

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

FÁBIO DE OLIVEIRA BRAGA

CONFIGURAÇÃO OTIMIZADA DE BLINDAGEM BALÍSTICA  
MULTICAMADA COM CERÂMICA FRONTAL E COMPÓSITOS DE  
ARAMIDA OU TECIDO DE CURAUÁ

Rio de Janeiro

2018

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**FÁBIO DE OLIVEIRA BRAGA**

**CONFIGURAÇÃO OTIMIZADA DE BLINDAGEM BALÍSTICA MULTICAMADA  
COM CERÂMICA FRONTAL E COMPÓSITOS DE ARAMIDA OU TECIDO DE  
CURAUÁ**

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

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

Rio de Janeiro

2018

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

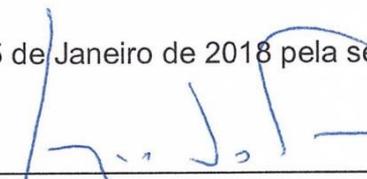
**FÁBIO DE OLIVEIRA BRAGA**

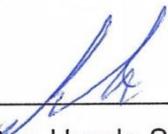
**CONFIGURAÇÃO OTIMIZADA DE BLINDAGEM BALÍSTICA  
MULTICAMADA COM CERÂMICA FRONTAL E COMPÓSITOS DE  
ARAMIDA OU TECIDO DE CURAUÁ**

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

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

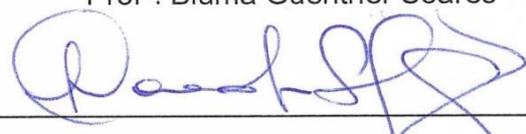
Aprovada em 25 de Janeiro de 2018 pela seguinte Banca Examinadora:

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

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

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Lucio Fábio Cassiano Nascimento – D.C. do IME

  
\_\_\_\_\_  
Profª. Bluma Guenther Soares – D.C. da UFRJ

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Leonardo Sales Araujo – D.C. da UFRJ

Rio de Janeiro

2018

c2018

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, microfilmar 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).

623.51	Braga, Fábio de Oliveira
B813c	Configuração otimizada de uma blindagem balística multicamada com cerâmica frontal e compósitos de aramida ou tecido de curauá / Fábio de Oliveira Braga; orientada por Sérgio Neves Monteiro – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2018.  166p.: il.  Tese (Doutorado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018.  1. Curso de Ciência dos Materiais – teses e dissertações. 2. Balística. 3. Blindagem. 4. Compósito. I. Monteiro, Sergio Neves. II. Instituto Militar de Engenharia.

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	9	
LISTA DE TABELAS.....	15	
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	18	
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>24</b>
1.1	Objetivo do estudo.....	28
1.2	Justificativa do tema.....	29
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>31</b>
2.1	Blindagens balísticas.....	31
2.2	Efeito do peso dos materiais na mobilidade do combatente.....	33
2.3	Alternativas para aumento da mobilidade do combatente.....	37
2.3.1	Otimização da área coberta pela blindagem.....	37
2.3.2	Redistribuição da carga.....	38
2.3.3	Seleção dos materiais empregados.....	40
2.4	Comportamento dinâmico dos materiais.....	42
2.5	Materiais para blindagens multicamada.....	46
2.5.1	Materiais cerâmicos.....	46
2.5.2	Materiais poliméricos e compósitos.....	47
2.5.3	Matrizes epoxídicas.....	48
2.5.4	Fibras naturais lignocelulósicas.....	51
2.5.5	Fibras e tecido de curauá.....	56
2.5.6	Aramida.....	58
2.5.7	Materiais metálicos.....	59
2.6	Metodologias de otimização de sistemas.....	59
2.6.1	Análise de uma variável por vez (univariada).....	59

2.6.2	Análise multivariada.....	60
2.6.2.1	Experimentos fatoriais completos.....	61
2.6.2.2	Delineamento composto central rotacional (DCCR).....	63
2.6.2.3	Delineamento de Box-Behnken (DBB).....	64
2.6.2.4	Regressão múltipla e metodologia de superfície de respostas (MSR).....	67
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>71</b>
3.1	Materiais utilizados.....	71
3.1.1	Tecido de curauá.....	71
3.1.2	Resina epoxídica.....	71
3.1.3	Cerâmica (alumina e nióbia).....	72
3.1.4	Tecido de aramida.....	73
3.1.5	Liga de alumínio.....	74
3.2	Métodos de fabricação.....	75
3.2.1	Fabricação das pastilhas cerâmicas.....	75
3.2.1.1	Obtenção do pó.....	75
3.2.1.2	Prensagem do pó.....	76
3.2.1.3	Sinterização das peças cerâmicas.....	77
3.2.2	Fabricação dos compósitos.....	78
3.2.3	Fabricação das placas balísticas multicamada.....	80
3.3	Métodos de caracterização.....	82
3.3.1	Medida da espessura, densidade volumétrica e superficial das camadas.....	82
3.3.2	Ensaio de tração.....	83
3.3.3	Ensaio de impacto.....	84
3.3.4	Ensaio de dureza.....	86
3.3.5	Análise termogravimétrica (TG/DTG).....	87
3.3.6	Microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS).....	87
3.3.7	Ensaio balístico.....	88

3.3.8	Método estatístico de Weibull.....	90
3.3.9	Delineamento de Box-Behnken e MSR.....	91
3.3.10	Otimização experimental linear.....	91
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>92</b>
4.1	Comparação entre configurações 1: Laminado de único material <i>versus</i> blindagem multicamada.....	93
4.2	Ensaio preliminares para verificar a viabilidade do uso de tecido de curauá em SBM.....	101
4.3	Caracterização das matérias-primas.....	104
4.3.1	Caracterização do tecido de curauá e do compósito de matriz epoxídica.....	104
4.3.1.1	Características físicas.....	104
4.3.1.2	Estabilidade térmica.....	107
4.3.1.3	Comportamento mecânico em tração.....	109
4.3.1.4	Comportamento mecânico sob impacto.....	112
4.3.1.5	Densidade dos compósitos.....	115
4.3.2	Caracterização da cerâmica.....	116
4.3.3	Caracterização da liga de alumínio.....	118
4.4	Superfícies de resposta e obtenção do modelo de regressão múltipla	119
4.5	Avaliação do modelo de regressão múltipla.....	123
4.6	Comparação entre as blindagens testadas.....	126
4.7	Otimização de espessuras.....	129
4.8	Otimização linear.....	131
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>133</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>135</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>136</b>

<b>8</b>	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>150</b>
8.1	APÊNDICE 1 – VALORES MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE E CALCULADOS PARA A SEÇÃO 4.1.....	151
8.2	APÊNDICE 2 – ASPECTO GERAL DOS SBMS APÓS O ENSAIO BALÍSTICO.....	153

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 2.1	Trauma promovido pelo projétil, medido pela deformação no bloco de plastilina. Fonte: Adaptado de NIJ-0101.06, 2008.....	32
FIG. 2.2	Alguns modelos de coletes balísticos flexíveis militares: (a) IOTV; (b) PC. Fonte: Adaptado de LOVERRO <i>et al.</i> , 2015.....	35
FIG. 2.3	Configurações de carga do soldado: (a) IOTV com capacete e arma; (b) IOTV com cinto, capacete e arma; (c) PC com capacete e arma; (d) PC com cinto, capacete e arma. Fonte: Adaptado de LOVERRO <i>et al.</i> , 2015.....	35
FIG. 2.4	Métodos de transporte de carga. Fonte: Adaptado de KNAPIK <i>et al.</i> , 2004.....	39
FIG. 2.5	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 SILVA <i>et al.</i> , 2014.....	41
FIG. 2.6	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.....	44
FIG. 2.7	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.....	45
FIG. 2.8	Estruturas químicas das resinas dis e multifuncionais. Fonte: Adaptado de RATNA, 2009.....	49
FIG. 2.9	Microestrutura de uma FNL. Fonte: Adaptado de KALIA <i>et al.</i> , 2011.....	52
FIG. 2.10	Estrutura química da celulose. Fonte: Adaptado de MOHANTY <i>et al.</i> , 2002.....	53
FIG. 2.11	Estrutura química da Lignina. Fonte: Adaptado de MOHANTY <i>et al.</i> , 2002.....	53
FIG. 2.12	Curauá: (a) Planta <i>Ananas erectifolius</i> ; (b) fibras prontas para uso;	

