmica, B é o compósito, poliéster ou aramida, C é o alumínio e D é a plastilina; (b) corpo de prova final utilizado nos ensaios balísticos.

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 como os materiais da camada intermediária individualmente. 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).

No ensaio de deformação na plastilina, a blindagem multicamada será posicionada em frente a um bloco de plastilina (CORFIX®) com 50 mm de espessura e densidade de 1,7 g/cm³, e, após o impacto balístico, será medida a deformação (indentação) deixada pela blindagem na plastilina, como mencionado na seção 2.1. As condições gerais dos ensaios serão:

1. Munição: calibre 7,62 mm M1 (Fig. 3.14), conforme é fornecida comercialmente ao Exército. A medida 7,62 mm refere-se ao diâmetro do projétil, que possui 9,7 g de massa.



FIG. 3.14 Munição calibre 7,62 mm M1.

2. 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 NIJ-0101.06 para as munições 7,62 mm;
3. Ângulo de incidência no alvo: 90°;

4. Quantidade de tiros para cada grupo de corpos de prova: 7 disparos, para que a estatística de Weibull possa ser aplicada. Os grupos se diferenciam pelo material da camada intermediária, como mostra a TAB. 3.7.

TAB. 3.7 Tipo e designação dos corpos de prova para os ensaios balísticos.

Tipo de camada intermediária	Designação
Aramida	Aramida
Poliéster puro	P-0%C
Poliéster reforçado com 10% de fibras de Curauá	P-10%C
Poliéster reforçado com 20% de fibras de Curauá	P-20%C
Poliéster reforçado com 30% de fibras de Curauá	P-30%C
Poliéster reforçado com 30% de fibras de Curauá dispostas bidirecionalmente (0°/90°)	P-30%C-B

5. 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 será utilizado um provete calibre 7,62 mm (FIG. 3.15a), um dispositivo de fixação do alvo (FIG. 3.15b) e um radar Doppler WEIBEL SL-520P (FIG. 3.15c), para medição da velocidade do projétil. Um esquema do sistema é mostrado na FIG. 3.15d.

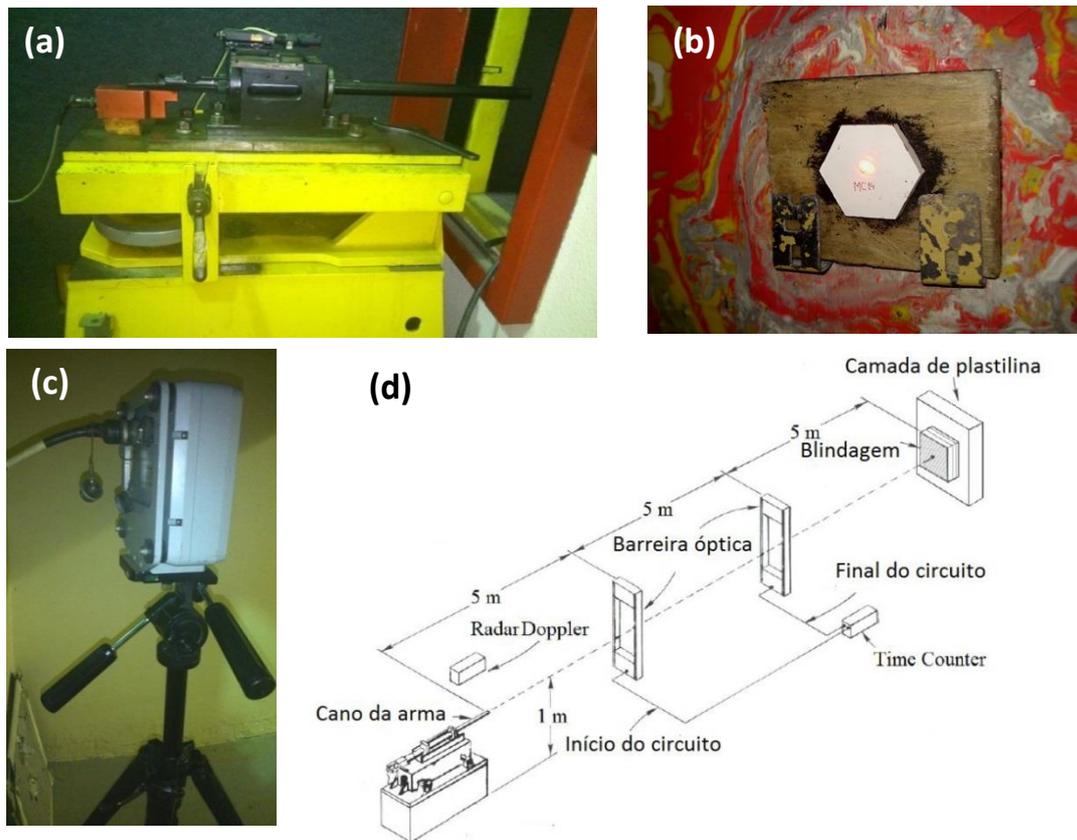


FIG. 3.15 Equipamento utilizado no ensaio balístico: (a) Provete calibre 7,62 mm com mira à laser; (b) Alvo posicionado na plastilina; (c) Radar doppler; (d) Esquema ilustrando o sistema com barreira óptica modelo B471 da HPI (Fonte: DA SILVA, 2014b).

O critério adotado para a caracterização da eficiência balística foi a medida da profundidade da deformação na plastilina após o impacto (FIG. 3.16). Foi considerada eficiente se o valor foi igual ou inferior a 44 mm (NIJ 0101.06).



FIG. 3.16 Medida do trauma (indentação) no material de referência (plastilina).

No ensaio de velocidade residual, os materiais formadores da camada intermediária foram fixados em um suporte (FIG. 3.17), 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 2.2. As condições gerais para este ensaio são as mesmas que no ensaio de deformação na plastilina.



FIG. 3.17 Dispositivo de fixação das placas no ensaio de velocidade residual, utilizado para fixar um compósito reforçado com fibra de Curauá.

3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Após o ensaio balístico, com o objetivo de identificar os modos de falha dos materiais da blindagem multicamada, foi realizada avaliação microscópica dos fragmentos com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL JSM-6460LV (FIG. 3.18), disponível no Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica e Microanálise da UFRJ. Foram utilizados os modos de análise elétrons secundários, para verificação da morfologia da superfície, bem como, a Espectroscopia por dispersão de Energia dos Elétrons (EDS), para identificação da composição química de fragmentos.



FIG. 3.18 Microscópio eletrônico de varredura JEOL modelo JSM-6460LV.

No capítulo seguinte serão apresentados os resultados do presente trabalho, e os mesmos serão discutidos e comparados com o que já existe publicado na literatura especializada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DA CAMADA FRONTAL DA BLINDAGEM (CERÂMICA)

Foram fabricadas 70 pastilhas cerâmicas para uso como camada frontal nos SBMs estudados, seguindo o processamento mencionado anteriormente (seção 3.2). Os valores médios de espessura, densidade geométrica e densificação do material cerâmico são mostrados na TAB. 4.1. A densificação média foi calculada pela relação entre a densidade média do sinterizado e a massa específica teórica da cerâmica ($4,023 \text{ g/cm}^3$), obtida pela regra das misturas, utilizando os valores de densidade da alumina ($3,999 \text{ g/cm}^3$) e da nióbia ($4,600 \text{ g/cm}^3$). Esta metodologia já foi utilizada por outros autores (CHAGAS, 2014; GOMES, 2004).

A fim de verificar se as propriedades das cerâmicas fabricadas não variaram significativamente de uma pastilha para outra, os valores de espessura e densidade do sinterizado foram tratados estatisticamente pela análise de Weibull. Os parâmetros da distribuição (β , θ e R^2) se encontram na TAB. 4.1. A FIG. 4.1 mostra o gráfico da distribuição de Weibull que ilustra tal análise.

TAB. 4.1 Valores médios das propriedades das cerâmicas e parâmetros de Weibull.

Característica	Média	Desvio Padrão	β	θ	R^2
Densidade	3,33 g/cm^3	0,07 g/cm^3	58,52	3,36	0,9574
Espessura	10,93 mm	0,18 mm	75,61	11,02	0,9444
Densificação	82,73 %	1,68 %	-	-	-

Valores similares de densidade e densificação também foram obtidos por Gomes (2004) para este material cerâmico ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 4\%\text{Nb}_2\text{O}_5$, sinterizada a 1400°C por 3h), cujos valores foram respectivamente $3,41 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$ e $84,83 \pm 1,75\%$.

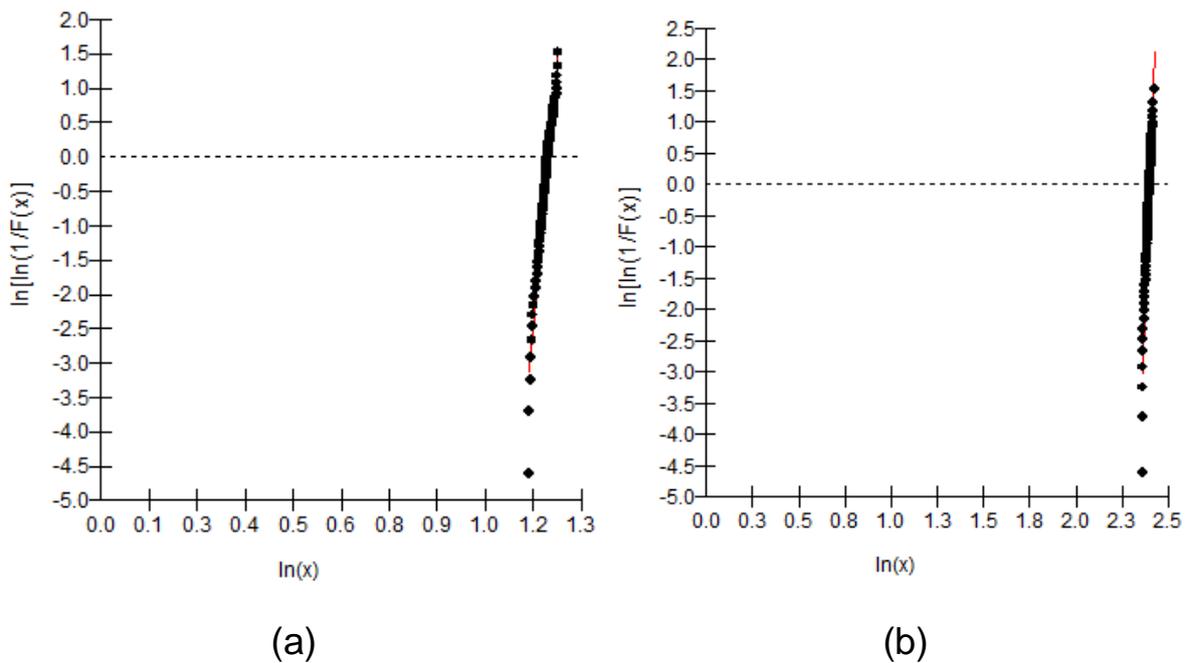


FIG. 4.1 Gráfico da distribuição de Weibull para (a) densidade geométrica e (b) espessura das pastilhas cerâmicas.

O parâmetro R^2 indica a qualidade do ajuste da reta de Weibull aos dados coletados. Valores próximos da unidade (acima de 0,90) mostram uma boa qualidade do ajuste linear, indicando que os dados estão distribuídos conforme uma função de Weibull de parâmetros β e θ . Assim, os valores 0,9574 e 0,9444 obtidos para densidade e espessura das cerâmicas são satisfatórios. O parâmetro θ , por sua vez, indica o valor aproximadamente central da distribuição (característico), o quantil 0,632. Já o parâmetro β é uma medida da confiabilidade das medidas, pois, quanto maior o seu valor, mais estreita é a distribuição. Os altos valores de β obtidos (58,52 e 75,61) destacam a homogeneidade das pastilhas cerâmicas em função a densidade e espessura (O'CONNOR & KLEYNER, 2012). Uma vez que as propriedades das pastilhas cerâmicas não variaram significativamente, foram selecionadas aleatoriamente as pastilhas para utilização nos ensaios balísticos dos SBMs.

4.2 CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DA CAMADA POSTERIOR DA BLINDAGEM (LIGA DE ALUMÍNIO)

4.2.1 DENSIDADE E ESPESSURA DAS PLACAS

Foram medidos o peso e as dimensões de 41 placas da liga de alumínio 5052 H34, a fim de se obter a espessura e a densidade de cada camada interna dos SBMs em estudo, e para confirmar que as placas possuem as mesmas propriedades, já que foram fornecidas a partir de uma chapa de única corrida. Os resultados encontram-se na TAB. 4.2.

A densidade média foi de $2,66 \pm 0,02$ g/cm³, compatível com o valor 2,68 g/cm³ disponível na literatura para a liga 5052 H34 (ASM Aerospace Specification Metals Inc., 2015). A espessura média foi de $5,15 \pm 0,05$ mm, que é compatível com os 5 mm que eram esperados para as placas que irão compor os SBMs deste trabalho.

Os dados de densidade e espessura foram tratados estatisticamente pela análise de Weibull. A TAB. 4.2 mostra os parâmetros (β , θ e R^2), juntamente com as médias e desvios padrão, enquanto a FIG. 4.2 mostra a reta de Weibull para esta distribuição.

TAB. 4.2 Parâmetros de Weibull para a densidade e espessura das placas de liga 5052 H34.

Característica	Média	Desvio Padrão	β	θ	R^2
Densidade	2,66 g/cm ³	0,02 g/cm ³	184,80	2,67	0,9001
Espessura	5,15 mm	0,05 mm	126,30	5,17	0,9557

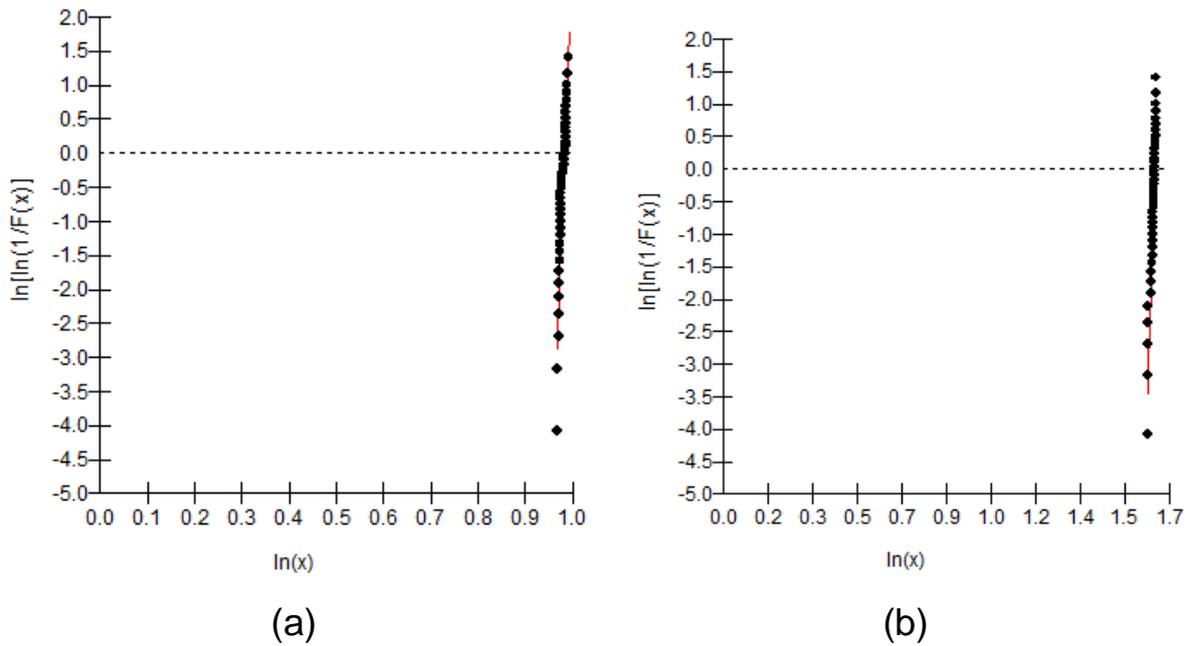


FIG. 4.2 Gráfico da distribuição de Weibull para (a) densidade e (b) espessura das placas de liga de alumínio 5052 H34.

Observa-se pela TAB. 4.2 e FIG. 4.2 que a reta de Weibull descreve bem o comportamento dos dados de densidade e espessura, sendo quantificado pela qualidade do ajuste R^2 bem próximo de 1, respectivamente 0,9001 e 0,9557. Similarmente às cerâmicas, há homogeneidade na espessura e densidade das placas de alumínio.

4.2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Foram realizados ensaios de tração e de dureza de 6 amostras das placas fornecidas. A FIG. 4.3 mostra as curvas tensão *versus* deformação da liga de alumínio. A TAB. 4.3, por sua vez, mostra os valores médios de dureza (HRB), resistência mecânica (σ_T) e deformação máxima ($\Delta L/L_0$) medidos nos ensaios de dureza e tração das amostras das placas de alumínio, juntamente com os parâmetros de Weibull. As retas de Weibull são mostradas na FIG. 4.4.

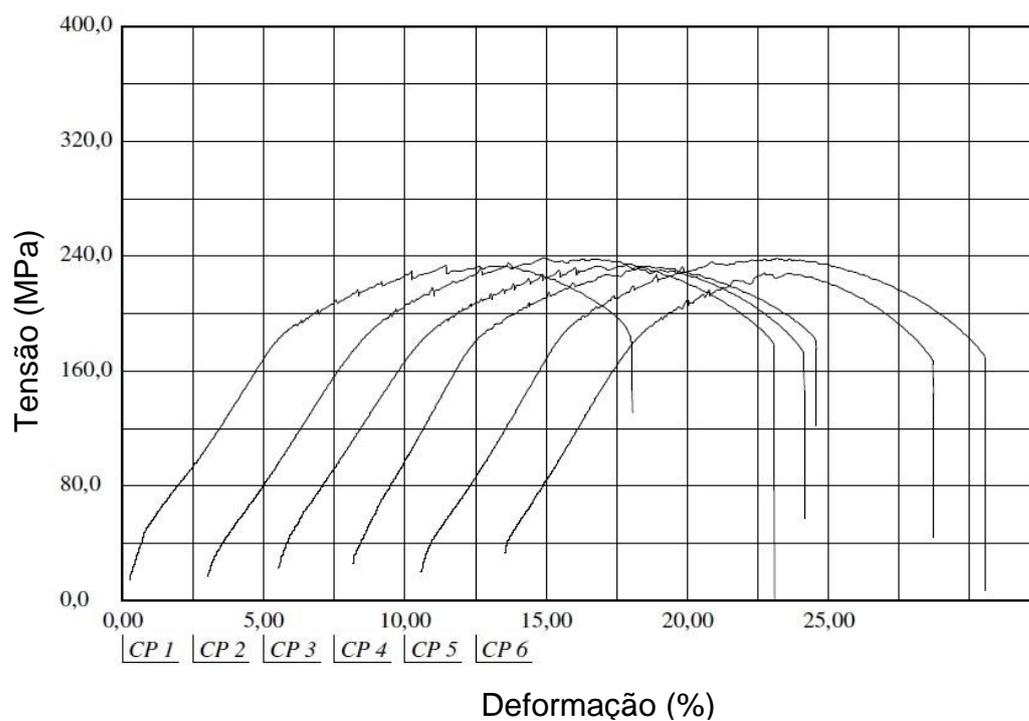


FIG. 4.3 Curvas tensão *versus* deformação de amostras das placas de liga de alumínio 5052 H34.

TAB. 4.3 Parâmetros de Weibull para as propriedades mecânicas das placas de alumínio 5052 H34.

Característica	Média	Desvio Padrão	β	θ	R^2
σ_T	233,7 MPa	4,1 MPa	57,10	236,00	0,9230
$\Delta L/L_0$ (%)	18,6 %	1,9 %	10,27	19,36	0,9242
HRB	29	-	-	-	-

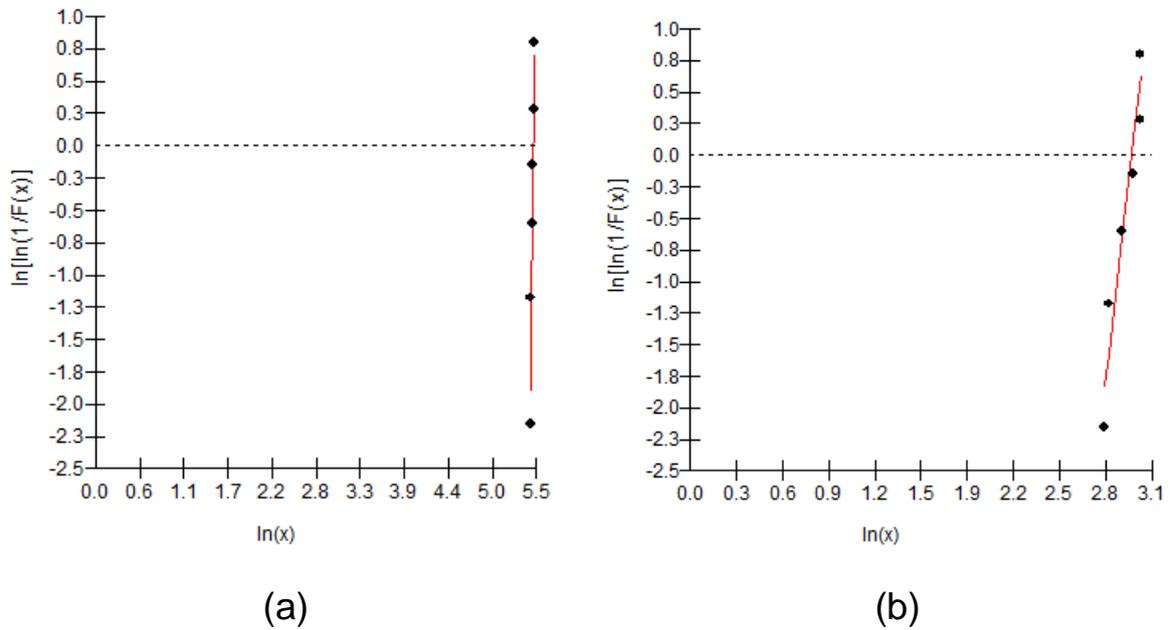


FIG. 4.4 Gráfico da distribuição de Weibull para (a) resistência mecânica e (b) deformação máxima das placas de liga de alumínio 5052 H34.

A partir da FIG. 4.3, observa-se o comportamento típico das ligas de alumínio, ocorrendo fratura após ocorrência de grande quantidade de deformação. O aspecto “serrilhado” da curva no regime plástico é típico da interação entre as discordâncias e os átomos de impurezas, em um fenômeno denominado envelhecimento dinâmico por deformação, ou *dynamic strain aging* (REED-HILL, 1973). Este comportamento também era esperado, uma vez que a liga 5052 H34 possui em sua composição elementos de impurezas como o Mg (2,5%) e Fe (0,30%).

Mais uma vez os parâmetros de Weibull sinalizam bom ajuste linear, bem como a alta confiabilidade dos resultados. Estas características, somando-se o fato de que não houve dispersão nas 6 medidas de dureza, indicam que as placas são homogêneas entre si em propriedades mecânicas.

4.3 CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DA CAMADA INTERMEDIÁRIA

4.3.1 TECIDO DE ARAMIDA

Utilizando mesma abordagem, foi medida densidade dos painéis e a espessura dos conjuntos de 18 camadas de tecido de aramida utilizados como camada intermediária, e os resultados foram tratados pela análise de Weibull. A TAB. 4.4 apresenta a média, desvio padrão e os parâmetros β , θ e R^2 , e a FIG. 4.5 mostra o gráfico de Weibull.

TAB. 4.4 Parâmetros de Weibull para a densidade e espessura do conjunto de 18 camadas de tecido de aramida.

Característica	Média	Desvio Padrão	β	θ	R^2
Densidade	1,08 g/cm ³	0,03 g/cm ³	42,62	1,09	0,9704
Espessura	9,68 mm	0,22 mm	47,69	9,78	0,9229

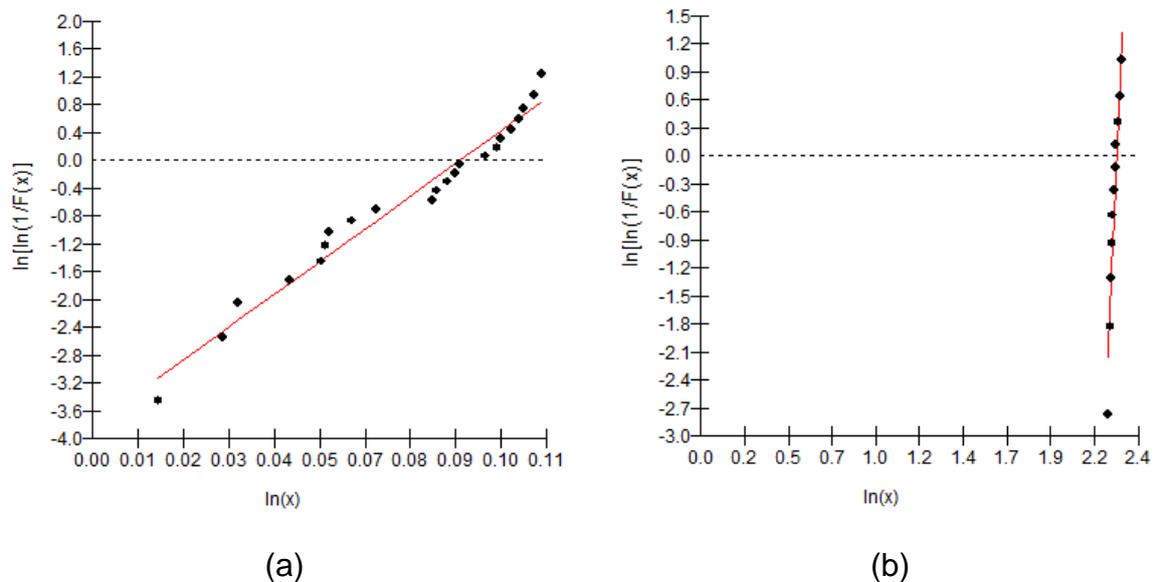


FIG. 4.5 Gráfico da distribuição de Weibull para (a) densidade e (b) espessura dos conjuntos de aramida.

Mais uma vez, observa-se bom ajuste linear R^2 para a densidade e espessura, bem como alta confiabilidade β dos resultados, indicando sobre a homogeneidade da camada de aramida nos diferentes corpos de prova. A densidade $1,08 \pm 0,03$ g/cm³ é, como esperado, menor que a densidade da fibra de aramida, $1,44$ g/cm³ (WANG *et al.*, 2014), pois se trata de um material laminado, com adesivo de policloropreno entre camadas (densidade $1,23$ g/cm³, como medido por Wood *et al.*, 1942), possuindo ainda descontinuidades microscópicas que diminuem ainda mais a densidade do painel. A espessura da camada intermediária apresentou, como esperado, espessura próxima a 10 mm.

4.3.2 COMPÓSITO REFORÇADO COM FIBRAS DE CURAUÁ

Foi medida a espessura e densidade dos compósitos produzidos, e as suas médias e desvios padrão são apresentados na TAB. 4.5. A estatística de Weibull não foi aplicada neste caso, pois as espessuras e densidades dos compósitos serão consideradas individualmente nos resultados dos ensaios balísticos e na avaliação do peso das blindagens.

TAB. 4.5 Valores médios e desvios padrão de espessura e densidade dos compósitos.

Compósito	Espessura média (mm)	Desvio padrão (mm)	Densidade média (g/cm³)	Desvio padrão (g/cm³)
P-0%C	11,05	0,43	1,19	0,02
P-10%C	10,51	0,18	1,17	0,03
P-20%C	10,55	0,36	1,15	0,06
P-30%C	10,61	0,15	1,13	0,03

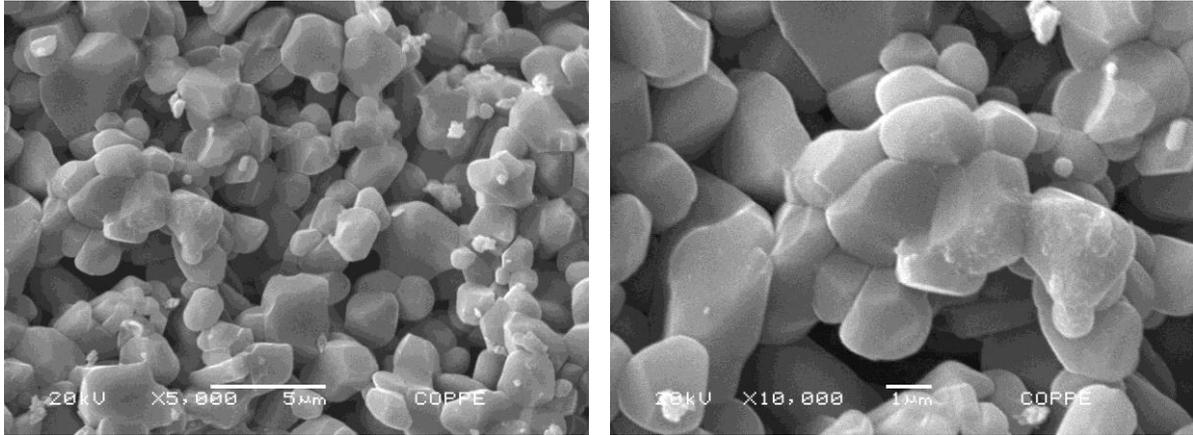
Observa-se pela TAB. 4.5 que os valores de espessura e densidade dos compósitos produzidos são estatisticamente equivalentes (~10,5 mm), e assim pode-se supor que não influenciarão no resultado dos ensaios balísticos. A exceção é a espessura das placas de poliéster puro (P-0%C), que é ligeiramente superior ($11,05 \pm 0,43$ mm). Contudo, isto pode ser benéfico, uma vez que o principal objetivo deste

trabalho é confrontar as fibras de Curauá com os outros materiais para camada intermediária, e neste caso, uma ligeira desvantagem será dada para os compósitos com fibras de Curauá. Se forem considerados para comparação também os valores da TAB. 4.4, referentes à camada intermediária de tecido de aramida, ocorre pequena desvantagem em espessura para a aramida (~1 mm). No entanto, se for incorporado o fator custo da blindagem, que é altamente favorável às fibras de Curauá, a diferença de 1 mm na espessura da camada intermediária pode não ser significativa se o desempenho da blindagem for similar.

4.4 DESEMPENHO BALÍSTICO DAS BLINDAGENS MULTICAMADA

4.4.1 CAMADA FRONTAL CERÂMICA

Em todos os ensaios balísticos das multicamadas, a cerâmica sofreu estilhaçamento completo, como já era esperado. Um de seus fragmentos pode ser observado no MEV (FIG. 4.6). Assim como relatado por outros autores (CHAGAS, 2014; TRINDADE, 2012; DA LUZ, 2014), a sua fratura é predominantemente intergranular, proporcionando maior absorção de energia no impacto balístico. Isto ocorre porque as trincas percorrem maior caminho ao contornarem os grãos, e assim, maior energia é absorvida. Segundo Gomes (2004), a adição de 4% de Nióbia na Alumina provoca a formação de AlNbO_4 , que se precipita nos contornos de grão, fragilizando-os. A quantidade de energia absorvida pela cerâmica corresponde a cerca de 56,6% da energia total do projétil (GOMES, 2004; MONTEIRO *et al.*, 2014).



(a)

(b)

FIG. 4.6 Aspecto microscópico da cerâmica fraturada: (a) 5000x e (b) 10000x.

4.4.2 CAMADA INTERMEDIÁRIA DE TECIDO DE ARAMIDA

Foram realizados 11 ensaios balísticos em blindagens com camada intermediária de aramida. A FIG. 4.7 mostra esta blindagem, antes e após o impacto balístico. Não houve perfuração e, adicionalmente, a camada de aramida permaneceu coesa, ou seja, não se dividiu em duas ou mais partes (FIG. 4.7b).



(a)

(b)

FIG. 4.7 Blindagem multicamada com tecido de aramida: (a) Antes e (b) após o impacto balístico.

A camada de aramida, após o impacto balístico, já foi analisada por outros autores (DA LUZ, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2014). Segundo Monteiro *et al.*, 2014, a aramida é responsável por absorver cerca de 36,7% da energia do projétil, por meio de mecanismos como fratura das fibras, delaminação, deformação e “pull-out” dos fios, e, principalmente, pela captura dos fragmentos do projétil e da cerâmica fraturada. A captura dos fragmentos se dá por meio de incrustação mecânica e, provavelmente, por forças eletrostáticas que surgem em virtude de cargas elétricas presentes na superfície da fibra.

A blindagem testada obedeceu ao critério da NIJ-0101.06 (2008) de indentações abaixo de 44 mm. A TAB. 4.6 mostra os valores de indentação na plastilina, espessura de aramida, velocidade e energia de impacto.

TAB. 4.6 Profundidade da indentação, espessura da camada, velocidade e energia de impacto do projétil para as blindagem com camada intermediária de aramida.

Camada intermediária	Espessura (mm)	Indentação (mm)	Velocidade impacto (m/s)	Energia impacto (kJ)
Aramida	9,50	19,52	868,85	3,66
Aramida	9,65	15,82	870,21	3,67
Aramida	9,54	16,91	865,76	3,64
Aramida	9,87	17,87	864,98	3,63
Aramida	9,72	17,37	865,35	3,63
Aramida	10,06	17,80	861,62	3,60
Aramida	9,96	21,96	861,36	3,60
Aramida	9,74	20,10	856,16	3,56
Aramida	9,59	33,69	858,55 ¹	3,57
Aramida	9,46	20,23	869,26	3,66
Aramida	9,35	21,00	870,09	3,67

¹ Captada pelo radar doppler. Todos os outros valores foram captados pela barreira óptica.