	(c) fibra individual com suas microfibrilas, após fratura em tração. Fonte: Adaptado de <i>The Curaua Challenge</i> , 2009 e MONTEIRO <i>et al.</i> , 2013.....	56
FIG. 2.13	Visor automotivo fabricado em Nylon 6 reforçado com 20% de curauá. Fonte: Adaptado de <i>The Curaua Challenge</i> , 2009.....	57
FIG. 2.14	Impacto do projétil em uma única fibra. Fonte: Adaptado de CHEESEMAN & BOGETTI, 2003.....	58
FIG. 2.15	Espaço experimental de um estudo utilizando o planejamento fatorial completo para otimização de (a) duas variáveis e (b) três variáveis. Fonte: BEZERRA <i>et al.</i> , 2008.....	59
FIG. 2.16	Espaço experimental de um estudo utilizando o delineamento composto central rotacional para otimização de (a) duas variáveis e (b) três variáveis. Fonte: BEZERRA <i>et al.</i> , 2008.....	64
FIG. 2.17	Espaço experimental de um estudo utilizando o delineamento de Box-Behnken para otimização de três variáveis. Fonte: BEZERRA <i>et al.</i> , 2008.....	65
FIG. 2.18	Exemplos de curvas de superfície de resposta gerados a partir de um modelo quadrático da otimização de duas variáveis: (a) máximo; (b) platô; (c) máximo fora da região experimental; (d) mínimo; (e) superfície contendo ponto de sela. Fonte: BEZERRA <i>et al.</i> , 2008.....	68
FIG. 3.1	Aspecto geral do tecido de curauá.....	71
FIG. 3.2	Aspecto geral do tecido de aramida.....	73
FIG. 3.3	Moinho de bolas MARCONI MA500.....	75
FIG. 3.4	Matriz utilizada na moldagem dos corpos cerâmicos. (a) Peças individuais; (b) Conjunto montado, pronto para receber a carga.....	76
FIG. 3.5	Prensa hidráulica semiautomática Nowak, com capacidade para 30 toneladas.....	76
FIG. 3.6	Forno INTI FE 1700, utilizado na sinterização das pastilhas cerâmicas.....	77
FIG. 3.7	Etapas da fabricação dos compósitos: (a) lubrificação da matriz; (b) posicionamento do tecido; (c) vazamento da resina; (d) prensagem.	79

FIG. 3.8	Placa de compósito epóxi-curauá produzida por prensagem uniaxial.....	79
FIG. 3.9	Blindagem multicamada: (a) Diagrama esquemático: A é a camada cerâmica, B é o compósito ou aramida, C é o alumínio; (b) corpo de prova final utilizado nos ensaios balísticos.....	80
FIG. 3.10	Figuras esquemáticas de placas de blindagem multicamada com mosaico cerâmico: (a) placa rígida de colete; (b) interior da carcaça de aço de um carro de combate; (c) descrição das camadas. Fonte: Adaptado de CERAMTECH ETEC GMBH, 2010.....	81
FIG. 3.11	Dispositivo especial para medição da massa imersa da cerâmica através do princípio de Arquimedes.....	83
FIG. 3.12	Ensaio de tração: equipamento para realização dos ensaios modelo DL10000 EMIC; (b) Corpo-de-prova segundo a ASTM D638 (dimensões em mm).....	84
FIG. 3.13	Ensaio de impacto: (a) Equipamento ensaios Charoy/Izod modelo CH/IZ-25 da Pantec; (b) Corpo-de-prova segundo a ASTM D256.....	85
FIG. 3.14	Orientação do entalhe em relação ao plano do tecido no compósito.....	86
FIG. 3.15	Durômetro Rockwell Pantec RBSM.....	86
FIG. 3.16	Microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta FEG 250.....	87
FIG. 3.17	Medida do trauma (indentação) no material de referência (plastilina).....	88
FIG. 3.18	Munição calibre 7,62 mm M1.....	89
FIG. 3.19	Ensaio balístico: (a) Proвете calibre 7.62 mm com mira laser; (b) Diagrama esquemático relativo ao arranjo experimental. Adaptado de Monteiro et al., 2014.....	89
FIG. 4.1	Laminado de aramida montado em suporte para o ensaio balístico. Os adesivos na sua superfície indicam os pontos a serem atingidos pelos disparos.....	93
FIG. 4.2	Velocidade residual do projétil após impacto com os alvos de aramida, em função da espessura dos laminados.....	94
FIG. 4.3	Percentual de energia absorvida pelos alvos de aramida, em	

	função da espessura dos laminados.....	96
FIG. 4.4	Imagens macroscópicas de um laminado de aramida de 8 mm (16 camadas) após o impacto com o projétil 7,62 mm; (a) região de entrada do projétil e (b) região de saída.....	97
FIG. 4.5	Imagens macroscópicas de um laminado de aramida de 25 mm (48 camadas) após o impacto com o projétil 7,62 mm; (a) região de entrada do projétil; (b) região de saída e (c) detalhe da delaminação.....	97
FIG. 4.6	Imagens macroscópicas de um laminado de aramida de 37,5 mm (72 camadas) após o impacto com o projétil 7,62 mm; (a) região de entrada do projétil; (b) região de saída e (c) detalhe da delaminação.....	98
FIG. 4.7	Imagens macroscópicas de um laminado de aramida de 50 mm (96 camadas) após o impacto com o projétil 7,62 mm; (a) aspecto geral da face posterior; (b) delaminação ao longo da espessura; (c) detalhe do projétil capturado.....	99
FIG. 4.8	Detalhe da munição 7,62 mm; (a) antes do disparo, ainda com o cartucho; (b) após a captura pela blindagem.....	99
FIG. 4.9	Micrografias eletrônicas da superfície do projétil recuperado; (a) 100x; (b) 500x.....	100
FIG. 4.10	Ensaio balístico de SBM com camada intermediária de compósito reforçado com 30% de tecido de curauá; (a) antes e (b) após o impacto.....	101
FIG. 4.11	Micrografias eletrônicas dos fragmentos ao redor do impacto do projétil no compósito reforçado com tecido de curauá; (a) 500x; (b) 2.000x.....	102
FIG. 4.12	Micrografias eletrônicas dos fragmentos ao redor do impacto do projétil no compósito reforçado com tecido de curauá; (a) detalhe de uma fibra, 5.000x; (b) detalhe de uma partícula, 5.000x.....	103
FIG. 4.13	Micrografia eletrônica do tecido de curauá, mostrando as fibras em orientação aproximadamente aleatória. 100x.....	104
FIG. 4.14	Histograma de diâmetro das fibras de curauá no tecido.....	105
FIG. 4.15	Gráfico da distribuição de Weibull para o diâmetro das fibras de	

	curauá no tecido.....	106
FIG. 4.16	Micrografias eletrônicas do tecido de curauá; (a) fibra, 500x; (b) detalhe da fibra, 5.000x.....	106
FIG. 4.17	Curva TGA/DTG para o tecido de curauá.....	107
FIG. 4.18	Curva TGA/DTG para a resina epoxídica.....	107
FIG. 4.19	Curva TGA/DTG para o compósito reforçado com 30% de curauá.....	108
FIG. 4.20	Aspecto geral dos corpos de prova de tração: (a) antes do ensaio e (b) após o ensaio.....	110
FIG. 4.21	Micrografia eletrônica mostrando a fratura em tração do compósito. 100x.....	111
FIG. 4.22	Micrografia eletrônica mostrando detalhes microestruturais da fratura em tração do compósito: (a) fibras sacadas, 500x; (b) fibras rompidas, 500x.....	111
FIG. 4.23	Micrografia eletrônica mostrando detalhes microestruturais da fratura em impacto do compósito. (a) 50x; (b) 500x.....	113
FIG. 4.24	Aspecto geral dos corpos de prova de impacto com entalhe normal ao plano do tecido: (a) antes do ensaio e (b) após o ensaio.....	114
FIG. 4.25	Aspecto macroscópico dos corpos de prova de impacto com entalhe paralelo ao plano do tecido: (a) antes do ensaio e (b) após o ensaio.....	114
FIG. 4.26	Aspecto geral dos compósitos produzidos com diferentes espessuras.....	115
FIG. 4.27	Tamanhos de grão da cerâmica: (a) Micrografia eletrônica mostrando o aspecto da fratura e os grãos, 10.000x; (b) Histograma.....	116
FIG. 4.28	Reta de Weibull para os diâmetros dos grãos.....	117
FIG. 4.29	Resposta do trauma em função das espessuras codificadas $C_{cer}$ e $C_{comp}$ , com espessura real do alumínio fixada em 3 mm.....	120
FIG. 4.30	Resposta do trauma em função das espessuras codificadas $C_{cer}$ e $C_{comp}$ , com espessura real do alumínio fixada em 5 mm.....	121
FIG. 4.31	Resposta do trauma em função das espessuras codificadas $C_{cer}$ e $C_{comp}$ , com espessura real do alumínio fixada em 7 mm.....	121