Pela análise da TAB. 4.6, é possível observar que não há uma tendência definida entre espessura e indentação, e assim, supõe-se que na faixa utilizada não haja influência da espessura de aramida.

Um dos valores de indentação, 33,69 mm, chama a atenção por desviar-se razoavelmente dos outros valores e do valor médio. A FIG. 4.8 mostra o corpo de

prova em questão, e a indentação deixada no material de referência. Aparentemente, não há nenhuma anormalidade no corpo de prova ensaiado.

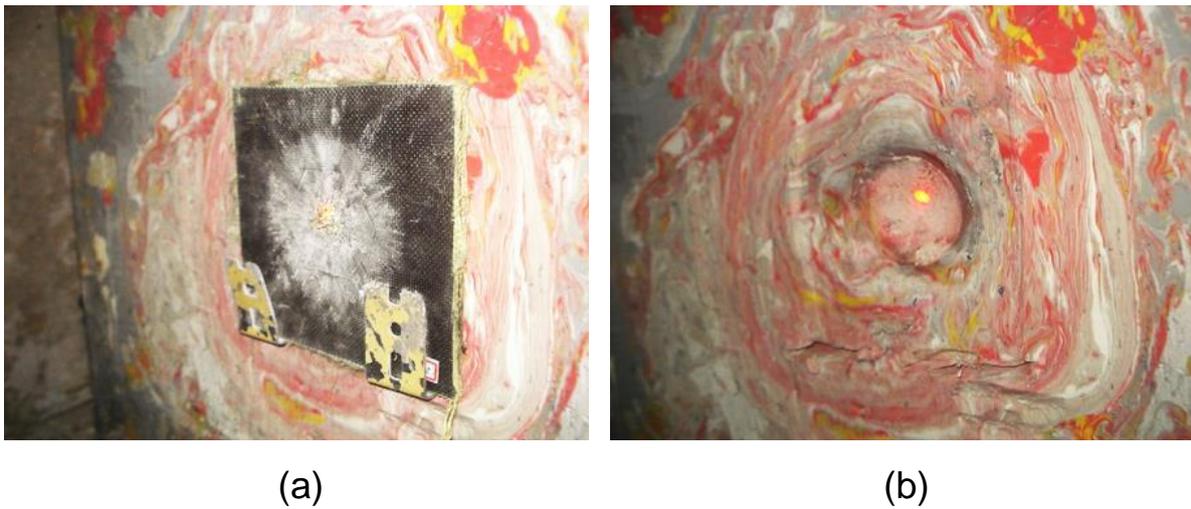


FIG. 4.8 Ensaio relativo à indentação atípica: (a) corpo de prova com aramida e (b) indentação.

Os dados de indentação foram tratados segundo a estatística de Weibull. A Tabela 4.7 mostra os parâmetros de Weibull, juntamente com a média e o desvio padrão, e a FIG. 4.9 mostra o gráfico de Weibull. Optou-se por realizar a análise da série completa dos dados, e por repetir a análise censurando o valor de indentação que se desviou.

TAB. 4.7 Parâmetros de Weibull, média e desvio padrão da indentação para a blindagem com aramida.

Característica	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	β	θ	R^2
Indentação (sem censura)	20,21	4,85	4,81	22,13	0,6764
Indentação (com censura)	18,86	1,98	10,10	20,19	0,9478

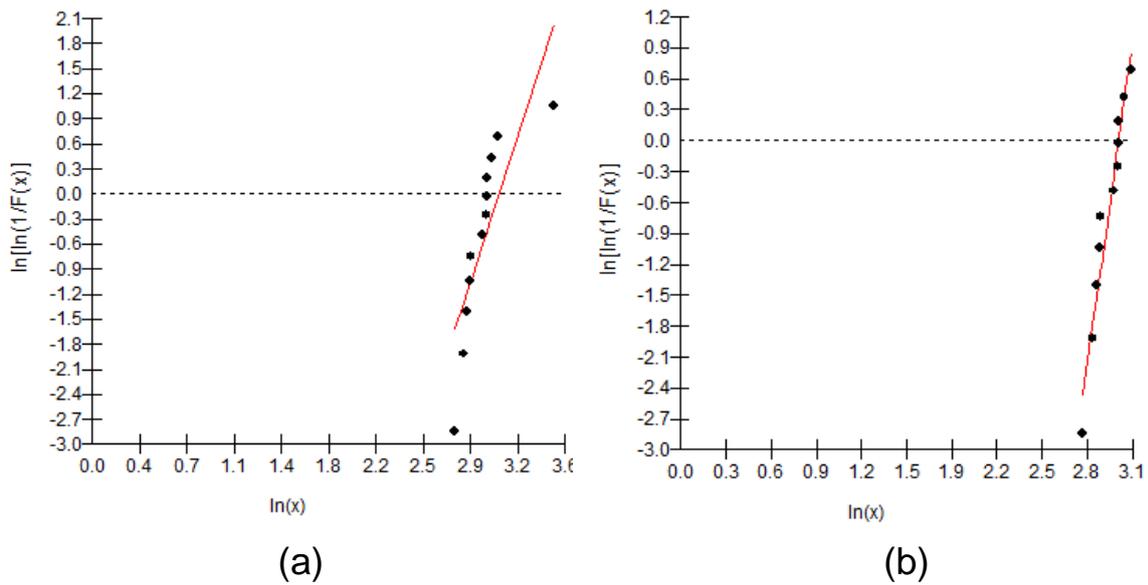


FIG. 4.9 Gráficos da distribuição de Weibull da indentação para a blindagem com aramida: (a) série de dados completa; (b) com censura da indentação fora da média.

Observa-se pela TAB. 4.7 e FIG. 4.9 que o ajuste R^2 melhora consideravelmente, de 0,6764 para 0,9478, se o dado que se desviou da média for censurado, mostrando que o valor não tem significância estatística para a análise. A explicação para o ocorrido pode estar em alguma anormalidade na preparação da plastilina para este disparo específico, diferença no ajuste do provete ou desestabilização do projétil próximo ao impacto.

Adicionalmente, se dados de indentação de blindagem multicamada com aramida da literatura (DA LUZ, 2014) forem acrescentados aos do presente trabalho, obtém-se a distribuição de Weibull da FIG. 4.10, com parâmetros $\beta = 7,323$, $\theta = 22,08$ e $R^2 = 0,9146$, mostrando excelente concordância, com o número de amostras aumentando para 17.

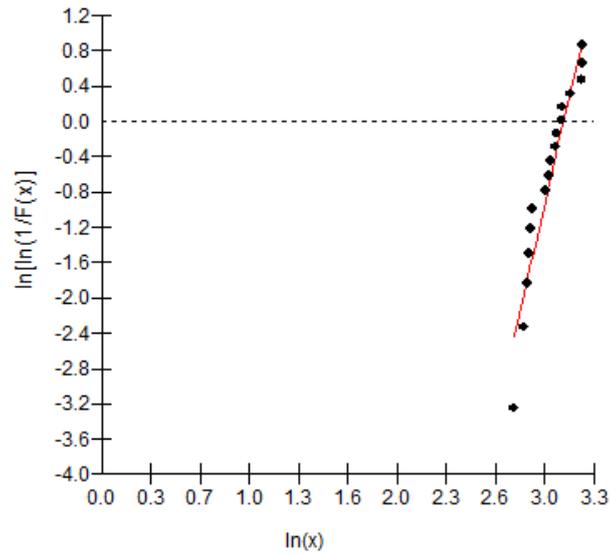


FIG. 4.10 Gráfico da distribuição de Weibull da indentação para a blindagem com aramida, com o acréscimo dos dados de Da Luz, 2014.

4.4.3 CAMADA INTERMEDIÁRIA DE RESINA POLIÉSTER

Foram realizados 9 ensaios balísticos em blindagens com camada intermediária de poliéster puro. A FIG. 4.11 mostra esta blindagem, antes e após o impacto balístico. Não houve perfuração, porém camada de poliéster foi totalmente estilhaçada (FIG. 4.11b).



FIG. 4.11 Blindagem multicamada com poliéster puro: (a) Antes e (b) após o impacto balístico.

A blindagem de poliéster obedeceu ao critério da NIJ-0101.06 (2008) de indentações abaixo de 44 mm. A TAB. 4.8 mostra os valores de indentação na plastilina, espessura da camada de poliéster, velocidade e energia de impacto.

TAB. 4.8 Profundidade da indentação, espessura da camada, velocidade e energia de impacto do projétil para as blindagem com camada intermediária de poliéster puro.

Camada intermediária	Espessura (mm)	Indentação (mm)	Velocidade impacto (m/s)	Energia impacto (kJ)
P-0%C	9,45	23,40	829,37	3,34
P-0%C	9,64	20,32	846,56	3,48
P-0%C	12,14	30,85	865,35	3,63
P-0%C	10,88	21,88	868,17	3,66
P-0%C	11,38	19,80	865,58	3,63
P-0%C	11,52	16,79	873,56	3,70
P-0%C	10,50	23,57	861,96	3,60
P-0%C	10,63	22,61	872,68	3,69
P-0%C	10,99	22,64	856,60	3,56

Observa-se, mais uma vez um valor atípico, 30,85 mm. Assim, será analisada mais uma vez a série completa dos dados, e a metodologia será repetida, censurando-se o valor de indentação que se desviou. A Tabela 4.9 mostra os parâmetros de Weibull, juntamente com a média e o desvio padrão, e a FIG. 4.12 mostra o gráfico de Weibull.

TAB. 4.9 Parâmetros de Weibull, média e desvio padrão da indentação para a blindagem com poliéster.

Característica	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	β	θ	R²
Indentação (sem censura)	22,59	4,30	6,28	24,07	0,8672
Indentação (com censura)	21,21	2,51	8,739	23,04	0,9518

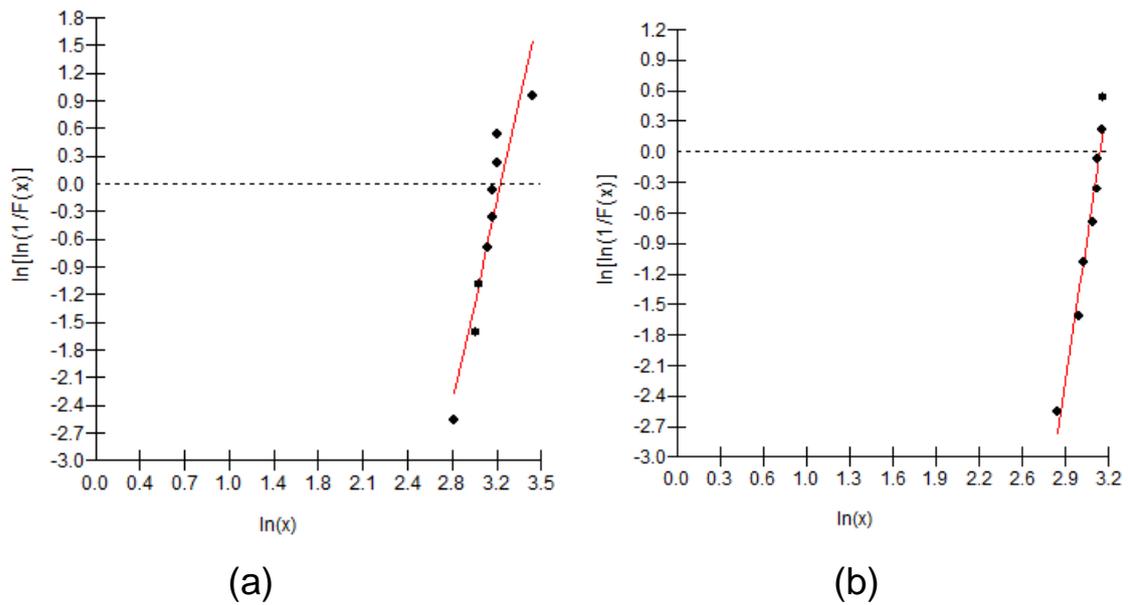


FIG. 4.12 Gráficos da distribuição de Weibull da indentação para a blindagem com poliéster: (a) série de dados completa; (b) com censura da indentação fora da média.

Observa-se pela TAB. 4.9 e FIG. 4.12 que o ajuste R^2 melhora apenas 8,46%, de 0,8672 para 0,9518, enquanto no caso da aramida o ajuste melhora 27,14%. Isto poderia ser um indicativo de algum outro modo de falha atuante do sistema. Observando o corpo de prova antes e após o impacto (FIG. 4.13), pode-se ter uma ideia do que pode ter ocorrido.



FIG. 4.13 Ensaio relativo à indentação atípica: corpo de prova com poliéster (a) antes e (b) após o impacto.

Observa-se pela FIG. 4.13 que a zona de impacto está ligeiramente deslocada do centro da blindagem, o que claramente não ocorreu na blindagem de aramida (FIG. 4.8a). É conhecido que blindagens multicamada com camada frontal de cerâmica possuem um fenômeno conhecido como “efeito de aresta”. Este fenômeno consiste na redução da resistência balística de amostras cerâmicas atingidas em pontos próximos às bordas ou interfaces de peças cerâmicas adjacentes (CHAGAS, 2014). É comum a falha de blindagens cerâmicas bicamada com a ocorrência do efeito de aresta, e é possível que o fato de haver uma camada intermediária frágil, como o poliéster, tenha evitado a falha completa da blindagem. No entanto, para que este segundo modo de falha seja confirmado ou rejeitado, mais testes deveriam ser conduzidos, ou seja, mais pontos na curva de Weibull.

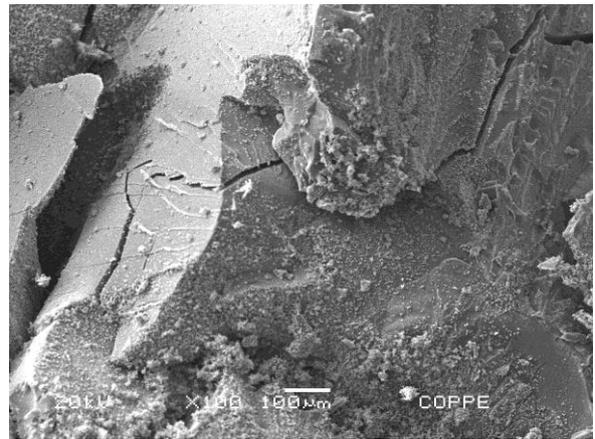
Um dos fragmentos de poliéster fraturado foi levado ao MEV para observação. As FIG. 4.14a e 4.14b mostram a região em que foi recuperado o fragmento, e as FIG. 4.14c, 4.14d e 4.14e mostram seu aspecto microscópico. Pode ser observado pela FIG. 4.14b que além de trincas radiais partindo do ponto de impacto, existe grande quantidade de fragmentos da cerâmica incrustados no poliéster. Um olhar mais refinado, com o aumento de 1000x, mostra que neste material também atuam outros mecanismos captura da cerâmica, como as forças de Van der Waals e/ou as forças eletrostáticas, como sugerido por Monteiro *et al.*, 2014.



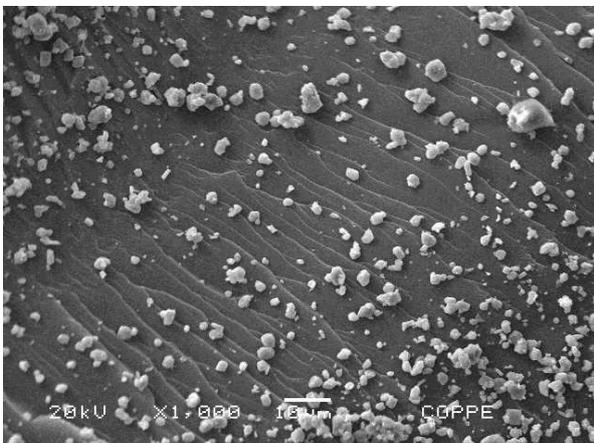
(a)



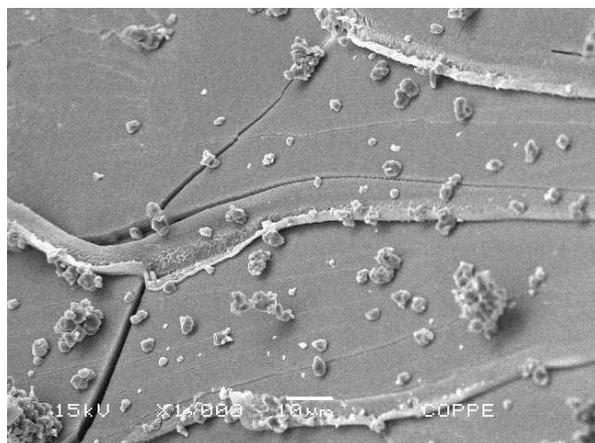
(b)



(c)



(d)



(e)

FIG. 4.14 Fragmentos do poliéster fraturado: (a) Corpo de prova recuperado; (b) Detalhe da região central do corpo de prova. Micrografias eletrônicas: (c) 100x; (d,e) 1000x.