FIG. 4.32	Detalhe do verso do compósito nas placa (a) 3-1 ( $\bar{1}10$ ) e (b) 5-2 ( $\bar{1}0\bar{1}$ ), que possuem o cerâmico no nível -1.....	124
FIG. 4.33	Detalhe do verso do compósito nas placa 12-1 (011). Observar que não há perfuração do compósito, apesar da maior $D_{sup}$ (73,6 kg/m <sup>2</sup> ) desta placa.....	124
FIG. 4.34	Resposta do $ITP$ em função das espessuras codificadas $C_{cer}$ e $C_{Al}$ , com espessura real do compósito fixada em 6,5 mm (nível -1).....	129
FIG. 4.35	Otimização linear do SBM de configuração 000.....	131

## LISTA DE TABELAS

TAB. 1.1	Níveis de proteção balística. Fonte: Adaptado de NIJ 0101.06, 2008.....	25
TAB. 2.1	Peso total calculado para diferentes configurações de blindagens rígidas e flexíveis em coletes. Fonte: Adaptado de LOVERRO <i>et al.</i> , 2015.....	32
TAB. 2.2	Propriedades físico-químicas das resinas epoxídicas. Fonte: Adaptado de RATNA, 2009.....	49
TAB. 2.3	Propriedades de algumas FNL em comparação com fibras sintéticas. Fonte: Adaptado de MONTEIRO, <i>et al.</i> , 2011.....	55
TAB. 2.4	Matriz experimental de Box-Behnken. Fonte: Adaptado de FERREIRA <i>et al.</i> , 2008.....	66
TAB. 3.1	Composição química da Alumina.....	72
TAB. 3.2	Composição química da Nióbia.....	73
TAB. 3.3	Propriedades mecânicas nominais da liga de alumínio utilizada.....	74
TAB. 3.4	Composição química da liga de alumínio 5052 H34, de acordo com o fornecedor.....	74
TAB. 4.1	Velocidade de impacto ( $V_i$ ) e residual ( $V_r$ ) do projétil obtidos no ensaio balístico para os laminados de aramida com diferentes espessuras e densidades superficiais.....	94

TAB. 4.2	Energia absorvida pelos laminados de aramida com diferentes espessuras.....	95
TAB. 4.3	Trauma (mm) medido pela deformação na plastilina para os SBM com camada intermediária de compósito reforçado com 30% de tecido de curauá.....	102
TAB. 4.4	Análise química por EDS em dois pontos da partícula selecionada.....	103
TAB. 4.5	Resistência à tração do compósito reforçado com 30% de tecido de curauá em comparação com outros resultados da literatura.....	109
TAB. 4.6	Energia de impacto do compósito reforçado com 30% de tecido de curauá em comparação com outros resultados da literatura.....	112
TAB. 4.7	Valores médios de densidade dos compósitos.....	115
TAB. 4.8	Valores médios de densidade das cerâmicas.....	117
TAB. 4.9	Valores médios de densidade das placas de liga 5052 H34.....	118
TAB. 4.10	Dureza das placas de liga de alumínio.....	118
TAB. 4.11	Espessuras utilizadas na análise de Box-Behnken e densidades superficiais calculadas para as camadas.....	119
TAB. 4.12	Estatística e análise de Variância (ANOVA) da regressão múltipla.....	122
TAB. 4.13	Coeficientes da regressão múltipla para o <i>Trauma</i> .....	122

TAB. 4.14	Valores de trauma em comparação ao calculado pelo modelo.....	125
TAB. 4.15	Índices calculados para comparação entre os SBMs.....	126
TAB. 4.16	Coeficientes da regressão múltipla para o <i>ITP</i> .....	128
TAB. 4.17	Espessuras otimizadas.....	130

## 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
CBMM	-	Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração
CRFC	-	Compósito reforçado com fibra de curauá
CRTC	-	Compósito reforçado com tecido de curauá
CRTC/N	-	Compósito reforçado com tecido de curauá com entalhe normal ao plano do tecido
CRTC/P	-	Compósito reforçado com tecido de curauá com entalhe paralelo ao plano do tecido
DBB	-	Delienamento de Box-Behnken
DCCR	-	Delineamento Composto Central Rotacional
DGEBA	-	Diglicidil Éter de Bisfenol A
EDS	-	Espectroscopia por dispersão de energia dos elétrons
IME	-	Instituto Militar de Engenharia
IOTV	-	Improved Outer Tactical Vest
<i>ITP</i>	-	Índice Trauma-Peso
MEV	-	Microscópio Eletrônico de Varredura

MSR	-	Metodologia de Superfície de Respostas
NATO	-	Organização do Tratado do Atlântico Norte
NBR	-	Norma Brasileira
NIJ	-	National Institute of Justice
FNL	-	Fibra Natural Lignocelulósica
PEG	-	Polietileno Glicol
PC	-	Scalable Plate Carrier
SBM	-	Sistema de Blindagem Multicamada
UFRJ	-	Universidade Federal do Rio de Janeiro
TETA	-	Trietileno tetramina
TGA/DTG	-	Análise Termogravimétrica

## **SÍMBOLOS**

$\rho$	-	Densidade
$\rho_v$	-	Densidade volumétrica
$D_{sup}$	-	Densidade superficial
$V$	-	Volume específico após o impacto
$V_p$	-	Volume da peça
$C_{cer}$	-	Espessura codificada da cerâmica

$C_{comp}$	-	Espessura codificada do compósito
$C_{Al}$	-	Espessura codificada do alumínio
$E$	-	Energia interna
$k$	-	Módulo de elasticidade do meio material
$E_i$	-	Energia do projétil incidente no alvo
$E_{Izod}$	-	Energia de impacto Izod
$E_r$	-	Energia residual do projétil após impacto
$\%E_{abs}$	-	Percentual da energia do projétil absorvida pelo alvo
$\beta$	-	Módulo de Weibull
$R^2$	-	Ajuste linear
$\theta$	-	Unidade característica de Weibull
$P$	-	Pressão após o impacto
$\sigma_e$	-	Tensão limite de escoamento
$\varepsilon$	-	Deformação
$(\Delta L/L_0)$	-	Ductilidade do material
$U_s$	-	Velocidade da onda de choque
$C_o$	-	Velocidade da onda elástica
$S$	-	Constante da equação de estado do material
$U_p$	-	Velocidade de partícula

$V_i$	-	Velocidade de impacto
$V_r$	-	Velocidade residual
$V_L$	-	Velocidade limite
$m$	-	Massa
$t$	-	Espessura
$t_c$	-	Espessura da camada cerâmica
$t_{cp}$	-	Espessura da camada de compósito
$t_a$	-	Espessura da camada de alumínio
$T$	-	Espessura total da blindagem
$HRS$	-	Dureza Rockwell Superficial

## RESUMO

Com o contínuo avanço na tecnologia de armas e munições, maiores se tornam os desafios na área de blindagens balísticas. Para proteção contra armas leves, fibras sintéticas como a aramida e o polietileno de ultra-alto peso molecular são os mais utilizados. Por outro lado, contra projéteis de alta energia, com velocidades superiores a 800 m/s, é necessária a utilização de materiais de alta dureza, como as cerâmicas, que possibilitam a fratura da ponta do projétil e a redistribuição da energia de impacto. Por sua natureza frágil, as cerâmicas necessitam de camadas de apoio, que absorvam seus fragmentos e o restante da energia de impacto. Para esta função, laminados de tecidos sintéticos, compósitos e metais dúcteis podem ser utilizados, sendo o conjunto denominado sistema de blindagem multicamada (SBM). Recentemente, compósitos reforçados com fibras naturais têm sido testados com sucesso para as camadas de apoio, juntamente com uma camada de liga alumínio, formando um apoio leve, eficiente e de baixo custo. Nos SBMs, em geral, a relação de espessuras das camadas é de grande importância, pois cada material tem sua função específica, e influencia de forma distinta o comportamento geral da blindagem. Portanto, o objetivo do presente trabalho é desenvolver um SBM de baixo custo, possuindo características otimizadas do ponto de vista do desempenho balístico e do peso, utilizando metodologia de ensaio da norma internacional NIJ 0101.06 (2008). Foi utilizado o Planejamento experimental de Box-Behnken (BBD) em conjunto com a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) para otimização das espessuras de uma blindagem com camada intermediária de compósito reforçado com 30% de tecido de curauá. Assim, foi possível identificar a importância de cada camada na blindagem, bem como suas interações, sendo possível prever o comportamento de diversas combinações de espessuras no intervalo dado. A definição de um índice de desempenho permitiu a escolha da melhor configuração de espessuras do ponto de vista de desempenho por unidade de massa e área.

## ABSTRACT

With the continuous advancement in the technology of guns and ammunition, greater are the challenges in the field of ballistic armor. For protection against light ammunition, synthetic fibers such as aramid and the ultra-high molecular weight polyethylene are the most used. However, against high energy projectiles, with speed above 800 m/s, it is necessary to use high hardness material inserts, as the ceramics, that make possible the fracture of the projectile's tip and the redistribution of the impact energy. By their brittle nature, ceramics need support layers that collect their fragments and dissipate the rest of the impact energy. For this, synthetic fiber laminates, composites and ductile metals can be used. The set is often called multilayered armor system (MAS). Recently, composites reinforced with natural fibers have been successfully tested for the support layers, together with an aluminum alloy, constituting a light, efficient and low cost support layer. In the MAS, in general, the layers' thickness ratio is of great importance, since each material has its own specific function and influences in a different way the general behavior of the armor. Therefore, the objective of the present work is to develop a low cost MAS, with optimized characteristics from the point of view of ballistic performance and weight, using the test methodology of the international standard NIJ-0101.06 (2008). It has been used the Box-Behnken Design (BBD), in conjunction with the Response Surface Methodology (RSM), for the optimization of the layers' thickness of an armor with intermediary layer of composite reinforced with 30% curaua fabric. It has been possible to identify the importance of each layer in the armor, as well as their interaction, being also possible to predict the behavior of several combinations of thickness in the given interval. The definition of a performance index allowed the choice of the best thickness configuration aiming performance per unit mass and area.

## 1 INTRODUÇÃO

As guerras e os conflitos armados são motivo de preocupação pessoal, sendo considerados fatos inevitáveis, embora indesejados, especialmente para os cidadãos de nações democráticas. Seja envolvendo pequenos grupos ou grandes nações, as guerras têm sido parte integrante e inescapável da condição humana, estando constantemente presentes ao longo da história e ao redor do mundo. Neste início do século XXI, a lembrança das duas Guerras Mundiais do século XX ainda é recente, e, apesar da ausência de conflitos internacionais desta magnitude, multiplicam-se os conflitos locais e regionais envolvendo diferentes tribos, etnias, milícias, gangues, exércitos e grupos em geral. No Brasil, a existência de grupos de traficantes e milícias fortemente armadas torna a necessidade de proteção balística das forças de segurança do Estado ainda mais necessárias.

Sendo a ameaça de guerra constante, os exércitos e departamentos de defesa nacionais buscam desenvolver suas tecnologias militares, a fim de obter diferencial competitivo para garantir a segurança dos seus cidadãos. Deste modo, grandes quantias de dinheiro e outros recursos são empregados para pesquisa nas áreas militares e, por consequência, grandes são os avanços no desenvolvimento de armas e munições, blindagens balísticas, transportes, comunicações, logística e em outros campos estratégicos.

Tendo em vista o desenvolvimento de armas e munições, à medida que estas vão se tornando mais potentes e mortíferas, maiores se tornam os desafios para os engenheiros e pesquisadores da área de materiais ao desenvolverem novas soluções para blindagens balísticas. Cada vez mais, materiais de alto desempenho são necessários, para proteger a integridade física dos combatentes, dos profissionais envolvidos com segurança pública e dos cidadãos em geral.

As especificações mínimas de desempenho para os materiais utilizados em blindagem pessoal (coletes) e os seus métodos de teste, são estabelecidas internacionalmente pela norma NIJ-0101.06 (2008), e no Brasil pela norma ABNT NBR 15000 (2005). Os coletes são classificados de acordo com seu nível de

proteção, que especifica para quais tipos de munição comercial ele é indicado, como mostra a TAB. 1.1.

**TAB. 1.1** Níveis de proteção balística.

<b>Nível</b>	<b>Calibre</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>
IIA	9mm FMJ RN	8,0	373 ±9,1
	.40 S&W FMJ	11,7	352 ±9,1
II	9mm FMJ RN	8,0	398 ±9,1
	.357 Magnum JSP	10,2	436 ±9,1
IIIA	.357 SIG FMJ FN	8,1	448 ±9,1
	.44 Magnum SJHP	15,6	436 ±9,1
III	7.62 mm NATO FMJ	9,6	847 ±9,1
IV	.30 M2 AP	10,8	878 ±9,1

Adaptado de NIJ 0101.06, 2008

Para ser classificado para o nível III (munição de alta velocidade e energia), o colete deve ser testado com munição pesada como a 7,62 mm NATO FMJ. Além de não permitir a passagem do projétil, para que o colete seja classificado de acordo com um nível de proteção, este não pode sofrer deformação excessiva em sua face posterior, que poderia provocar trauma importante no usuário, causando até a sua morte. Segundo a NIJ-0101.06 (2008), a deformação máxima permitida é de 1,73 pol (44 mm) para blindagens de nível III, medida em um material de referência que simule a consistência do corpo humano.

Em relação à munição de alta energia, para nível de proteção III ou superior, em geral, são necessários materiais de alta resistência, em espessuras relativamente elevadas, que prejudicam a mobilidade do combatente. Para espessuras aceitáveis, a utilização de um único material costuma ser problemática, devido às limitações inerentes ao material. Um material cerâmico, por exemplo, apresenta alta dureza e resistência à compressão, mas sua resistência à tração costuma ser baixa. 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. Tecidos de fibras poliméricas de alta resistência têm seus fios separados e rompidos pela alta tensão gerada pela ponta aguda de um projétil de alta energia como o 7,62 mm, não promovendo a proteção necessária. Para estes tipos de munição, portanto, necessita-se de uma camada frontal dura e resistente, que promova a erosão e fragmentação da ponta do projétil, amparado na face posterior por outros materiais que colem os fragmentos e absorvam o restante da energia cinética do projétil. O tipo de blindagem que utiliza as propriedades de diferentes materiais para proteção balística é denominado sistema de blindagem multicamada (SBM).

Ao entrar em contato com o SBM, o projétil de alta energia com grande velocidade gera uma onda de compressão que se propaga no material nas direções longitudinal e transversal, com velocidade característica. Neste caso, 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 definida como o produto da sua densidade pela magnitude da velocidade de propagação das ondas de choque em sua estrutura. 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, como a impedância de choque é proporcional à densidade do material, é natural que a segunda camada da blindagem seja composta de materiais mais leves, de forma que uma maior parcela da energia incidente é absorvida pela primeira camada da blindagem.

Materiais cerâmicos (densidade de  $\sim 3,5 \text{ g/cm}^3$ ) são geralmente utilizados na camada frontal da blindagem, por possuírem alta impedância de choque, sendo fragmentados após o impacto, absorvendo grande parte da energia na criação de superfícies de fratura (MONTEIRO *et al.*, 2016b). 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 também ser considerada (MEDVEDOVSKI, 2010; 2010a; MONTEIRO *et al.*, 2015).

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 largamente investigados como segunda camada da blindagem (MOBASSERI *et*

*al.*, 2013. MONTEIRO *et al.* 2014; WANG *et al.*, 2014). No entanto, estas fibras são de alto custo, têm validade relativamente curta, e demandam grande quantidade de energia para sua produção. Além disso, algumas destas fibras não são produzidas no Brasil, e, portanto, o mercado brasileiro é dependente da disponibilidade internacional do produto, o que pode ser um problema no sentido estratégico.

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.*, 2011). 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; CRUZ *et al.*, 2015; LUZ *et al.*, 2015; MARSYAHYO *et al.*, 2009; MONTEIRO *et al.*, 2015; MONTEIRO *et al.*, 2016; ROHEN *et al.*, 2015; WAMBUA *et al.*, 2007). Entre as FNL, as fibras de curauá se destacam pela alta resistência e alto módulo elástico, sendo adequadas para aplicações de alto desempenho como as blindagens balísticas (MONTEIRO *et al.*, 2013; MONTEIRO *et al.*, 2015).