Um espectro de EDS obtido de um dos fragmentos (FIG. 4.15) confirma que é, de fato, a cerâmica fraturada (predominantemente Al_2O_3), como mostram os picos referentes ao alumínio (Al) e ao oxigênio (O). Os picos referentes à Platina (Pt) e ao carbono (C) referem-se, respectivamente, ao recobrimento condutor e à matriz poliéster.

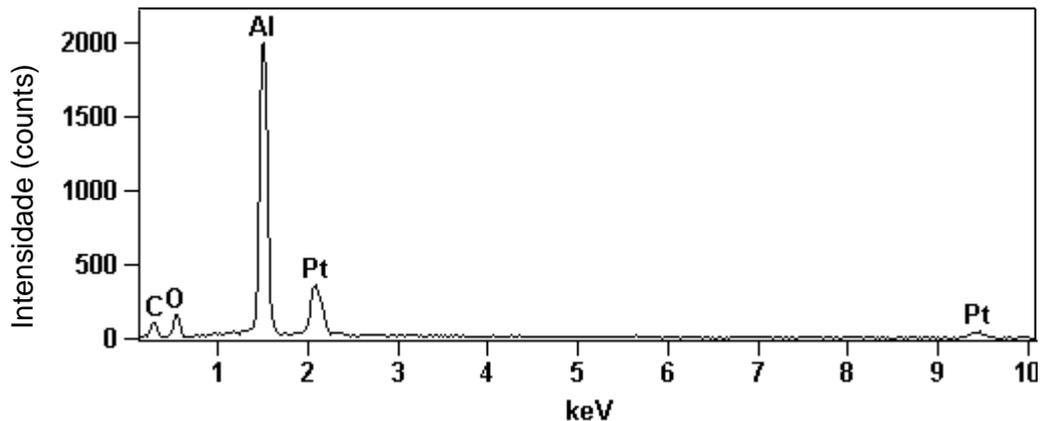


FIG. 4.15 Espectro de EDS de um dos fragmentos capturados pelo poliéster.

4.4.4 CAMADA INTERMEDIÁRIA DE COMPÓSITO REFORÇADO COM 10% DE CURAUÁ

Foram realizados 7 ensaios balísticos em blindagens com camada intermediária de poliéster reforçado com 10% de Curauá. A FIG. 4.16 mostra esta blindagem, antes e após o impacto balístico. Não houve perfuração (FIG. 4.16b), e a camada intermediária foi fragmentada em 3 a 7 partes.

A blindagem de poliéster com 10% de Curauá obedeceu ao critério da NIJ-0101.06 (2008) de indentações abaixo de 44 mm. A TAB. 4.10 mostra os valores de indentação na plastilina, espessura do compósito, velocidade e energia de impacto.



FIG. 4.16 Blindagem multicamada com 10% de Curauá: (a) Antes e (b) após o impacto balístico.

TAB. 4.10 Profundidade da indentação, espessura da camada, velocidade e energia de impacto do projétil para as blindagem com camada intermediária de poliéster com 10%Curauá.

Camada intermediária	Espessura (mm)	Indentação (mm)	Velocidade impacto (m/s)	Energia impacto (kJ)
P-10%C	10,35	21,28	846,56	3,48
P-10%C	10,71	15,41	834,45	3,38
P-10%C	10,78	21,11	871,08	3,68
P-10%C	10,61	20,32	866,25	3,64
P-10%C	10,61	32,63	865,28	3,63
P-10%C	10,29	15,87	864,72	3,63
P-10%C	10,54	23,87	866,51	3,64

Mais uma vez, observa-se um valor atípico, 32,63 mm. A Tabela 4.11 mostra os parâmetros de Weibull, juntamente com a média e o desvio padrão, e a FIG. 4.17 mostra o gráfico de Weibull. A análise foi feita com a série de dados completa, e censurando-se o valor de indentação que se desviou.

TAB. 4.11 Parâmetros de Weibull, média e desvio padrão da indentação para a blindagem com poliéster reforçado com 10% de Curauá.

Característica	Média (mm)	Desvio		β	θ	R^2
		Padrão	(mm)			
Indentação (sem censura)	21,50	5,77		3,95	23,76	0,8639
Indentação (com censura)	19,64	3,04		5,28	22,30	0,8969

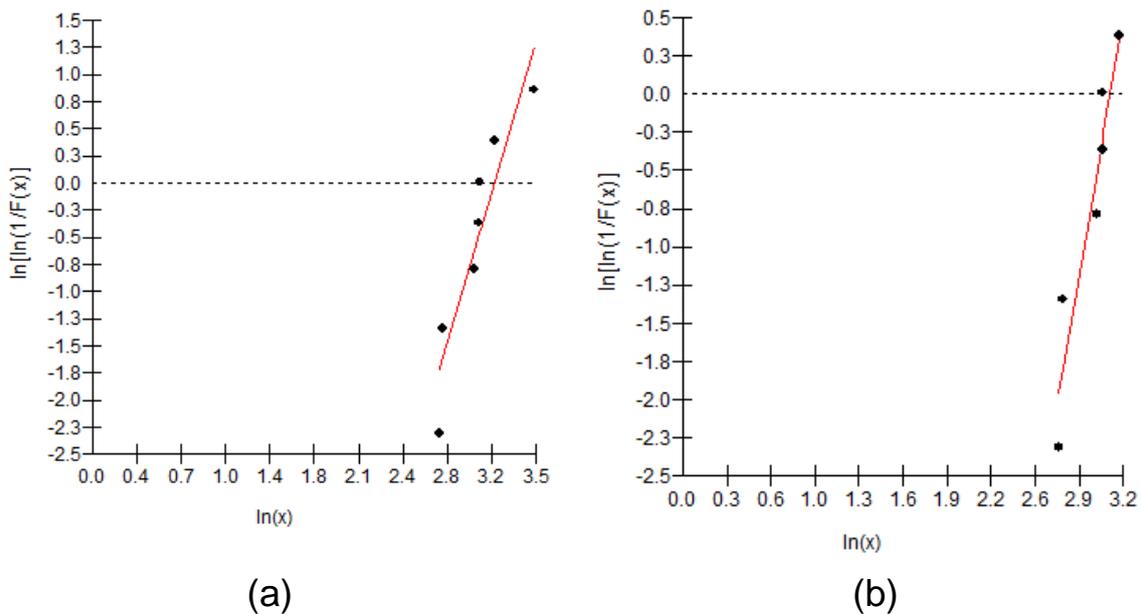
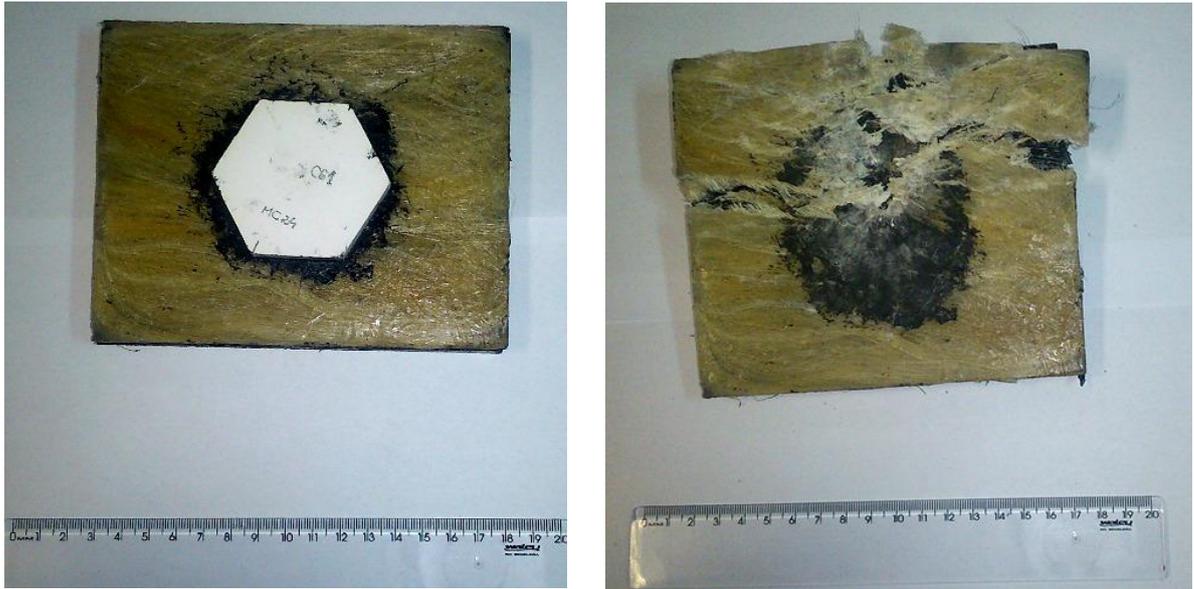


FIG. 4.17 Gráficos da distribuição de Weibull da indentação para a blindagem com poliéster reforçado com 10% de Curauá: (a) série de dados completa; (b) com censura da indentação fora da média.

Observa-se pela TAB. 4.11 que o ajuste R^2 melhora apenas 3,3%, menor ainda que os 8,46% do poliéster, passando de 0,8639 para 0,8969. Isto pode indicar, novamente, o efeito de aresta. A FIG. 4.18 mostra como o impacto do projétil ficou deslocado do centro da cerâmica, demarcada pela região escura do adesivo de poliuretano.



(a)

(b)

FIG. 4.18 Blindagem multicamada com 10% de Curauá: (a) Antes e (b) após o impacto balístico.

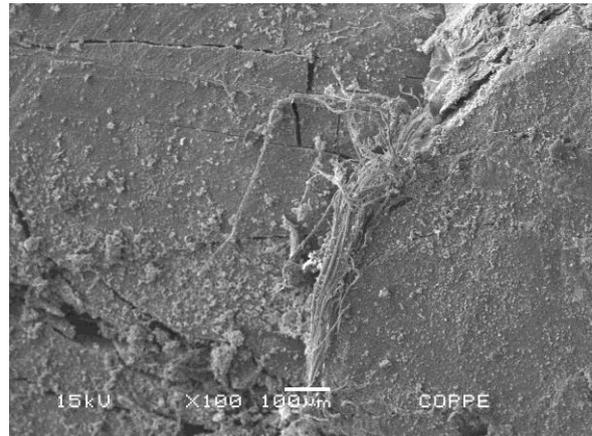
Um dos fragmentos do compósito fraturado foi levado ao MEV para observação. As FIG. 4.19a e 4.19b mostram a região em que foi recuperado o fragmento, e as FIG. 4.19c, 4.19d e 4.19e mostram seu aspecto microscópico. Já não são observadas trincas radiais, e sim uma pequena quantidade de trincas que se propagam ao longo das fibras do ponto de impacto até atingir a borda do compósito. Mais uma vez são observados fragmentos da cerâmica incrustados no material (FIG. 4.19b). Em aumentos da ordem de 100x (FIG. 4.19c) foram observadas regiões com ausência de fibras, devido à pequena fração volumétrica de Curauá. Em maiores aumentos, da ordem de 1000x (FIG. 4.19c), observa-se que tanto as fibrilas de Curauá como a matriz poliéster capturam fragmentos da cerâmica. O mecanismo de captura parece ser, de fato, o de forças eletrostáticas (MONTEIRO *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2015), pois estas possuem maior intensidade, e parecem se alinhar ao longo de direções que saem do plano da superfície, como mostra o fragmento cerâmico da FIG. 4.19e.



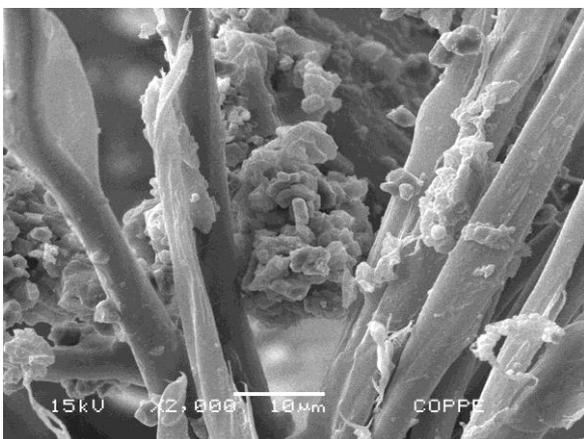
(a)



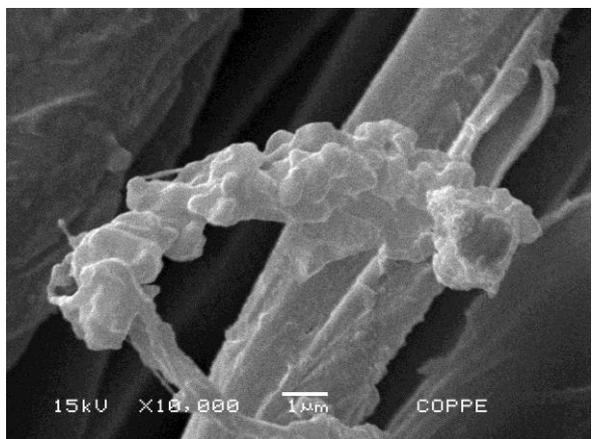
(b)



(c)



(d)



(e)

FIG. 4.19 Fragmentos do compósito com 10% de Curauá: (a) Corpo de prova recuperado; (b) Detalhe da região central do corpo de prova. Micrografias eletrônicas: (c) 100x; (d) 2000x; (e) 10000x.

4.4.5 CAMADA INTERMEDIÁRIA DE COMPÓSITO REFORÇADO COM 20% DE CURAUÁ

Foram realizados 7 ensaios balísticos em blindagens com camada intermediária de poliéster reforçado com 20% de Curauá. A FIG. 4.20 mostra esta blindagem, antes e após o impacto balístico. Não houve perfuração (FIG. 4.20b), e a camada intermediária sofreu fragmentação, em geral, em duas partes. No entanto, a separação das partes do compósito não foi completa, permanecendo algumas fibras sem sofrer ruptura.



FIG. 4.20 Blindagem multicamada com 20% de Curauá: (a) Antes e (b) após o impacto balístico.

A blindagem de poliéster com 20% de Curauá obedeceu ao critério da NIJ-0101.06 (2008) de indentações abaixo de 44 mm. A TAB. 4.12 mostra os valores de indentação na plastilina, espessura do compósito, velocidade e energia de impacto.

TAB. 4.12 Profundidade da indentação, espessura da camada, velocidade e energia de impacto do projétil para as blindagem com camada intermediária de poliéster com 20%Curauá.

Camada intermediária	Espessura (mm)	Indentação (mm)	Velocidade impacto (m/s)	Energia impacto (kJ)
P-20%C	11,41	22,59	839,91	3,42
P-20%C	10,69	19,62	835,96	3,39
P-20%C	10,51	16,31	871,42	3,68
P-20%C	10,41	19,15	871,23	3,68
P-20%C	10,28	22,68	867,08	3,65
P-20%C	10,31	20,45	860,70	3,59
P-20%C	10,74	18,06	867,00	3,65

Neste conjunto de ensaios, não foi observado valor atípico de indentação. A TAB. 4.13 mostra os parâmetros de Weibull, juntamente com a média e o desvio padrão, e a FIG. 4.21 mostra o gráfico de Weibull.

TAB. 4.13 Parâmetros de Weibull, média e desvio padrão da indentação para a blindagem com poliéster reforçado com 20% de Curauá.

Característica	Média (mm)	Desvio		β	θ	R^2
		Padrão (mm)				
Indentação	19,84	2,31		8,98	20,87	0,9711

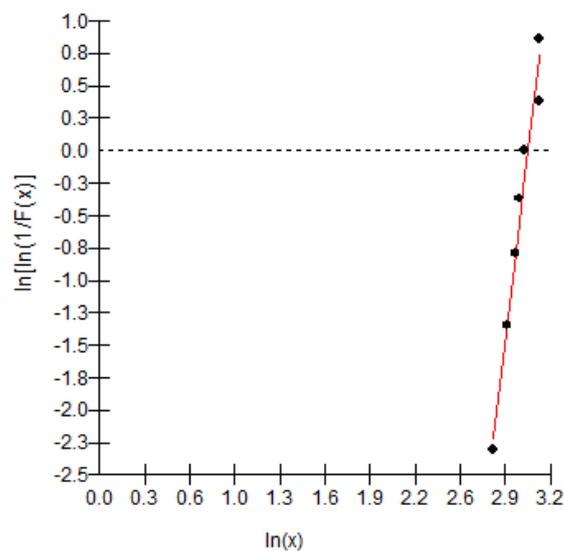


FIG. 4.21 Gráfico da distribuição de Weibull da indentação para a blindagem com poliéster reforçado com 20% de Curauá.

Observa-se pela TAB. 4.13 e FIG. 4.21 que a dispersão nos valores de indentação se ajusta bem à distribuição de Weibull, como mostra o bom ajuste R^2 igual a 0,9711. O valor de β também indica sobre a qualidade da distribuição, que é mais estreita que para as blindagens de 0% e 10% de Curauá.

Um dos fragmentos do compósito fraturado foi levado ao MEV. As FIG. 4.22a e 4.22b mostram a região em que foi recuperado o fragmento, e as FIG. 4.22c, 4.22d e 4.22e mostram seu aspecto microscópico. Observa-se que a camada intermediária permaneceu relativamente coesa e, em geral, apenas uma trinca se propaga ao longo do eixo das fibras do ponto de impacto até atingir a borda do compósito. Observa-se pela FIG. 4.22b e 4.22c grande quantidade de fragmentos da cerâmica depositados na sua superfície. As superfícies das fibrilas se mostraram aproximadamente lisas (FIG. 4.22e) e possuem finos fragmentos da cerâmica e da resina depositados em sua superfície.

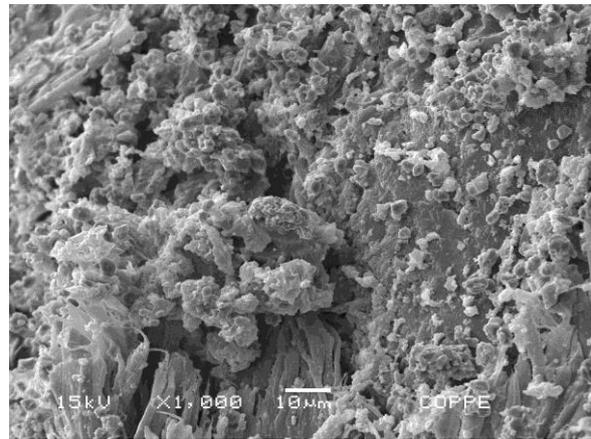
Segundo Monteiro *et al*, 2013, as fibras de Curauá fraturam por um mecanismo de “delaminação” das microfibrilas, pois grande parte destes constituintes se separam lateralmente durante a falha da fibra. Por este motivo observam-se feixes de microfibrilas de Curauá relativamente separadas, algumas rompidas e outras não (FIG. 4.22d).



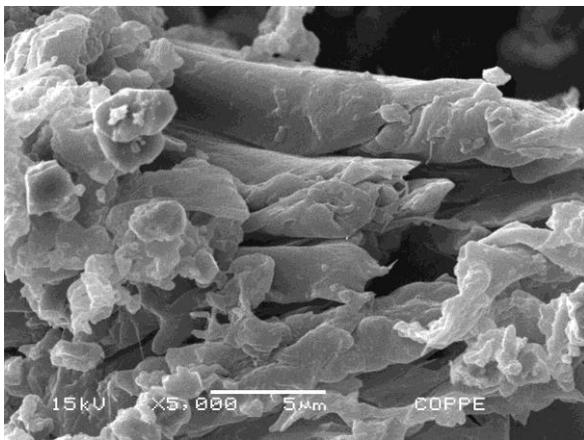
(a)



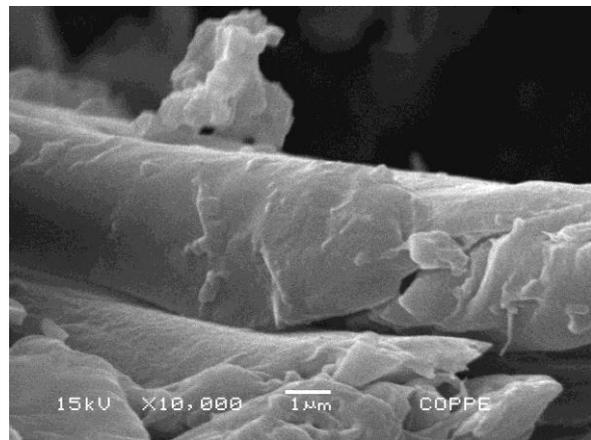
(b)



(c)



(d)



(e)

FIG. 4.22 Fragmentos do compósito com 20% de Curauá: (a) Corpo de prova recuperado; (b) Detalhe da região central do corpo de prova. Micrografias eletrônicas: (c) 1000x; (d) 5000x; (e) 10000x.

4.4.6 CAMADA INTERMEDIÁRIA DE COMPÓSITO REFORÇADO COM 30% DE CURAUÁ

Foram realizados 8 ensaios balísticos em blindagens com camada intermediária de poliéster reforçado com 30% de Curauá. A FIG. 4.23 mostra esta blindagem, antes e após o impacto balístico. Não houve perfuração (FIG. 4.23b), e o compósito permaneceu coeso, sem fragmentação. Em poucos casos foi observada trinca que chegou até a borda da compósito.



(a)

(b)

FIG. 4.23 Blindagem multicamada com 20% de Curauá: (a) Antes e (b) após o impacto balístico.

A blindagem de poliéster com 30% de Curauá também obedeceu ao critério da NIJ-0101.06 (2008) de indentações abaixo de 44 mm. A TAB. 4.14 mostra os valores de indentação na plastilina, espessura do compósito, velocidade e energia de impacto.

TAB. 4.14 Profundidade da indentação, espessura da camada, velocidade e energia de impacto do projétil para as blindagem com camada intermediária de poliéster com 30%Curauá.

Camada intermediária	Espessura (mm)	Indentação (mm)	Velocidade impacto (m/s)	Energia impacto (kJ)
P-30%C	10,69	24,31	- ¹	-
P-30%C	10,31	20,29	837,24	3,40
P-30%C	10,75	22,94	868,63 ²	3,66
P-30%C	10,75	21,24	867,04	3,65
P-30%C	10,72	24,36	866,85	3,64
P-30%C	10,60	22,65	865,28	3,63
P-30%C	10,65	21,45	867,53	3,65
P-30%C	10,63	18,33	866,29	3,64

¹ Não captada.

Como mostra a TAB. 4.14 não foi observado valor atípico de indentação. A TAB. 4.15 mostra os parâmetros de Weibull, juntamente com a média e o desvio padrão, e a FIG. 4.24 mostra o gráfico de Weibull.

TAB. 4.15 Parâmetros de Weibull, média e desvio padrão da indentação para a blindagem com poliéster reforçado com 30% de Curauá.

Característica	Média (mm)	Desvio			
		Padrão (mm)	β	θ	R²
Indentação	21,95	2,05	11,28	22,88	0,9795

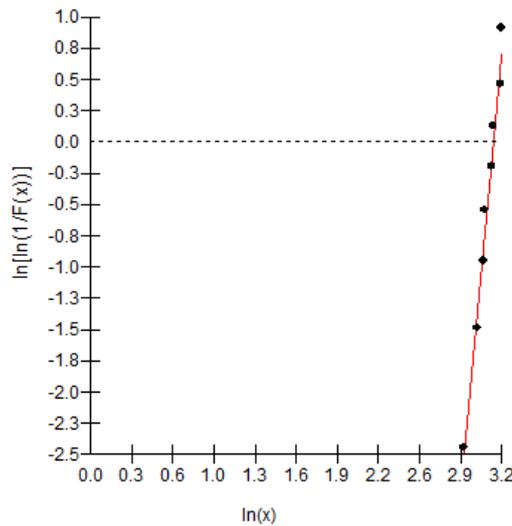


FIG. 4.24 Gráfico da distribuição de Weibull da indentação para a blindagem com poliéster reforçado com 30% de Curauá.

Observa-se pela TAB. 4.15 e FIG. 4.24 que, assim como o compósito com 20% de Curauá, a dispersão nos valores de indentação para o compósito com 30% se ajusta bem à distribuição de Weibull, como mostra o bom ajuste R^2 igual a 0,9795. O valor de β é o mais alto de todas as blindagens testadas, 11,28, o que indica que a blindagem com 30% de Curauá é a que possui distribuição mais estreita de indentações, tornando-a uma blindagem relativamente confiável. Por este motivo, os testes com as fibras dispostas bidirecionalmente serão realizados nesta composição.

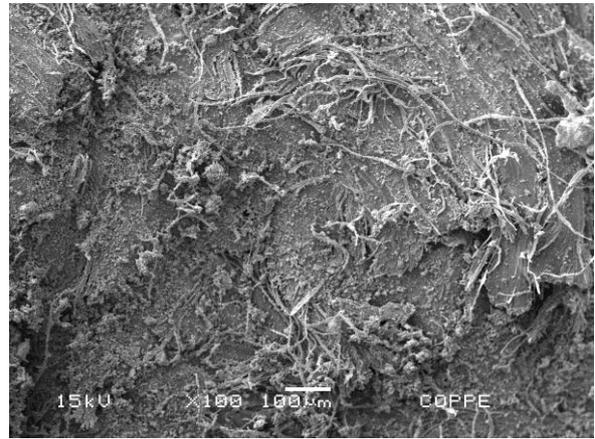
Um fragmento do compósito foi levado ao MEV. As FIG. 4.25a e 4.25b mostram a região em que foi recuperado o fragmento, e as FIG. 4.25c, 4.25d e 4.25e mostram seu aspecto microscópico. Observa-se que a camada intermediária permaneceu coesa, e que as fibras se distribuem com boa uniformidade na matriz polimérica (FIG. 4.25c). Observa-se pela FIG. 4.25b e 4.25c grande quantidade de fragmentos da cerâmica depositados na superfície das fibras, que incluem incrustações e pequenos fragmentos retidos por forças de Van der Waals e/ou eletrostáticas. Novamente observou-se a separação das microfibrilas e suas superfícies aproximadamente lisas (FIG. 4.25d e FIG. 4.25e) e possuem finos fragmentos da cerâmica depositados em sua superfície.



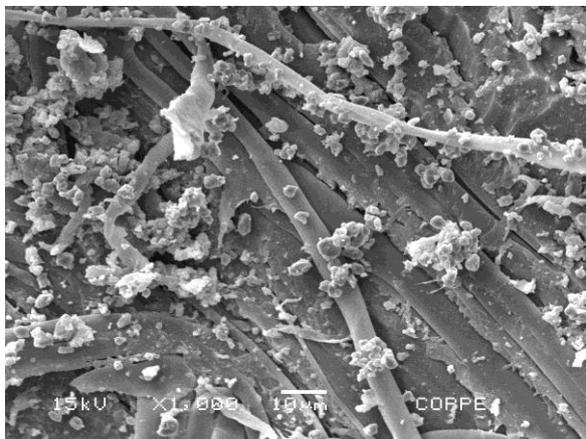
(a)



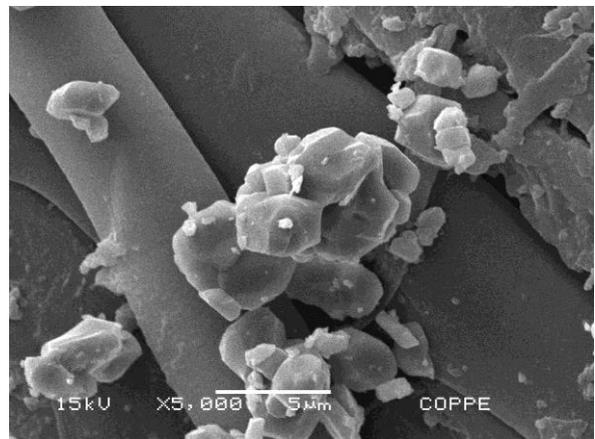
(b)



(c)



(d)



(e)

FIG. 4.25 Fragmentos do compósito com 30% de Curauá: (a) Corpo de prova recuperado; (b) Detalhe da região central do corpo de prova. Micrografias eletrônicas: (c) 100x; (d) 1000x; (e) 5000x.

4.4.7 CAMADA INTERMEDIÁRIA DE COMPÓSITO REFORÇADO COM 30% DE CURAUÁ (FIBRAS DISPOSTAS BIDIRECIONALMENTE)

Foram realizados 3 ensaios balísticos em blindagens com camada intermediária de poliéster reforçado com 30% de Curauá em configuração bidirecional ($0^{\circ}/90^{\circ}$). A FIG. 4.26 mostra esta blindagem, antes e após o impacto balístico. Não houve perfuração, e o compósito permaneceu coeso, sem fragmentação. Não foi observada trinca, como nos outros compósitos. A TAB. 4.16 mostra os valores de indentação na plastilina, espessura do compósito, velocidade e energia de impacto.

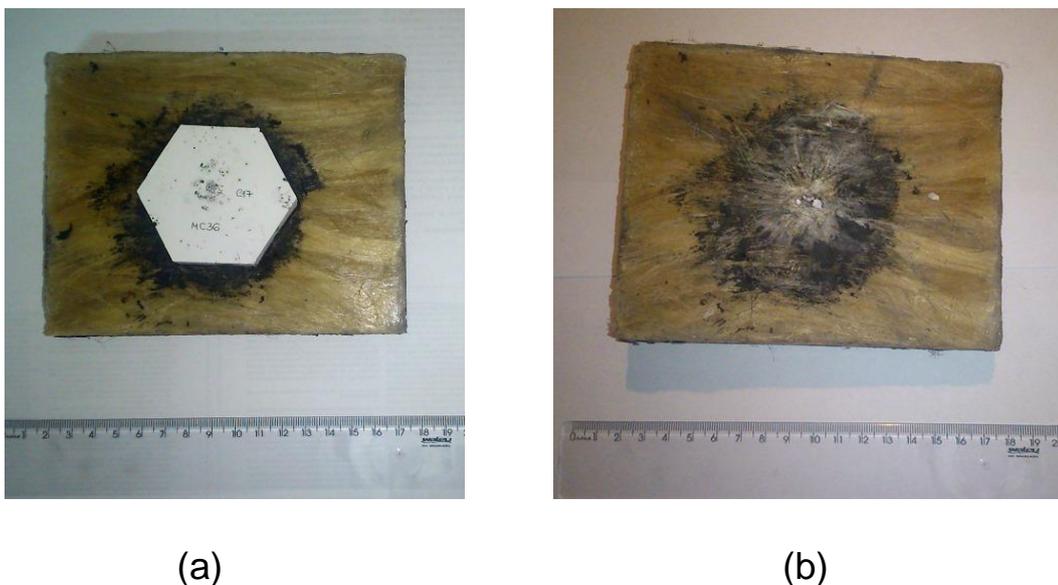


FIG. 4.26 Blindagem multicamada com 30% de fibras de Curauá dispostas bidirecionalmente: (a) Antes e (b) após o impacto balístico

TAB. 4.16 Profundidade da indentação, espessura da camada, velocidade e energia de impacto do projétil para as blindagem com camada intermediária de poliéster com 30%Curauá ($0^{\circ}/90^{\circ}$).

Camada intermediária	Espessura (mm)	Indentação (mm)	Velocidade impacto (m/s)	Energia impacto (kJ)
P-30%C-B	10,86	38,33	866,29	3,64
P-30%C-B	10,44	23,01	890,96	3,85
P-30%C-B	11,19	18,91	864,60	3,63

Observa-se pela TAB. 4.16 que a blindagem multicamada com fibras bidirecionais obedeceu ao critério da NIJ-0101.06 (2008) de indentações abaixo de 44 mm. No entanto, um dos ensaios resultou em indentação relativamente alta, 38,33 mm, que pode ser interpretado com o efeito de aresta da cerâmica (FIG. 4.27).



FIG. 4.27 Ensaio relativo à indentação elevada: corpo de prova com 30% de Curauá bidirecional (a) antes e (b) após o impacto.

4.5 DESEMPENHO BALÍSTICO INDIVIDUAL DOS MATERIAIS DA BLINDAGEM

A fim de avaliar o desempenho individual de cada camada utilizada nos SBMs, foram realizados ensaios de velocidade residual (seção 3.5) em cada camada da blindagem, com a finalidade de estimar o limite balístico dos materiais, utilizando as EQ. 2.1 e 2.2. Neste ensaio todos os alvos foram perfurados. A TAB. 4.17 mostra, para os diferentes materiais, os dados de velocidade média de impacto do projétil (\bar{V}_s), a velocidade residual média (\bar{V}_r), a energia absorvida (E_L), sua porcentagem em relação à energia total (% E_L), bem como a estimativa da velocidade limite (V_L). Para fins comparativos também serão apresentados os dados de outros autores que estudaram SBMs baseados em fibras naturais (DA CRUZ, 2015; DA LUZ, 2014; DA SILVA, 2014b; DE ARAÚJO, 2015; MILANEZI, 2015).

TAB. 4.17 Valores das velocidades médias de impacto e residual, energia absorvida e velocidade limite para cada componente do sistema de blindagem multicamada.