Como já foi mencionado, a busca pelo melhor desempenho dos materiais deve levar em conta também a mobilidade que os combatentes e os sistemas de defesa devem possuir, além do custo. O projeto “ótimo” de um sistema de blindagem deve balancear estas características conflitantes. O termo “otimização”, refere-se à melhora do desempenho de um sistema, processo ou produto, de forma a se obter o seu máximo benefício (BEZERRA *et al.*, 2008). Vários são os métodos utilizados para otimização de sistemas. Tradicionalmente, realiza-se o monitoramento de uma das variáveis, verificando-se a influência em uma ou mais variáveis-resposta, mantendo-se todas as outras variáveis constantes. Esta abordagem tem a desvantagem de necessitar de muitos experimentos e de não conseguir identificar a interação entre dois ou mais fatores. Mais recentemente, com o advento de técnicas estatísticas multivariadas, é possível mensurar a interação entre fatores e efetuar a otimização com a quantidade menor de experimentos. Entre estas técnicas está o Delineamento de Box-Behnken (DBB) e a Metodologia de Superfície de Respostas (MSR)(BEZERRA *et al.*, 2008; RODRIGUES & IEMMA, 2014).

Neste trabalho, serão utilizadas técnicas multivariadas para análise do comportamento balístico de um SBM com três camadas, que possui um compósito de matriz epoxídica reforçado com tecido de curauá como camada intermediária.

## 1.1 OBJETIVO DO ESTUDO

O objetivo principal do presente trabalho é desenvolver um SBM de nível III, com três camadas, seguindo as condições estabelecidas pela norma internacional NIJ 0101.06 (2008), que possua características otimizadas em relação ao peso e desempenho balístico. Foi aplicada a metodologia de superfície de resposta (MSR) em conjunto com o planejamento fatorial de Box-Behnken (1960) para avaliação do desempenho dos SBMs produzidos. O objetivo principal deve ser alcançado por etapas, passando pelos seguintes objetivos específicos:

1. Comparar o desempenho balístico de placas de laminados de Kevlar<sup>®</sup> com os seus correspondentes SBMs com camada frontal cerâmica, levando-se em conta o peso das estruturas.
2. Verificar a qualidade e a homogeneidade das matérias-primas das placas balísticas, por meio do controle dimensional e de ensaios térmicos e mecânicos de caracterização dos materiais de cada camada.
3. Fabricar SBMs com camada frontal cerâmica e camada intermediária de compósito reforçado com tecido de curauá. além das camadas frontal e intermediária, utilizou-se uma camada posterior de liga de alumínio. Variando-se as espessuras das camadas, as configurações investigadas deverão seguir uma matriz experimental de Box-Behnken;
4. Verificar o desempenho balístico das blindagens com diferentes espessuras, por meio dos ensaios balísticos que utilizam como critério de avaliação deformação na plastilina, conforme metodologia da NIJ 0101.06 (2008);
5. Identificar os mecanismos de fratura atuantes nos materiais testados, com a finalidade de compreender os fenômenos ocorridos no impacto balístico;

6. Verificar as condições otimizadas da blindagem, utilizando a metodologia de superfície de resposta (MSR), comparando-se a uma otimização “linear” dos SBMs utilizados atualmente.

## 1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA

Do ponto de vista tecnológico e econômico, justifica-se a execução deste trabalho pelas vantagens da utilização dos compósitos reforçados com FNL em substituição aos tecidos de fibra sintética em SBMs. Estes compósitos são mais leves e apresentam custo significativamente mais baixo. A produção de fibras naturais consome menos energia, beneficia comunidades locais brasileiras, e agrega valor a um produto que é nacional, e ambientalmente correto (GÜVEN *et al.*, 2016). Além disso, as fibras sintéticas como a de aramida (Kevlar®) não são produzidas no Brasil. Portanto, o mercado brasileiro tem a oportunidade de se tornar menos dependente da disponibilidade internacional do produto, o que pode ser uma vantagem estratégica. Os compósitos reforçados com FNL, por outro lado, são de alta disponibilidade, e de fácil produção.

No âmbito científico, justifica-se este trabalho pelo entendimento da influência da espessura de cada uma das três camadas de um SBM, no comportamento geral da blindagem. As camadas a serem testadas são a frontal cerâmica (8,5-12,5 mm), intermediária de compósito reforçado com tecido de curauá (6,5-16,5 mm) e posterior de liga de alumínio 5052 H34 (3-7 mm). A finalidade é desenvolver um produto com características otimizadas em questão de desempenho balístico e peso. Pela primeira vez será utilizado o DBB e a MSR para a otimização do desempenho de um SBM que possui três camadas.

Também não foi identificado na literatura estudo que correlaciona a resistência balística dos laminados de tecido de aramida em função da espessura, para projéteis 7,62 mm, além do estudo das propriedades balísticas da cerâmica convexa pelo teste da NIJ-0101.06.

Por último, também pela primeira vez, serão estudadas as propriedades mecânicas sob tração, impacto Izod e impacto balístico dos compósitos de matriz epoxídica reforçados com tecido de curauá.

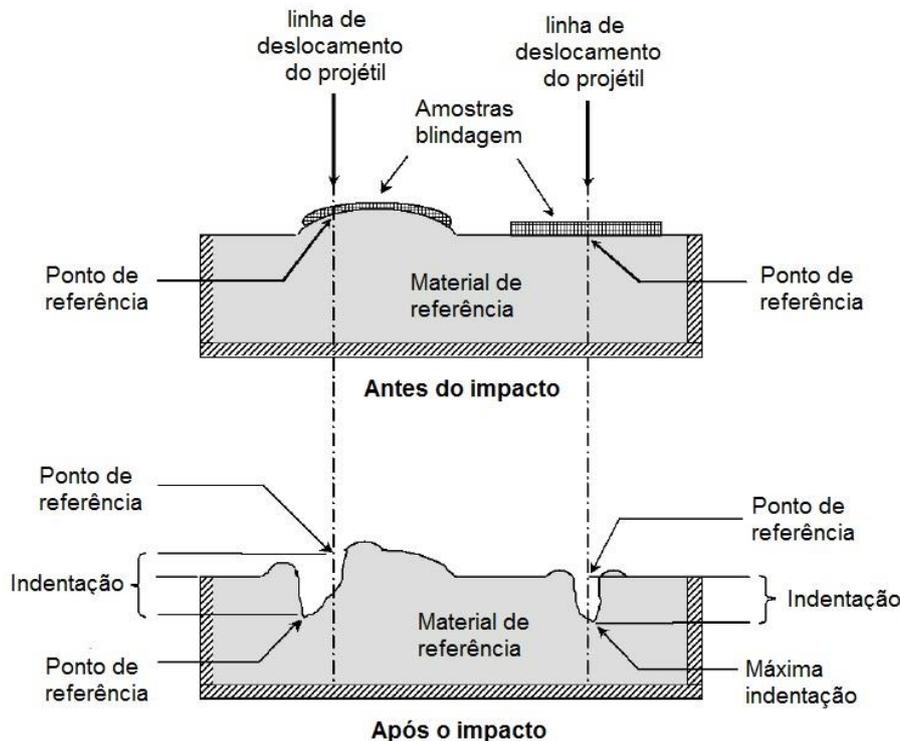
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BLINDAGENS BALÍSTICAS

Uma blindagem balística pode ser definida como um “item ou equipamento que promove proteção contra ameaças balísticas específicas dentro da sua área coberta”, conforme texto da norma internacional NIJ Standard-0101.06, de 2008. No Brasil, o decreto nº 3665 da Presidência da República (2000), que dispõe sobre a fiscalização de produtos controlados, dá a seguinte definição: “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 blindagens balísticas podem ser classificadas como pesadas (fornecendo proteção a estruturas fixas e veículos), leves (para proteção de assoalhos de helicópteros, por exemplo), e também pessoais (protegendo o indivíduo, como no caso de coletes, capacetes e escudos)(COOPER & GOTTS, 2005). As especificações de desempenho dos produtos utilizados em blindagem pessoal, em especial, os coletes para proteção do torso, são estabelecidos no Brasil pelos padrões NIJ-0101.06 (2008) e ABNT NBR 15000 (2005). Estes materiais são classificados segundo 5 níveis de proteção, que estabelecem o tipo de munição comercial e velocidade com a qual são testados e aplicados, como já mostrado na TAB 1.1. É importante ressaltar que, além de prevenir a penetração do projétil, o sistema de blindagem deve conter uma parte significativa da energia de impacto, diminuindo ao máximo o trauma sofrido pelo usuário. Para medida do trauma, existe a metodologia da indentação característica (do inglês *backface signature*)(FIG. 2.1), na qual, uma massa de modelar à base de óleo, do tipo Roma Plastilina, é posicionada na face posterior ao produto testado, e sofre uma deformação plástica que pode ser medida. O bloco de massa simula a consistência do corpo humano, de forma que sua deformação por trás da blindagem torna-se uma medida do trauma sofrido pelo usuário da blindagem. Segundo a NIJ-0101.06, a deformação máxima

permitida para que a blindagem possa ser considerada eficiente para um nível de proteção específico é de 44 mm. Acima deste valor, considera-se que o trauma seria letal para o usuário.