Componente da blindagem	\bar{V}_s (m/s)	\bar{V}_r (m/s)	E_L (J)	% E_L	V_L (m/s)	Referência
P-0%C	861 ±6	829 ±7	269	7,5	235 ±13	PT ¹
P-10%C	863 ±2	833 ±15	244	6,7	218 ±55	PT ¹
P-20%C	860 ±5	837 ±5	186	5,2	180 ±13	PT ¹
P-30%C	858 ±3	833 ±7	210	5,8	207 ±21	PT ¹
Epóxi-30%Curauá	848 ±6	835 ±6	106	3,0	148	DA SILVA, 2014
Epóxi- Fibra de Bambu	845 ±3	821 ±4	191	5,7	198	DA CRUZ, 2015
Epóxi- Plaquetas de Bambu	842 ±8	819 ±8	186	5,6	196	DA CRUZ, 2015
Epóxi- Fibra de Rami	-	-	195	-	-	MILANEZI, 2015
Epóxi- Tecido de Rami	-	-	192	-	-	MILANEZI, 2015
Epóxi-Manta de Juta	841 ±7	823 ±6	151	4,4	176	DA LUZ, 2014
Epóxi-Tecido de Juta	844 ±5	819 ±7	198	5,7	202	DA LUZ, 2014
Epóxi- Fibra de Sisal	845 ±4	824 ±5	171	5,0	188	DE ARAÚJO, 2015
Epóxi- Tecido de Sisal	845 ±6	817 ±5	221	6,4	214	DE ARAÚJO, 2015
Tecido de aramida (16 camadas)	862 ±7	835 ±10	221	6,1	212 ±23	PT ¹
Liga de alumínio 5052 H34	860 ±6	832 ±9	234	6,5	228 ±14	PT ¹
Al ₂ O ₃ +4%Nb ₂ O ₅	848 ±5	567 ±4	1920	55	629	DA SILVA, 2014

¹ PT: Presente Trabalho

Pela TAB. 4.17 pode-se observar que os compósitos de matriz poliéster tiveram um bom resultado de V_L , em relação aos de matriz epóxi, especialmente a resina pura (P-0%C), que apresentou uma V_L relativamente alta (235 ±13 m/s), comparável aos valores da liga de alumínio (228 ±14 m/s) e do tecido de aramida (212 ± 23 m/s). Isto se deve à fragilidade da matriz poliéster, que absorve parte da energia do projétil na produção de superfícies de fratura (MONTEIRO *et al.*, 2015). O mesmo mecanismo é utilizado pela cerâmica (Al₂O₃+4%Nb₂O₅), mas devido à sua alta

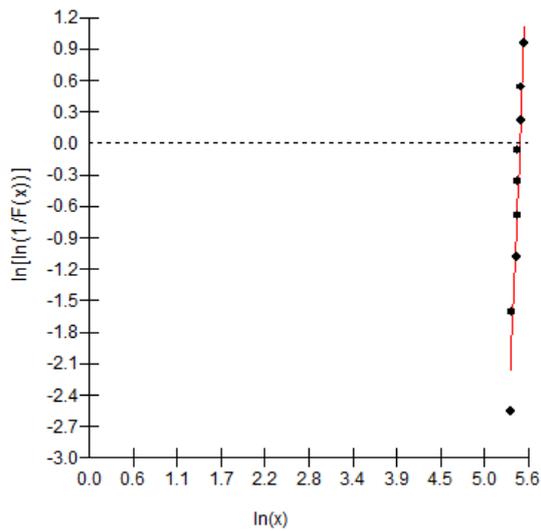
resistência à compressão, uma quantidade muito maior da energia é absorvida na sua fratura (DA SILVA *et al.*, 2014; GOMES, 2004), 55% (DA SILVA, 2014b) contra 7,5% do poliéster.

Entre os compósitos, observou-se que os reforçados por tecidos, como os de sisal (DE ARAÚJO, 2015) e juta (DA LUZ, 2014), apresentaram maior absorção de energia em relação os reforçados por fibras contínuas. Isto era de se esperar, uma vez que os tecidos tem a característica de absorver distribuir a energia do projétil radialmente para regiões do material distantes do impacto (NAIK & SHRIRAO, 2004).

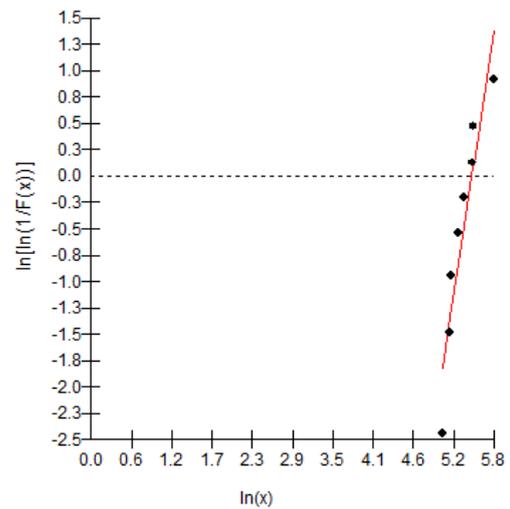
A TAB. 4.18 mostra os parâmetros estatísticos β , θ e R^2 para a velocidade limite dos materiais testados no presente trabalho. A FIG. 4.28 mostra as retas da distribuição de Weibull. Obteve-se, em geral, boa qualidade de ajuste da distribuição. O valor de β é relativamente alto, próximo ou acima de 10, com exceção do compósito P-10%C. Neste grupo, foi observada uma alta variação estatística, quantificada pelo desvio padrão 55 mm, e pelo baixo valor de β (4,32). Isto pode ser um indicativo da menor homogeneidade em distribuição das fibras dos corpos de prova P-10%C, pela pequena quantidade de fibras presentes. Isto já havia sido observado nas imagens de MEV da FIG. 4.19 e na distribuição de indentações utilizando esta camada, TAB. 4.11, cujo desvio das medidas em relação à média (5,77 mm) pode ter sofrido contribuição deste fenômeno.

TAB. 4.18 Parâmetros de Weibull, média e desvio padrão da velocidade limite (V_L) para os diferentes materiais.

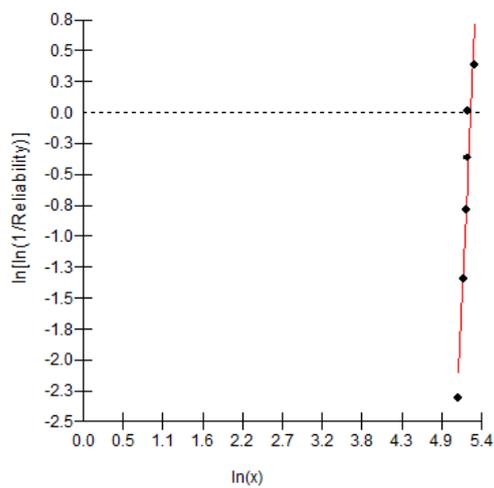
Material	V_L Médio (m/s)	Desvio Padrão (m/s)	β	θ	R^2
P-0%C	235	13	18,96	241,60	0,9318
P-10%C	218	55	4,32	239,50	0,8798
P-20%C	180	13	12,74	191,20	0,9029
P-30%C	207	21	10,03	217,20	0,8481
Tecido de aramida	212	23	9,22	223,50	0,9281
Liga de alumínio 5052 H34	228	14	16,51	235,10	0,8646



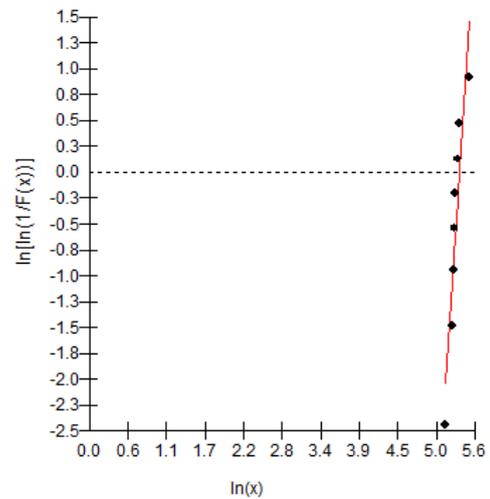
(a)



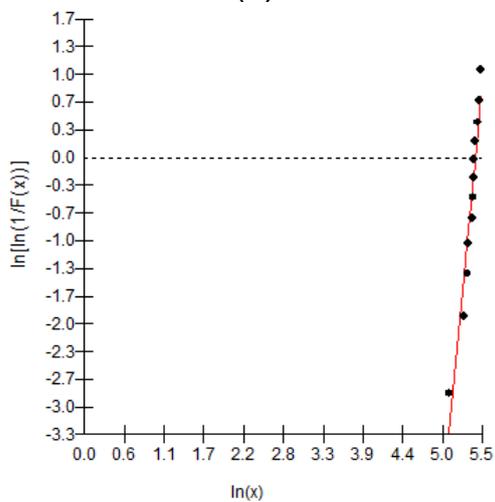
(b)



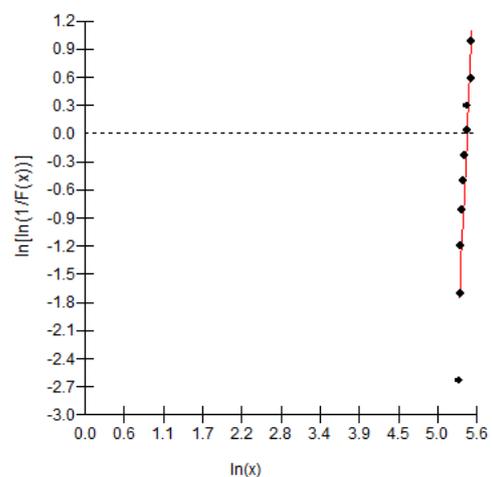
(c)



(d)



(e)



(f)

FIG. 4.28 Gráficos da distribuição de Weibull da velocidade V_L para os diferentes materiais: (a) P-0%C; (b) P-10%C; (c) P-20%C; (d) P-30%C; (e) Aramida; (f) Liga de Alumínio.

O desempenho individual das camadas intermediárias pode ser mais bem avaliado pela FIG. 4.29, que mostra a variação da velocidade limite com o percentual de Curauá, e a comparação com aramida. Observa-se uma tendência de diminuição da velocidade limite com o aumento da porcentagem de Curauá até fração de 20%, ou seja, ocorre uma queda no desempenho balístico. Porém, há uma melhora mediante a adição de fibras até 30%. Isto ocorre, provavelmente, pela mudança progressiva no modo de falha dos compósitos de Curauá com o aumento do teor de fibras, de uma fratura puramente frágil da matriz, para um tipo mais complexo, que envolve descolamento e fratura das fibras, fratura da matriz e delaminação das camadas de fibra (MONTEIRO *et al.*, 2015; NAIK & SHRIRAO, 2004; WANG *et al.*, 2014). Assim, uma adição de 10% ou 20% de fibras pode prejudicar a continuidade da matriz, sem promover o reforço desejado, pois a distribuição das fibras não é uniforme, como foi visto anteriormente. No P-30%C a quantidade de fibras é maior, o que facilita a distribuição das fibras na matriz metálica durante a fabricação do compósito.

A velocidade limite da aramida e sua dispersão (FIG. 4.29) foram praticamente idênticas ao compósito P-30%C. Desta forma, neste ensaio, bem como no ensaio de deformação da plastilina, o desempenho do compósito P-30%C foi similar ao da aramida.

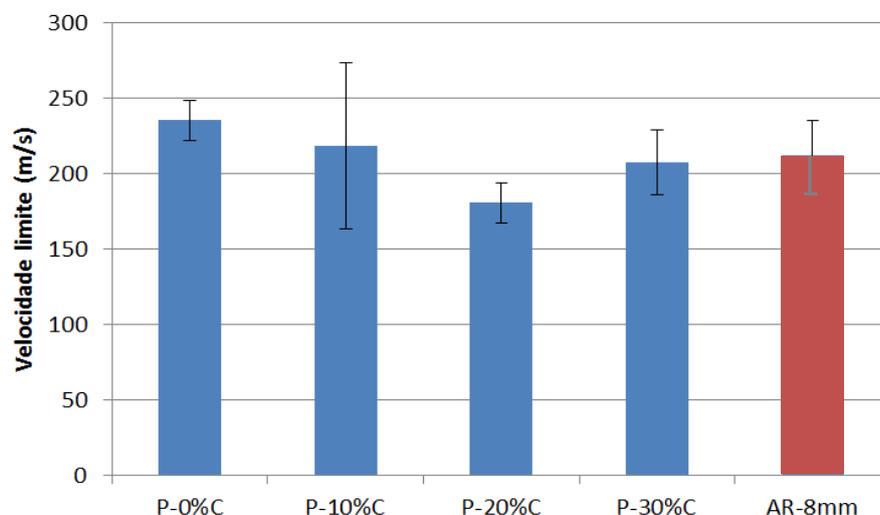


FIG. 4.29 Variação da velocidade limite com o percentual de Curauá e a comparação com a aramida.

4.6 INTERAÇÃO DAS ONDAS DE CHOQUE NAS BLINDAGENS MULTICAMADA

A interação das ondas de choque com os materiais da blindagem multicamada e suas interfaces foi analisada pelo método do casamento de impedâncias (seção 2.2.2), e utilizando as equações de conservação (EQ. 2.5, 2.6 e 2.7). Foram realizados os cálculos da impedância de choque, das velocidades de partícula e das pressões de interface dos SBMs utilizados neste trabalho.

A TAB. 4.19 apresenta a densidade (ρ), a velocidade da onda elástica (C_0) e a constante (S) da equação de estado de cada material (EQ. 2.10), parâmetros utilizados nos cálculos do casamento de impedâncias.

TAB. 4.19 Parâmetros utilizados no Casamento de Impedâncias.

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

Não foi possível obter da literatura os parâmetros para os compósitos poliéster-Curauá, e por este motivo, a velocidade da onda de choque (U_s) foi substituída pela velocidade da onda elástica (C_0), que pode ser calculada pela EQ. 2.4. O módulo de elasticidade do compósito (E_{cp}) foi calculado utilizando a EQ. 4.1.

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

Onde: E_m e E_f são os módulos de elasticidade da matriz e da fibra, respectivamente, e V_m e V_f representam as suas frações volumétricas no compósito.

A densidade dos compósitos (ρ_{cp}) foi obtida por expressão similar (EQ. 4.2):

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

Onde: ρ_m e ρ_f são as densidades da matriz e da fibra, respectivamente, e V_m e V_f representam as suas frações volumétricas no compósito.

Como o módulo de elasticidade das fibras naturais costuma variar por diversos fatores, especialmente pela variação do diâmetro das fibras (SIMONASSI *et al.*, 2012), e apresentar razoável dispersão, valores de limites mínimo e máximo foram considerados para as fibras de Curauá. O mesmo foi feito para a resina poliéster, cujas propriedades podem variar segundo o tipo e condições de processamento (CALLISTER & RETHWISCH, 2012; RATNA, 2009). A TAB. 4.20 mostra os valores mínimos e máximos de densidade (ρ), módulo de elasticidade (E), para as fibras, resina e compósito poliéster-Curauá, e de velocidade da onda elástica (C_0) para o compósito.

TAB. 4.20 Valores de densidade, módulo de elasticidade e velocidade da onda elástica das fibras, matriz e compósito poliéster-Curauá.

Material	$\rho_{\min.}$ (g/cm ³)	$\rho_{\max.}$ (g/cm ³)	$E_{\min.}$ (GPa)	$E_{\max.}$ (GPa)	$C_{0\min.}$ (km/s)	$C_{0\max.}$ (km/s)	Referência
Curauá	0,68	1,45	11,77	25,78	-	-	SIMONASSI <i>et al.</i> , 2012
P-0%C	1,04	1,46	2,06	4,41	1,41	1,74	CALLISTER & RETHWISCH, 2012
P-10%C	1,00	1,46	3,03	6,55	1,74	2,12	Calculado, PT ¹
P-20%C	0,97	1,46	4,00	8,68	2,03	2,44	Calculado, PT ¹
P-30%C	0,93	1,46	4,97	10,82	2,31	2,72	Calculado, PT ¹

¹ Presente trabalho.

Foi utilizada a velocidade de referência da norma NIJ-0101.06 (847 m/s) como velocidade de impacto do projétil na blindagem. A TAB. 4.21 mostra os resultados dos cálculos, que são as velocidades de partícula (U_p), as pressões de interfaces (P), as velocidades das ondas de choque (U_s), as impedâncias de choque dos materiais após a interface (Z) e a natureza das ondas de tensão.

TAB. 4.21 Resultados dos cálculos do casamento de impedâncias.