**FIG. 2.1** Trauma promovido pelo projétil, medido pela deformação no bloco de plastilina.

Adaptado de NIJ-0101.06, 2008

Os tipos de blindagem pessoal podem ser agrupados em diversas categorias, levando-se em conta alguma característica comum. Uma classificação é baseada na mobilidade que o sistema permite ao usuário: blindagens flexíveis (*soft body armor*) e blindagens rígidas (*hard body armor*). Como o nome já diz, as blindagens flexíveis provocam pequena restrição nos movimentos do usuário, por serem baseadas em camadas de fibras têxteis, com ou sem trama. Nesta categoria encontram-se os produtos que utilizam fibras de aramida (Kevlar®, Twaron® ou Technora®), o polietileno de ultra-alto peso molecular (Dyneema® ou Spectra®), o nylon 6-6 (nylon balístico), entre outros materiais (Zylon®, M5®). Blindagens flexíveis utilizam tecidos de fibras sintéticas de alto desempenho, e têm sido empregadas devido ao seu bom desempenho, baixo peso e conforto em uso. O nível de proteção balística deste tipo

de blindagem, em geral, é menor que o das blindagens rígidas, e depende das propriedades dos fios, da configuração do tecido e do número de camadas utilizadas (CHEESEMAN & BOGETTI, 2003; TABIEI & NILAKANTAN, 2008; WANG *et al.*, 2014).

As blindagens rígidas podem provocar restrição nos movimentos do usuário, devido à utilização de materiais não-felxíveis. Entretanto, estes materiais possibilitam a erosão e fratura da ponta dos projéteis, acarretando melhor distribuição das tensões provocadas pelo impacto em uma maior área. Neste grupo encontram-se materiais rígidos como cerâmicas, compósitos e metais. Apesar da maior restrição nos movimentos do usuário, as blindagens rígidas fornecem alto nível de proteção balística (WANG *et al.*, 2014). Estes são inseridos nos coletes flexíveis por meio de placas ou pequenos insertos, o que atenua a restrição ao movimento do usuário.

O sistemas de blindagem também podem ser divididos em transparentes e opacos. Blindagens transparentes são sistemas que promovem proteção contra explosões e/ou projéteis, mantendo sua integridade e transparência óptica (GRUJICIC, BELL & PANDURAGAN, 2012; STRASSBURGER, 2009). São tradicionalmente confeccionados em lâmina vidro de soda-cal unidos por camadas poliméricas como poliuretano ou polivinil-butiral. Entre as aplicações estão os visores para veículos e para capacetes individuais. Todos os outros materiais para blindagem, isto é, aqueles que não apresentam transperência óptica, são englobados no outro grupo, das blindagens opacas.

## 2.2 EFEITO DO PESO DOS MATERIAIS NA MOBILIDADE DO COMBATENTE

No campo de batalha e nos conflitos urbanos, o combatente deve vestir o aparato necessário para sua proteção contra os projéteis, além de carregar outros equipamentos, dependendo da da missão a ser cumprida. Em se tratando de proteção balística, dependendo da natureza e da periculosidade das ameaças, diferentes combinações de coletes flexíveis e placas balísticas rígidas podem ser utilizadas.

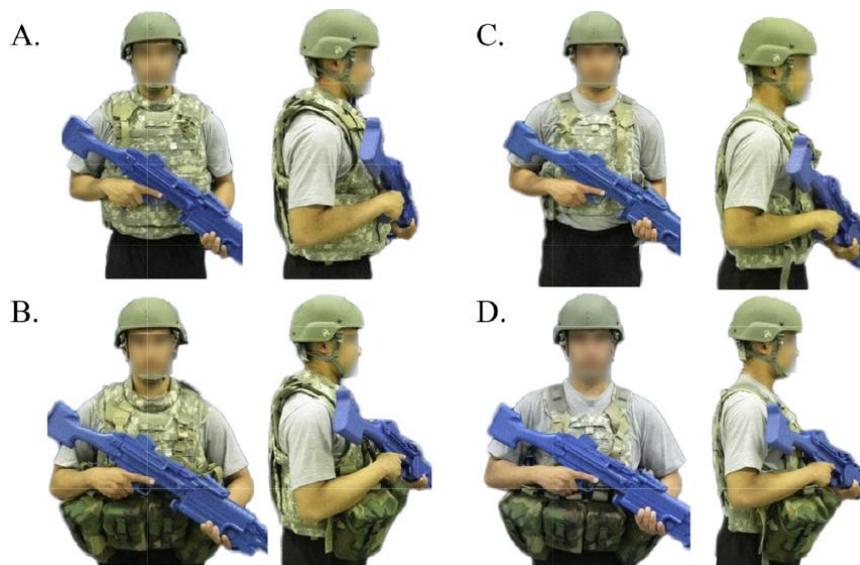
A proteção mínima que o soldado deve vestir é um colete flexível, que pode fornecer proteção até o nível IIIA (munição .40). A FIG. 2.2 mostra dois exemplos de coletes flexíveis, baseados em tecidos de fibras poliméricas. O modelo 1 (FIG. 2.2a) fornece proteção completa do torso mantendo a mobilidade dos ombros, quadris e pescoço, chamado de *Improved Outer Tactical Vest* (IOTV), ou Colete Tático Externo Melhorado. Já o modelo 2 (FIG. 2.2b) permite maior mobilidade dos membros citados, com menor peso, apesar de proteger uma área menor que o modelo 1 (somente as regiões onde as placas de blindagem rígida são posicionadas). Este modelo é denominado *Scalable Plate Carrier* (PC), ou Porta-Placas Dimensionável (LOVERRO *et al.*, 2015).

Se maior proteção é necessária, como a de nível III ou IV, placas ou insertos de materiais de alta dureza e alto módulo de elasticidade, devem ser inseridos no colete. A blindagem rígida consiste de camadas de materiais cerâmicos, metais de alta resistência, compósitos e/ou laminados poliméricos (COOPER & GOTTS, 2005).

Segundo Loverro *et al.* (2015), além da blindagem, o soldado deve sempre carregar aproximadamente 7,3 kg em equipamentos básicos, que incluem o capacete, as botas e a arma. Estes equipamentos são mantidos ao mínimo em missões de combate, pois é essencial que o combatente mantenha sua mobilidade, para que não seja atingido e assim possa executar sua missão com sucesso. Nestas condições, em geral, também é utilizado um cinto com munição e outros dispositivos (cerca de 11 kg, FIG. 2.3b e 2.3d), além dos equipamentos já mencionados, sendo recomendável que a carga total não ultrapasse os 21 kg. Em missões mais longas, em que outros suprimentos são necessários, o soldado pode carregar até 60 kg de carga, pois são incluídos equipamentos como mochila, aparelhos de comunicação, entre outros (LOVERRO *et al.*, 2015). A TAB. 2.2 mostra o resumo de diferentes configurações de coletes em conjunto com os equipamentos comuns de combate, e o seu peso associado.



**FIG. 2.2** Alguns modelos de coletes balísticos flexíveis militares: (a) IOTV; (b) PC.  
Adaptado de LOVERRO *et al.*, 2015



**FIG. 2.3** Configurações de carga do soldado: (a) IOTV com capacete e arma; (b) IOTV com cinto, capacete e arma; (c) PC com capacete e arma; (d) PC com cinto, capacete e arma.

Adaptado de LOVERRO *et al.*, 2015

**TAB. 2.1** Peso total calculado para diferentes configurações de blindagens rígidas e flexíveis em coletes.

<b>Configuração do colete</b>	<b>Descrição</b>	<b>Sem cinto de munição (kg)<sup>1</sup></b>	<b>Com cinto de munição (kg)<sup>2</sup></b>
IOTV Leve	Somente o colete IOTV (4,8 kg)	12,1	23,1
IOTV Pesado	Colete IOTV com placas rígidas frontal, posterior e lateral (12,1 kg)	19,4	30,4
PC Pesado	Colete PC com placas rígidas frontal, posterior e lateral (9,8 kg)	17,1	28,1

<sup>1</sup>Adiciona-se 7,3 kg do capacete, botas e arma para qualquer configuração.

<sup>2</sup>Adiciona-se 11 kg do cinto de utilidades para qualquer configuração.

Adaptado de LOVERRO *et al.*, 2015

Segundo Holewijn e Lotens (1992) o desempenho físico de um soldado diminui 1% para cada quilograma a mais que ele carrega. Dempsey, Handcock e Rehrer (2013) observaram um decréscimo de 13-42 % no desempenho de policiais ao utilizarem colete balístico e cinto de utilidades (cerca de 10 kg no total), quando comparado a nenhuma carga. Park *et al.* (2014) observaram que o excesso de peso da blindagem pode não só diminuir a mobilidade, mas induzir dor músculo-esquelética e fadiga precoce. Knapik *et al.* (2004) acrescentam à lista de lesões outras como bolhas nos pés, fraturas pelo *stress*, e paralisia dorsal.

Portanto, as pesquisas mostram que é necessário que a blindagem pessoal tenha sua performance e peso otimizados, fornecendo proteção apropriada com o mínimo de peso possível.

## 2.3 ALTERNATIVAS PARA AUMENTO DA MOBILIDADE DO COMBATENTE

A busca pelo melhor desempenho deve levar em conta também a mobilidade que os combatentes e os sistemas de defesa devem possuir (COOPER & GOTTS, 2005; WANG *et al.*, 2014). A análise de trabalhos existentes na literatura permite identificar algumas alternativas para aumentar a mobilidade dos combatentes (COOPER & GOTTS, 2005; KNAPIK *et al.*, 2004; LOVERRO *et al.*, 2015). Entre as abordagens encontram-se:

- Otimização da área coberta pela blindagem.
- Distribuição da carga total ao longo do corpo.
- Substituição dos materiais empregados por materiais mais leves.
- Realização de análises de risco para projetar a quantidade de carga a ser transportada pelo soldado.
- Programas especializados para treinamento físico do soldado.

Estas abordagens serão detalhadas a seguir, com exceção das duas últimas, que fogem do escopo do trabalho.

### 2.3.1 OTIMIZAÇÃO DA ÁREA COBERTA PELA BLINDAGEM

Uma das primeiras implicações do balanço “desempenho vs mobilidade”, foco desta tese, é que a blindagem deve resistir à principal ameaça balística e deve ser aplicada nas regiões mais vulneráveis do corpo (COOPER & GOTTS, 2005). A proteção do tórax contra projéteis perfurantes, por exemplo, é comumente realizada de modos diferentes para soldados em posições estáticas e soldados móveis, como os de infantaria. No primeiro caso, é esperado que estes deem resposta de fogo ao serem atacados, então é essencial que o peito tenha uma grande área protegida. No caso de um projétil de alta energia, como o 7,62 mm, isto iria requerer uma pesada placa cerâmica. Sendo estático o trabalho deste soldado, o peso da cerâmica não é um grande problema. Um soldado de infantaria, por outro lado, como parte de um

pelotão móvel, não pode transportar uma placa como essa mantendo a agilidade e mobilidade. Neste caso, a blindagem é projetada para proteger as regiões mais críticas do corpo, levando-se em conta as instalações e recursos médicos disponíveis. Isto pode significar proteger com a placa cerâmica apenas o coração e os grandes vasos sanguíneos. Lesões penetrantes nos pulmões, sozinhos, apresentam uma relativa baixa mortalidade quando há cuidado médico imediato, mas a menor cobertura dessas áreas com blindagem cerâmica aumenta significativamente a mobilidade das tropas (o que significa menor mortalidade em pessoal de tropas móveis). Assim, é possível dizer que a área a ser coberta é determinada por aspectos clínicos bem como por aspectos ergonômicos (COOPER & GOTTS, 2005).

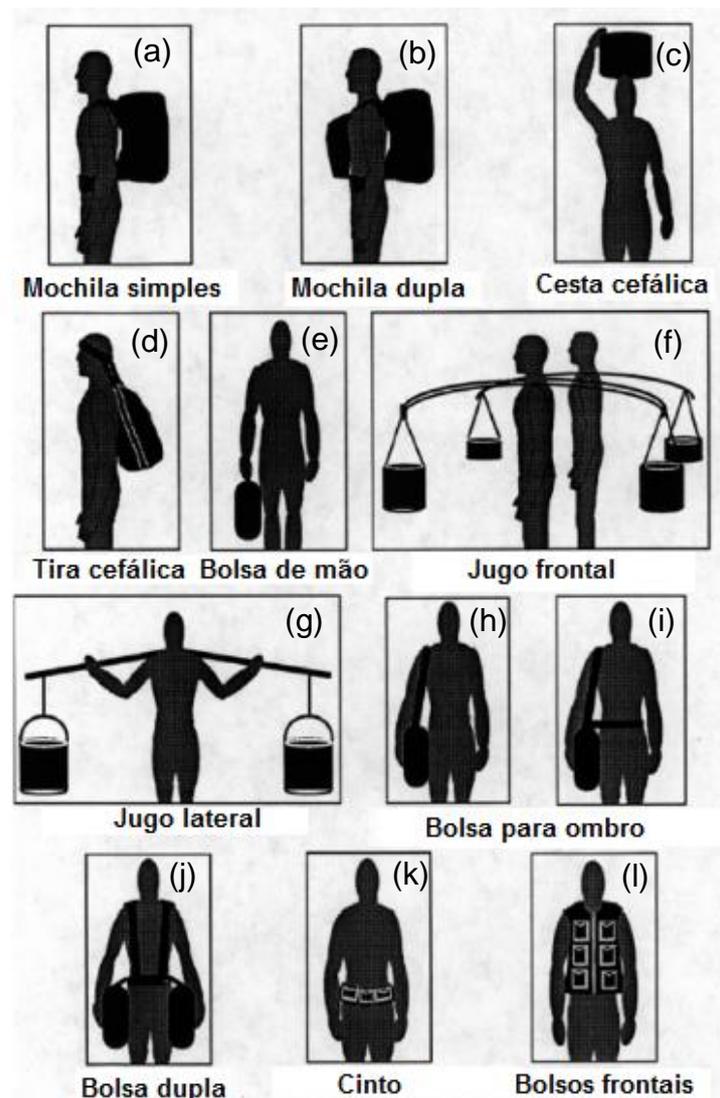
O conhecimento das consequências e do risco de morte relacionados à incidência dos diferentes tipos de projéteis é, portanto, necessário para otimizar a localização da blindagem (CAREY, 1988; COOPER & GOTTS, 2005).

### 2.3.2 REDISTRIBUIÇÃO DA CARGA

Existem muitas formas de se carregar equipamentos pesados, e a técnica que o soldado utiliza dependerá de características da carga, como tamanho, forma e massa, da distância a ser percorrida e do equipamento disponível (LEGG, 1985; KNAPIK *et al.*, 2004). A FIG. 2.4 mostra algumas técnicas de transporte de carga utilizando a parte superior do corpo.

O menor gasto energético para o transporte de carga é aquele cuja força vertical exercida para manter a carga em certa altura tem distância horizontal mínima em relação ao centro de massa do corpo. A opção mais vantajosa é, portanto, o transporte do tipo cesta cefálica (cerregada pela cabeça) (KNAPIK *et al.*, 2004; MALOY *et al.*, 1986; HEGLUNG *et al.*, 1995), FIG. 2.4(c). No entanto, este método costuma ser inviável em operações militares, pois neste caso, perde-se mobilidade e parte do controle sobre a carga. A melhor opção para estas operações costuma ser o uso de mochilas e/ou coletes para o tronco, FIG. 2.4(a), (b) e (e).

A mochila dupla e os coletes com distribuição do peso na parte frontal e dorsal, em relação à mochila simples, têm a vantagem de permitir um menor desvio em relação ao caminhar normal, o que inclui menor flexão do tronco. Além disto, possibilita o acesso rápido de artigos que precisam ser utilizados com muita frequência e/ou com muita rapidez (KNAPIK *et al.*, 2004). Por outro lado, este método tem desvantagens como limitar o campo visual da frente do corpo, dificultando a visão de obstáculos e armadilhas, além de restringir atividades como atirar, utilizando armas de fogo.



**FIG. 2.4** Métodos de transporte de carga.

Adaptado de KNAPIK *et al.*, 2004

### 2.3.3 SELEÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS

A análise anterior mostra que a completa proteção de um soldado móvel implica na utilização de pesados materiais, cujo uso deve ser racionalizado em quantidade e distribuição. Uma alternativa que é sempre vantajosa é a substituição dos materiais utilizados por outros mais leves, de maior tecnologia envolvida.