	Interface		U_p (km/s)	P (GPa)	U_s (km/s)	Z (10⁶ kg/m².s)	Natureza da onda de choque
1	Pb/Al ₂ O ₃		0,4203	13,082	8,001	31,124	Compressiva
2	Al ₂ O ₃ /(P-0%C)	Mín.	0,8005	1,174	1,410	1,466	Trativa
		Máx.	0,7737	1,965	1,740	2,540	
3	(P-0%C)/Al	Mín.	0,1434	2,137	5,520	14,904	Compressiva
		Máx.	0,2217	3,367	5,625	15,187	
4	Al ₂ O ₃ /(P-10%C)	Mín.	0,7934	1,381	1,740	1,740	Trativa
		Máx.	0,7606	2,354	2,120	3,095	
5	(P-10%C)/Al	Mín.	0,1651	2,474	5,549	14,982	Compressiva
		Máx.	0,2558	3,916	5,670	15,310	
6	Al ₂ O ₃ /(P-20%C)	Mín.	0,7877	1,551	2,030	1,969	Trativa
		Máx.	0,7499	2,672	2,440	3,562	
7	(P-20%C)/Al	Mín.	0,1823	2,743	5,572	15,044	Compressiva
		Máx.	0,2817	4,340	5,705	15,403	
8	Al ₂ O ₃ /(P-30%C)	Mín.	0,7832	1,683	2,310	2,148	Trativa
		Máx.	0,7409	2,942	2,720	3,971	
9	(P-30%C)/Al	Mín.	0,1952	2,946	5,589	15,091	Compressiva
		Máx.	0,3026	4,683	5,733	15,479	
10	Al ₂ O ₃ /Aramida		0,7347	3,129	2,958	4,259	Trativa
11	Aramida/Al		0,3799	5,987	5,836	15,758	Compressiva

Como mostra a TAB. 4.21, a valor de U_p e P da interface Pb-Al₂O₃, respectivamente 0,420 km/s e 13,08 GPa, são próximos dos valores 0,398 km/s e 14,58 GPa obtidos por Da Silva, 2014, adotando-se para a alumina o valor de C₀ no lugar de U_s. Isto confirma que na ausência de valores para U_s, C₀ pode ser uma boa estimativa para utilização nos cálculos do casamento de impedâncias, como é sugerido na literatura (MEYERS, 1994).

A cerâmica é um material com alta Z ($\sim 30 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$), o que significa que as ondas de choque se propagam rapidamente neste meio ($\sim 8 \text{ km/s}$) e altas pressões ($\sim 13 \text{ GPa}$) são geradas na interface com o projétil. É ela quem resiste à tensão dinâmica compressiva provocada pela chegada do projétil, desacelera-o ($\sim 840 \text{ m/s}$ até $\sim 420 \text{ m/s}$), e por sua alta dureza, deforma e erode a ponta do projétil, fazendo com que a pressão seja distribuída em uma maior área (SERJOUET *et al.*, 2015; TASDERMIRCI *et al.*, 2012). Em virtude da fragilidade da cerâmica, as cargas compressivas provocam trincas que formam um cone, que se abre a partir da interface com o projétil, evoluindo até a segunda camada (SHOKRIEH & JAVADPOUR, 2008).

Quando a onda compressiva chega à interface, parte do pulso é transmitida para a camada seguinte e parte refletida de volta (MEYERS, 1994; MONTEIRO *et al.*, 2015). Como já foi mencionado, a diferença de impedância entre a camada frontal e a intermediária é de grande importância nas blindagens multicamada. Se a impedância da segunda camada for menor que a da primeira, parte da onda retorna como trativa, provocando a completa fragmentação do material cerâmico (MEYERS, 1994; MONTEIRO *et al.*, 2015). Tasdermirci *et al.* (2012) mostraram que, quanto maior a diferença de Z entre estas camadas, menores são os fragmentos resultantes da fratura da cerâmica, e assim maior é a energia absorvida pela cerâmica na reflexão da onda de choque pela interface. Isto ocorre devido à maior amplitude do pulso trativo que retorna à alumina após a reflexão (MEYERS, 1994). No caso da aramida como segunda camada, por exemplo, a amplitude seria de cerca de 10 GPa, que é a diferença entre as pressões na aramida e na alumina.

Quando se compara a impedância de choque entre os materiais utilizados como camada intermediária, pouca diferença é observada. A aramida possui a maior Z ($4,259 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$), seguido pelo P-30%C ($2,148\text{-}3,971 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$), e assim segue diminuindo até a resina P-0%C ($1,466\text{-}2,540 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$). Esta diferença poderia ser insignificante para o ensaio balístico da multicamada, por se tratar de um ensaio complexo e que envolve diversos fenômenos dinâmicos como interações entre ondas, reflexões em superfícies livres, atenuações das ondas de choque e transformações de fase (MEYERS, 1994). Assim, era de se esperar que pouca diferença fosse observada no trauma medido em plastilina para as diferentes camadas intermediárias nos SBMs.

Ao final, o pulso restante chega à interface com o alumínio. A pressão alcançada nesta interface (3-6 GPa) é um pouco maior que na camada intermediária (1-3 GPa), devido à maior impedância de choque do alumínio ($15 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$). Desta forma, se toda a energia do projétil for dissipada no interior da blindagem, ela terá sido bem sucedida na proteção pessoal do combatente.

4.7 COMPARAÇÃO ENTRE AS BLINDAGENS MULTICAMADA

Nesta seção, será realizada uma comparação entre todos SBMs testados, levando-se em conta seu comportamento no ensaio balístico e outros fatores como peso e custo da blindagem.

Os SBM com fibras de Curauá dispostas bidirecionalmente ($0^\circ/90^\circ$), apesar de apresentarem bom desempenho balístico e estrutural, não foram acrescentados à comparação, em virtude da pequena quantidade de corpos de prova testados. No entanto, os resultados preliminares com esta configuração são promissores, e podem ser investigados posteriormente.

A FIG. 4.30 mostra o desempenho balístico dos SBMs. Observa-se que a profundidade do trauma não varia com a fração volumétrica de Curauá até os 30%. No entanto, a dispersão nos valores vai diminuindo com o aumento da porcentagem, tornando a blindagem com 30% de Curauá a mais confiável, o que foi evidenciado também pelo parâmetro β de Weibull ($\beta = 11,28$), que é o maior entre todos os SBMs deste trabalho. Além disto, o desempenho da aramida como camada intermediária é estatisticamente equivalente ao de fibras de Curauá, pois as faixas de valores de indentação se cruzam. Para ilustrar a similaridade de comportamento entre estes dois materiais, são mostradas na FIG. 4.31 as distribuições de probabilidade de Weibull das indentações, utilizando os parâmetros estatísticos das TAB. 4.7 e 4.15. Observa-se que as curvas são similares, sendo a distribuição da aramida deslocada ligeiramente para menores valores de indentação.

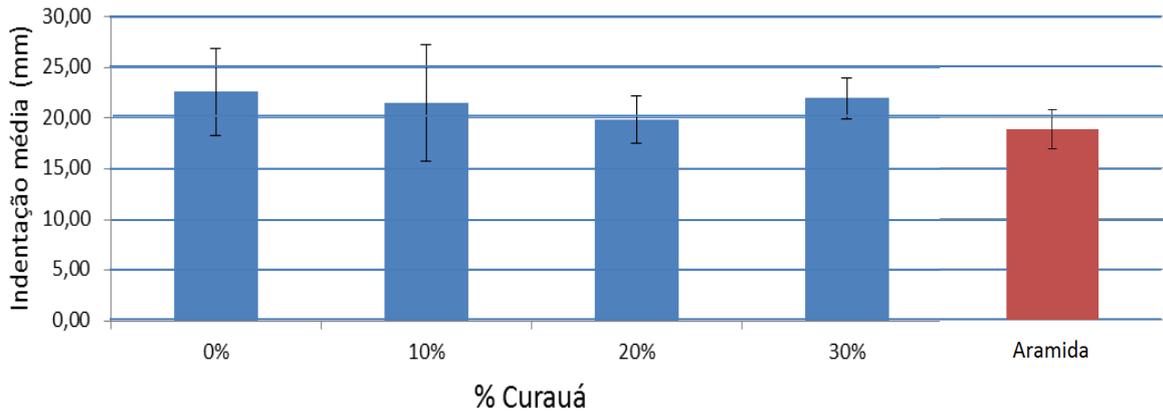


FIG. 4.30 Comparação entre as indentações médias em plastilina dos SBMs de fibra de Curauá e Aramida.

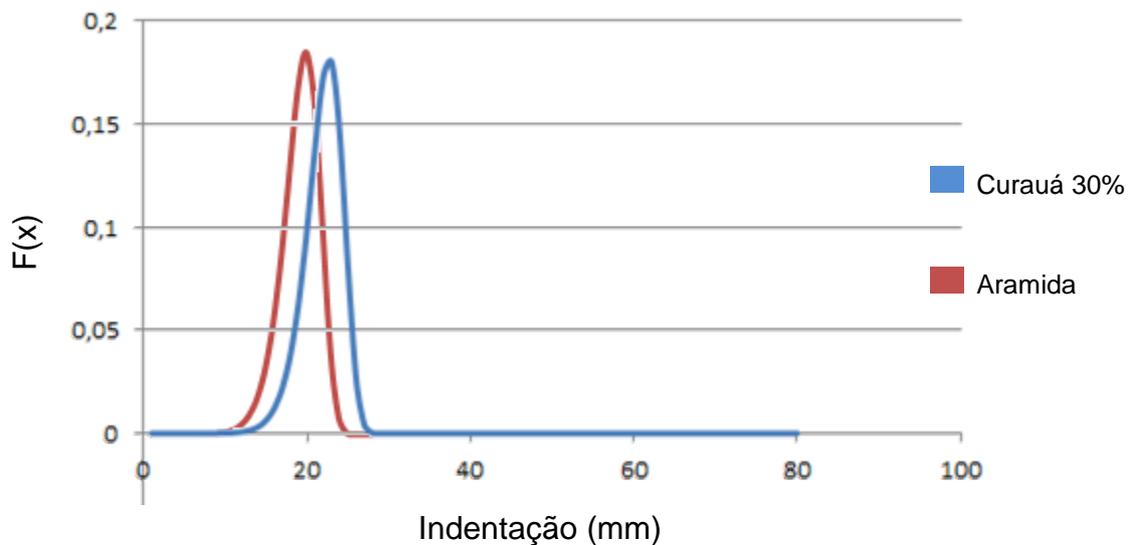


FIG. 4.31 Distribuição de probabilidades de trauma para SBMs com Curauá 30% e Aramida.

Outro fator de importância é a integridade da camada intermediária após o impacto balístico. Em uma aplicação prática, a camada intermediária seria totalmente recoberta de um mosaico de pastilhas cerâmicas hexagonais. No caso da perda da coesão da segunda camada, as pastilhas cerâmicas poderiam se desprender, deixando o combatente vulnerável a um segundo disparo. Os SBMs com camada de P-0%C, P-10%C e P-20%C apresentaram este comportamento. Os SBMs com P-30%C, P-30%C-B e aramida tiveram um comportamento mais

adequado, mantendo sua integridade após o impacto. É importante frisar que a proteção balística local é perdida após a fragmentação da pastilha cerâmica, e por isso é ainda mais importante que a blindagem seja leve, mantendo a mobilidade do combatente/veículo, e evitando que receba um segundo disparo em um mesmo local.

A TAB. 4.22 mostra um comparativo de peso e custo dos SBM deste trabalho com materiais para blindagem de nível III de diversos autores (DA CRUZ, 2015; DA LUZ, 2014; DEMIR *et al.*, 2008; MILANEZI, 2015; MONTEIRO *et al.*, 2015; ÜBEYLI *et al.*, 2007). No caso dos SBMs de fibras naturais somente foram considerados os de melhor resultado. São mostradas as espessuras (t_h) e densidades superficiais (ρ_{sup}) das blindagens. Como as placas de coletes balísticos são geralmente comercializadas em tamanhos padrão como 10 x 12", optou-se pelo cálculo do peso ($P_{10x12''}$) e custo ($Custo_{10x12''}$) destes produtos. Foram considerados somente os custos de material. Exemplos de blindagens monocomponente à base de ligas de aço (DEMIR *et al.*, 2008; ÜBEYLI *et al.*, 2007) e alumínio (DEMIR *et al.*, 2008) também foram acrescentados para comparação do peso.

Observa-se pela TAB. 4.22 que é pequena a variação de peso e custo entre os SBMs baseados em fibras naturais. O SBM com a segunda camada de fibras de bambu (DA CRUZ, 2015) é o que apresenta menor peso superficial ($\rho_{sup} = 56,5$), e o de tecido de rami (MILANEZI, 2015) o maior peso ($\rho_{sup} = 60,0$). A diferença de peso ficou mais evidente quando se compara os SBMs com as blindagens monocomponente. O peso de placas 10 x 12" de aço balístico ou alumínio (DEMIR *et al.*, 2008; ÜBEYLI *et al.*, 2007) que resistam a eventos balísticos de nível III (espessuras de 11,4 e 30,0 mm, respectivamente), é de aproximadamente de 6,5 kg, enquanto os SBMs apresentam uma média de 4,5 kg por peça, promovendo uma queda de 30% no peso da estrutura. Isto mostra a superioridade das placas multicamada sobre as blindagens monocomponente quando se deseja economia de peso.

Quando se trata do custo dos SBMs, os de segunda camada de poliéster ($Custo_{10x12''} = US\$ 94,16$) apresentaram pequena vantagem em relação aos outros SBMs de fibras naturais (US\$ 94,6). No entanto, todos estes apresentaram uma boa vantagem de custo sobre a aramida (US\$ 146,04), proporcionando economia de 36%.

TAB. 4.22 Relação de peso e custo de blindagens de nível III.

Blindagem multicamada					
Camada intermediária	t_h (mm)	ρ_{sup}¹ (kg/m²)	P_{10x12}² (kg)	Custo_{10x12}² (US\$)	Referência
P-30%C	25,0	57,9	4,48	94,16	MONTEIRO <i>et al.</i> , 2015; Calculado PT ²
Aramida	25,0	57,4	4,44	146,04	MONTEIRO <i>et al.</i> , 2015; Calculado PT ²
Epóxi-30%Curauá	25,0	58,1	4,50	94,64	MONTEIRO <i>et al.</i> , 2015; Calculado PT ²
Epóxi-30%Bambu	25,0	56,5	4,37	94,65	DA CRUZ, 2015; Calculado PT ²
Epóxi-30%Tecido de Rami	25,0	60,0	4,64	-	MILANEZI, 2015; Calculado PT ²
Epóxi-30%Manta de Juta	25,0	58,24	4,51	94,62	DA LUZ, 2014; Calculado PT ²
Epóxi-30%Tecido de Sisal	25,0	58,00	4,49	94,65	DE ARAÚJO, 2015; Calculado PT ²
Blindagem monocomponente					
Material	t (mm)	ρ_{sup} (kg/m²)	P_{10x12}² (kg)	Custo_{10x12}² (US\$)	Referência
Aço 50Cr4V4	11,4	89,0	6,89	-	ÜBEYLI <i>et al.</i> , 2007
Aço 4140	12,7	100,0	7,74	-	DEMIR <i>et al.</i> , 2008
Al 7075 T7351	30,0	85,0	6,58	-	DEMIR <i>et al.</i> , 2008

¹ Os valores de densidade da cerâmica e da liga alumínio utilizados foram os do presente trabalho, respectivamente 3300 e 2660 kg/m³, exceto no caso do rami, cuja ρ_{sup} foi obtida diretamente de MILANEZI, 2015.

² Os preços/kg da resina epoxídica, da cerâmica e da liga de alumínio foram obtidos de MONTEIRO *et al.* (2015). O preço/kg do poliéster insaturado foi de US\$ 2,00, valor recebido de fornecedores.

³ Presente trabalho.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho, foram realizados ensaios para avaliação do comportamento balístico de diferentes SBMs quando submetidos ao impacto de projéteis de calibre 7,62 mm (nível III). Foram utilizadas as seguintes configurações: Cerâmica à base de $Al_2O_3+4\%Nb_2O_5$ como camada frontal, tecido de aramida ou compósitos de matriz poliéster reforçados com 0, 10, 20 e 30% de fibras de Curauá como camada intermediária, e liga de alumínio 5052 H34 como camada posterior. A seguir são apresentadas as conclusões do presente trabalho.

1. Todos os SBMs testados neste trabalho obedeceram ao requisito da norma NIJ-0101.06 (2008) de resistir à penetração do projétil e imprimir indentação menor que 44 mm no material de referência (plastilina).
2. Os compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de Curauá se mostraram como boa alternativa ao tecido de aramida como camada intermediária em SBMs. A adição de até 30%vol. de fibras de Curauá na matriz poliéster não alterou significativamente a magnitude do trauma registrado no material de referência, no entanto, proporcionou uma melhora visível da coesão da camada intermediária após o impacto balístico, afetando positivamente a confiabilidade da blindagem.
3. Em concordância com MONTEIRO *et al.* (2014), observou-se que a contribuição da camada intermediária no comportamento geral da blindagem depende em grande parte da captura de fragmentos da cerâmica depositados na superfície das fibras e da matriz, que incluem incrustações e pequenos fragmentos retidos por forças de Van der Waals e/ou eletrostáticas. Outras formas de dissipação de energia são os associados com a falha do compósito.
3. Observa-se uma mudança progressiva no modo de falha dos compósitos de Curauá com o aumento do teor de fibras, de fratura puramente frágil da matriz, na camada de resina pura (P-0%C), para um tipo mais complexo, que envolve descolamento e fratura das fibras, fratura da matriz e delaminação das camadas de fibras. Atribui-se à mudança do modo de falha a melhoria da coesão do compósito com o aumento do teor de fibras.

4. O cálculo das impedâncias de choque e pressões de interface deixou mais claro a importância da camada intermediária nos SBMs. Para que a cerâmica possa executar com eficiência sua função de resistir à pressão da chegada do projétil, fragmentar sua ponta e absorver grande parte da energia, é importante que a impedância de choque da segunda camada seja tanto menor quanto possível em relação à camada cerâmica. Dos materiais testados, todos apresentaram impedância calculada próxima, variando de $4,259 \times 10^6$ kg/m².s para a aramida até $1,466-2,540 \times 10^6$ kg/m².s para o P-0%C. Assim, era esperado que a magnitude do trauma em plastilina não tivesse variação significativa nos SBMs testados.
5. De todas as composições testadas, considera-se o compósito reforçado com 30% de fibras de Curauá o de melhor desempenho balístico, quando utilizado como camada intermediária em blindagens multicamada. A análise considerou a indentação em plastilina 22 ± 2 mm, que é estatisticamente equivalente às das outras composições (também da aramida), o parâmetro de Weibull ($\beta = 11,28$), que indica uma blindagem de alta confiabilidade (a maior do presente trabalho), a integridade da camada após o impacto balístico e o desempenho individual do compósito ($V_L = 207 \pm 21$ m/s), que é equivalente ao da aramida ($V_L = 212 \pm 23$ m/s);
6. Entre os SBMs baseados em fibras naturais, a densidade superficial foi aproximadamente constante, variando de $56,5$ kg/m² para o SBM com fibras de bambu (DA CRUZ, 2015), até $60,0$ kg/m² para os de fibra de rami (MILANEZI, 2015). A diferença de peso ficou mais evidente quando se compara os SBMs com as blindagens monocomponente, sendo os SBMs 30% mais leves. Tratando-se de custo, os SBMs baseados em fibras naturais apresentam vantagem em relação aos de aramida, apresentando 36% de economia.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar outras frações de Curauá no compósito (40%, 50%), e definir a porcentagem máxima segura, acima da qual se observa aumento do trauma e/ou perda da coesão do compósito após o impacto balístico do SBM;
- Investigar o comportamento balístico de um SBM que utilize tecido de fibras de Curauá, no lugar das fibras alinhadas;
- Desenvolver protótipo de placa e colete balístico de baixo custo, baseados em Compósitos Reforçados com FNL;
- Testar os compósitos reforçados com fibras de Curauá para proteção balística de outros níveis, como o IIIA.
- Medir os valores das propriedades dinâmicas dos materiais da blindagem, bem como formular a equação de estado dos compósitos, para que o modelamento pelo casamento de impedâncias seja mais preciso, e possa contribuir de forma mais contundente para a interpretação dos fenômenos envolvidos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABERNETHY, R.B.; BRENNEMAN, J.E.; MEDLIN, C.H.; REINMAN, G.L. Weibull Analysis Handbook. Disponível em: <www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a143100.pdf>. 1983.

ABIDIN, M.H.Z.; MOHAMAD, M.A.H.; ZAIDI, A.M.A.; MAT, W.A.W. Experimental Study on Ballistic Resistance of Sandwich Panel Protection Structure with Kenaf Foam as a Core Material against Small Arm Bullet. Applied Mechanics and Materials, Vol. 315, p. 612-615. 2013.

ALI, A.; SHAKER, Z.R.; KHALINA, A.; SAPUAN, S.M. Development of Anti-Ballistic Board from Ramie Fiber. Polymer-Plastics Technology and Engineering, Vol. 50, p. 622-634. 2011.

ANGRIZANI, C.C.; CIOFFI, M.O.H.; ZATTERA, A.J.; AMICO, S.C. Analysis of Curauá/Glass Hybrid Interlayer Laminates. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 33, nº 5, p. 472–478. 2014.

ALVES, A.L.S.; NASCIMENTO, L.F.C.; SUAREZ, J.C.M. Comportamento Balístico de Compósito de Polietileno de Altíssimo Peso Molecular: Efeito da Radiação Gama. Polímeros: Ciência e Tecnologia, Vol. 14, nº 2, p. 105-111. 2004.

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

ASM Aerospace Specification Metals Inc. Aluminum 5052 H34. Disponível em: <<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA5052H34>>. Acesso em: 8 jun. 2015.

ASTM International Designation: E8/E8M – 13a. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. 2013.

ASTM International Designation: E18 – 15. Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. 2015.

BLEDZKI, A.K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibers. Progress in Polymer Science, Vol. 24, p. 221-274. 1999.

BRASIL. Decreto-lei nº 3665 da Presidência da República, de 20 de Novembro de 2000. Dá nova redação ao Regulamento para a Fiscalização de Produtos Controlados (R-105). Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d3665.htm>. Acesso em: 08 fev. 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 jan. 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.

CARASCHI, J. C.; LEÃO, A. L. Characterization of Curaua Fibre. Molecular Crystals and Liquid Crystals, Vol. 353, p. 149–152. 2001.

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.

CHEESEMAN, B.A.; BOGETTI, T.A. Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates. Composite Structures, Vol. 61, p. 161-173. 2003.

- D'ALMEIDA, J.R.M.; NUNES, L.M.; PACIORNIK, S. Evaluation of the damaged area of glass-fiber-reinforced epoxy-matrix composite materials submitted to ballistic impacts. *Composites Science and Technology*, Vol. 64, p. 945–954, 2004.
- 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, H.S.P. Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras de Curauá e Híbridos com Fibras de Vidro. Dissertação de Mestrado do Curso de Engenharia da UFRGS. 2010.
- 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.
- DE ARAÚJO, B.M. Avaliação do Comportamento Balístico de Blindagem Multicamada com Compósito de Epóxi Reforçado com Fibra de Sisal. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2015.
- DEMIR, T.; ÜBEYLI, M.; YILDIRIM, R.O. Investigation on the Ballistic Impact Behavior of Various Alloys against 7.62 mm Armor Piercing Projectile. *Materials and Design*, Vol. 29, p. 2009-2016. 2008.

- DE MOURA, M.F.S.F.; MORAIS, A.B.; MAGALHÃES, A.G. Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico. 2ª ed. Porto: Publindústria Edições Técnicas. 2011.
- DE OLIVEIRA, F.H.; HELFER, A.L.; AMICO, S.C. Mechanical Behavior of Unidirectional Curaua Fiber and Glass Fiber Composites. Macromolecular Symposium, Vol. 319, p. 83-92. 2012.
- DeLUCA, E.; PRIFTI, J. BETHENEY, W.; CHOU, S.C. Ballistic impact damage of S 2-glass-reinforced plastic structural armor. Composites Science and Technology, Vol. 58, nº 9, p. 1453-1461. 1998.
- DOS SANTOS, J.L. Simulação de Ensaio Balístico DOP. Multicamada. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2012. p.28-29.
- FARUK, O.; BLEDZKI, A.K.; FINK, H. SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. Progress in Polymer Science, nº 37, p.1552-1596. 2012.
- FARUK, P.; BLEDZKI, A.K.; FINK, H.; SAIN, M. Progress Report on Natural Fiber Reinforced Composites. Macromolecular Materials Engineering, Vol. 299, n.1, p. 9-26. 2014.
- GEHLEN, L.R. Efeito da Utilização de Fibras Lignocelulósicas (Açaí E Curauá) em Compósitos com Matriz de Resina Poliéster Insaturado. Dissertação de Mestrado do Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade Federal do Paraná. 2014.
- GOMES, A.V. Comportamento Balístico da Alumina com Adição de Nióbia e Variação da Geometria do Alvo. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2004.
- JOHN, M.J.; THOMAS, S. Biofibres and Biocomposites. Carbohydrate Polymers, Vol. 71, p. 343-364. 2008.

- KALIA, S.; KAITH, B.S.; KAUR, I. (Eds.). Cellulose Fibers: Bio- and Nano- Polymer Composites. 1a ed. New York: Springer. 2011.
- KANEL, G.I. Behavior of Brittle Materials Under Dynamic Loading. Austin: Institute for Advanced Technology, 2000.
- KLEISER, G.J.; CHHABILDAS, L.C.; REINHART, W.D. Comparison of Dynamic Compression Behavior of Single Crystal Sapphire to Polycrystalline Alumina. International Journal of Impact Engineering, Vol. 38, p. 473-479. 2011.
- LEE, S.-W. R.; SUN, C.T. Dynamic Penetration of Graphite/Epoxy Laminates Impacted by a Blunt-ended Projectile. Composites Science and Technology, Vol. 49, p. 369-380. 1993.
- MACIEL, F.B. Governança na Cadeia Produtiva do Curauá no Oeste Paraense Sob a Perspectiva do Monopsônio. Dissertação de Mestrado do Curso de Desenvolvimento Regional da Universidade Federal do Amazonas. 2010.
- MARSYAHYO, E.; JAMASRI; ROCHARDJO, H.S.B.; SOEKRISNO. Preliminary Investigation on Bulletproof Panels Made from Ramie Fiber Reinforced Composites for NIJ Level II, IIA, and IV. Journal of Industrial Textiles, Vol. 39, p. 13-26, 2009.
- MEDVEDOVSKI, E. Lightweight Ceramic Composite Armour System. Advances in Applied Ceramics, Vol. 105, n.5, p. 241-245. 2006.
- MEDVEDOVSKI, E. Ballistic Performance of Armour Ceramics: Influence of Design and Structure. Part 1. Ceramics International. Vol. 36, p. 2103-2115. 2010.
- MEYERS, M.A. Dynamic behavior of materials. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- MILANEZI, T.L. Avaliação do Comportamento Balístico Sinérgico de Blindagem Multicamadas com a Fibra de Rami. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2015

- MOBASSERI, A.A.; ANSARI, A.R.; ZAREI, H.R.; SEDIGHI, M.; MOBASSERI, F. Optimization of Combined Layers Produced by the Ceramic/Composite and Ceramic/Aluminum Plates. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 7, n.6, p. 199-210. 2013.
- MOHANTY, A.K.; MISRA, M.; DRZAL, L.T. Sustainable Bio-Composites from Renewable Resources: Opportunities and Challenges in the Green Materials World. *Journal of Polymers and the Environment*, Vol. 10, n° 1/2, p. 19-26. 2002.
- MONTEIRO, S.N.; 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.; LOPES, F.P.D.; NASCIMENTO, D.C.O., FERREIRA, A.S.; SATYANARAYANA, K.G. Processing and Properties of Continuous and Aligned Curaua Fibers Incorporated Polyester Composites. *Journal of Materials Research and Technology*. Vol. 2, n° 1, p. 2-9. 2013.
- MONTEIRO, S.N.; LIMA JR., E.P.; LOURO, L.H.L.; DA SILVA, L.C.; DRELICH, J.W. Unlocking Function of Aramid Fibers in Multilayered Ballistic Armor. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 46A, p. 37-40. 2014.
- MONTEIRO, S.N.; LOURO, L.H.L.; TRINDADE, W.; ELIAS, C.N.; FERREIRA, C.L.; LIMA, E.S.; WEBER, R.P.; SUAREZ, J.C.M.; FIGUEIREDO, A.B.S.; PINHEIRO, W.A.; DA SILVA, L.C.; LIMA JR., E.P. Natural Curaua Fiber-Reinforced Composites in Multilayered Ballistic Armor. *Metallurgical and Materials Transactions A (On-line)*. Disponível em: <[http://link.springer.com /article/10.1007%2Fs11661-015-3032-z](http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11661-015-3032-z)>. 2015.

- MORYE, S.S.; HINE, P.J.; DUCKETT, R.A.; CARR, D.J.; WARD, I.M. Modelling of the Energy Absorption by Polymer Composites Upon Ballistic Impact. *Composites Science and Technology*, Vol. 60, p. 2631-2642. 2000.
- NAIK, N.K.; SHRIRAO, P. Composite structures under ballistic impact. *Composite Structures*, Vol. 66. p. 579-590. 2004.
- NIJ Standards-0101.06.Ballistic Resistance of Body Armor.U.S. Department of Justice/Office of Justice Programs - National Institute of Justice. 2008.
- O'CONNOR, P.D.T.; KLEYNER, A. *Practical Reliability Engineering*. 5^a ed. Chinchester: John Wiley & Sons. 2012.
- RADIF, Z.S.; ALI, A.; ABDAN, K. Development of a Green Combat Armour from Rame-Kevlar-Polyester Composite. *Pertanika Journal of Science and Technology*, Vol. 19, nº 2, p. 339-348. 2011.
- RATNA, D. *Handbook of Thermoset Resins*. 1^a ed. Shawbury: Smithers Rapra. 2009.
- REED-HILL, R.E. *Physical Metallurgy Principles*. 2^a ed. New York: D. Van Nostrand Company. 1973.
- SATYANARAYANA, K.G.; ARIZAGA, G.G.C.; WYPYCH, F. Biodegradable Composites Based on Lignocellulosic Fibers – An Overview. *Progress in Polymer Science*, Vol. 34, p. 982-1021. 2009.
- SENA, J.C.A. *O Cultivo do Curauá como Oportunidade para o Pequeno Produtor Rural*. Santarém: Emater – PA, 2006.
- SERJOUEI, A.; CHI, R.; ZHANG, Z.; SRIDHAR, I. Experimental Validation of BLV Model on Bi-Layer Ceramic-Metal Armor. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 77, p. 30-41. 2015.

- SHOKRIEH, M.M.; JAVADPOUR, G.H. Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor. *Composite Structures*, Vol. 82, p. 269–276. 2008
- SIMONASSI, N.T.; LOIOLA, R.L.; CARREIRO, R.S.; MARGEM, F.M.; MONTEIRO, S.N. Weibull Analysis of the Density and Elastic Modulus of Curaua Fibers with Different Diameters. In: 67th ABM International Congress. Rio de Janeiro, 2012.
- SPINACÉ, M.A.S.; LAMBERT, C.S.; FERMOSELLI, K.K.G.; DE PAOLI, M.A. Characterization of Lignocellulosic Curaua Fibres. *Carbohydrate Polymers*, Vol. 77, p. 47-53. 2009.
- TABIEI, A.; NILAKANTAN, G. Ballistic Impact of Dry Woven Fabric Composites: A Review. *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 61, nº 010802, p. 1-13. 2008.
- TASDERMIRCI, A.; TUNUSOGLU, M.; GÜDEN, M. The Effect of the Interlayer on the Ballistic Performance of Ceramic/Composite Armors: Experimental and Numerical Study. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 44, p. 1-9. 2012.
- 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.
- The Curaua Challenge: Optimizing Natural Fibres. *Plastics, Additives and Compounding*, Vol. 11, nº 5, p. 12-17. 2009.
- TOMCZAK, F.; SATYANARAYANA, K.G.; SYDENSTRICKER, T.H.D. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil: Part III – Morphology and Properties of Brazilian Curauá Fibers. *Composites: Part A*, Vol. 38, p. 2227-2236. 2007.
- 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.
- ÜBEYLI, M.; YILDIRIM, R.O.; ÖGEL, B. On the Comparison of the Ballistic Performance of Steel and Laminated Composite Armors. *Materials and Design*, Vol. 28, p. 1257-1262. 2007.
- ULVEN, C.; VAIDYA, U.K.; HOSUR, M.V. Effect of projectile shape during ballistic perforation of VARTM carbon/epoxy composite panels. *Composite Structures*, Vol. 61, p.143–150. 2003.
- WAISELFISZ, J.J. *Mortes Matadas por Armas de Fogo: Mapa da Violência 2015*. Brasília: Unesco. 2015
- WAMBUA, P.; VANGRIMDE, B.; LOMOV, S.; VERPOEST, I. The Response of Natural Fibre Composites to Ballistic Impact by Fragment Simulating Projectiles. *Composite Structures*, Vol. 77, p. 232–240. 2007.
- WANG, L.; KANESALINGAM, S.; NAYAK, R.; PADHYE, R. Recent trends in Ballistic Protection. *Textiles and Light Industrial Science and Technology (TLIST)*, Vol. 3. p. 37-47. 2014.
- WILKINS, M.L. Mechanics of Penetration and Perforation. *International Journal of Engineering Sciences*, Vol. 16, n. 11, p. 793-807. 1978.
- WOOD, L.A.; BEKKEDAHL, N.; ROTH, F.L. Measurement of Densities of Synthetic Rubbers. *Journal of the National Bureau of Standards*, Vol. 29, p. 391-396. 1942.
- YADAV, S.; RAVICHANDRAN, G. Penetration Resistance of Laminated Ceramic/Polymer Structures. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28, p. 557–574. 2003.

ZEL'DOVICH, Y.B. Theory of Shock Waves and Introduction to Gas Dynamics. Springfield: Clearinghouse for Federal Scientific & Technical Information, 1967.

ZUKAS, J.A. Impact Dynamics: Theory and Experiment. Maryland: US Army Armament Research and Development Command – Ballistic Research Laboratory, 1980.