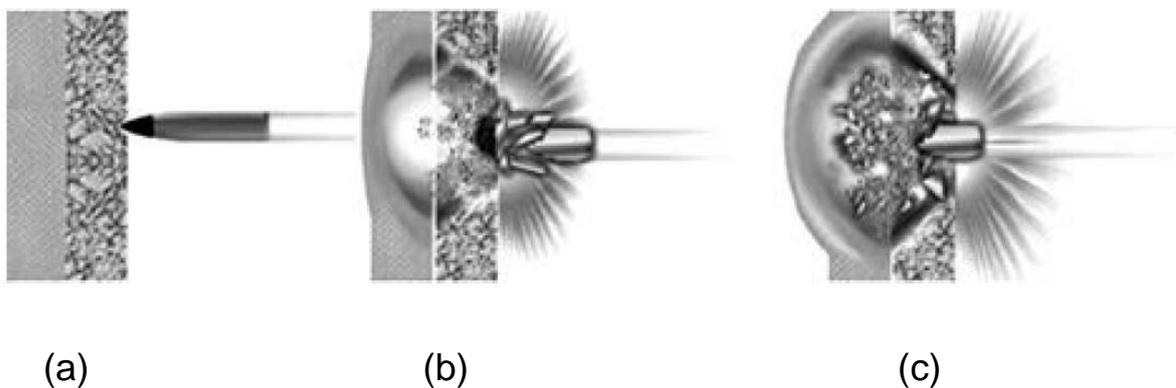
No passado, a proteção balística pessoal era realizada utilizando-se chapas monolíticas de aço de alta resistência, com limite de escoamento que superava 1 GPa (ONG *et al.*, 2011). No entanto, a alta densidade destes materiais tornaram-o indesejável para esta aplicação. A necessidade de se utilizar materiais com alto limite de escoamento evoluiu para o uso de cerâmicas técnicas, como o óxido de alumínio, e os carbetos de boro e de silício, que são significativamente mais leves que o aço (MEDVEDOVSKI, 2010). Apesar de ambos, metais e cerâmicas de alta resistência, fornecerem boa proteção balística, seus mecanismos de proteção diferem significativamente. Os metais absorvem a energia do projétil por meio de deformação plástica, enquanto as cerâmicas dissipam energia por fratura. Neste caso, a utilização de cerâmicas requer um apoio de material dúctil, para coleta dos estilhaços resultantes do impacto.

Diversos materiais sintéticos leves e resistentes, que suprem esta demanda, foram desenvolvidos (HANI *et al.*, 2012; AKELLA & NAIK, 2015). Em primeiro lugar, tecidos de alta resistência, que dificultam a penetração do projétil pela dissipação das ondas de tensão ao longo dos fios, no plano do tecido, e nas múltiplas camadas de tecido (STEMPIÉN, 2011; TABIEI & NILAKANTAN, 2008). Nesta categoria encontram-se os tecidos de poli(p-fenileno tereftalamida), mais conhecida como aramida (Kevlar<sup>®</sup> e Twaron<sup>®</sup>), os polietilenos de alto módulo de Young (Spectra<sup>®</sup> e Dyneema<sup>®</sup>), e o poli(p-fenileno-benzobisoxazol), conhecido como PBO (Zylon<sup>®</sup>). Além disso, estes mesmos tecidos, e outros como os de fibras de vidro e carbono, podem ser utilizados na forma de compósitos, reforçando matrizes poliméricas diversas, como resinas epóxicas, poliésteres insaturados, vinil ésteres, polietilenos e polipropilenos (AKELLA & NAIK, 2015; BRESCIANI, MANES & GIGLIO, 2015; NAIK & SHRIRAO, 2004; NUNES, PACIORNIK & ALMEIDA, 2004; WANG *et al.*, 2014). Nos últimos anos, com a finalidade de tornar estes materiais mais

sustentáveis e mais baratos, pesquisadores têm analisado as propriedades dos compósitos reforçados com fibras naturais (AKUBUE, IGBOKWE & NWABANNE, 2015; MONTEIRO *et al.*, 2016; MONTEIRO *et al.*, 2016c; WAMBUA *et al.*, 2007).

Como pode ser percebido pela discussão anterior, no presente estado da arte, um material de forma isolada não possui as propriedades necessárias para suportar as altas tensões resultantes de um impacto balístico como o de nível III, exceto no caso de grandes espessuras (SILVA *et al.*, 2014; MEDVEDOVSKI, 2006; SERJOU EI *et al.* 2015; YADAV & RAVICHANDRAN, 2003). Tendo em vista as limitações de cada classe de materiais, uma boa alternativa para reduzir o peso de uma blindagem é a utilização de diferentes materiais em camadas, cada uma possuindo uma função específica, e agindo de forma sinérgica para a proteção contra a ameaça balística. Estas soluções são denominadas sistemas de blindagem multicamada (SBM), também chamadas de blindagens compósitas (do inglês *composite armor*).

A FIG. 2.5 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. (SILVA *et al.*, 2014; MEDVEDOVSKI, 2010; MONTEIRO *et al.*, 2014; SERJOU EI *et al.* 2015).



**FIG. 2.5** Ilustração do mecanismo de absorção do impacto balístico realizado pela blindagem multicamada: (a) antes; (b) durante e (c) após o impacto balístico.

Adaptado de SILVA *et al.*, 2014

Diversas concepções de SBMs têm sido desenvolvidas, e suas propriedades extensivamente estudadas. Medvedovski (2006, 2010 e 2010a) estudou diversos sistemas baseados em camada frontal cerâmica seguida de laminados de tecido de aramida. Monteiro *et al.* (2015, 2016, 2016a, 2016b e 2016c), têm realizado diversos estudos buscando incorporar uma camada intermediária utilizando compósitos reforçados com fibras naturais em blindagens com camada frontal cerâmica e camada posterior de alumínio. Liu *et al.* (2016) estudaram um sistema balístico inspirado em escamas de peixe, formado por peças frontais de SiC e camada posterior de alumínio. Justi *et al.* (2017) estudaram um sistema formado por pastilhas de alumina apoiadas em bloco de alumínio submetido ao impacto com munição 7,62 mm. Eles investigaram a adição de resina epoxídica ou geopolímero como preenchimento do espaço entre as pastilhas de alumina. A resina epoxídica proporcionou melhor resultado, atribuído à sua maior elasticidade, que favorece a integridade das pastilhas cerâmicas adjacentes ao impacto. Rahbek *et al.* (2016) estudaram a cobertura de pastilhas de alumina com compósito PET-fibras de vidro, de forma a aumentar a densidade superficial de 39,1 a 42,1 kg/m<sup>2</sup>. O estudo foi desenvolvido utilizando munição 7,62 mm perfurante, mas com baixas velocidades (~300 m/s). Eles observaram um aumento na fragmentação da cerâmica mediante o confinamento pelo compósito. Segundo os autores, isto melhora o desempenho balístico da blindagem cerâmica, devido à maior absorção de energia do projétil.

Os estudos acima mencionados mostram que é grande o interesse dos pesquisadores em desenvolver sistemas mais leves e eficientes para proteção balística, maximizando a relação custo-benefício. Nas próximas seções serão detalhados os materiais e propriedades que são capazes de ser aplicados em altas taxas de deformação.

## 2.4 COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS MATERIAIS

A interação de projéteis que se movem em alta velocidade com os alvos em repouso podem ser descritas pelas equações de conservação de Rankine-Hugoniot

(EQ. 2.1, 2.2 e 2.3) em conjunto com a equação de estado do material (EQ. 2.4) (MEYERS, 1994):

$$\text{Conservação de massa:} \quad \rho_0 U_s = \rho(U_s - U_p) \quad \text{EQ. 2.1}$$

$$\text{Conservação de momento:} \quad (P - P_0) = \rho_0 U_s U_p \quad \text{EQ. 2.2}$$

$$\text{Conservação de energia:} \quad E - E_0 = \frac{1}{2}(P + P_0)(V_0 - V) \quad \text{EQ. 2.3}$$

$$\text{Equação de estado do material:} \quad U_s = C_0 + S_1 U_p \quad \text{EQ. 2.4}$$

Onde:  $\rho_0$  e  $\rho$  são as densidades do meio antes e após o impacto;  $P_0$  e  $P$  as pressões;  $E_0$  e  $E$  as energias internas;  $V_0$  e  $V$  os volumes específicos;  $U_p$  é a velocidade de partícula;  $U_s$  é a velocidade da onda de choque;  $S_1$  é um parâmetro empírico e  $C_0$  é a velocidade do som no material.

A velocidade do som  $C_0$  pode ser calculada por:

$$C_0 = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \quad \text{EQ. 2.5}$$

Onde:  $k$  é o módulo elástico do material e  $\rho$  a densidade do meio material.

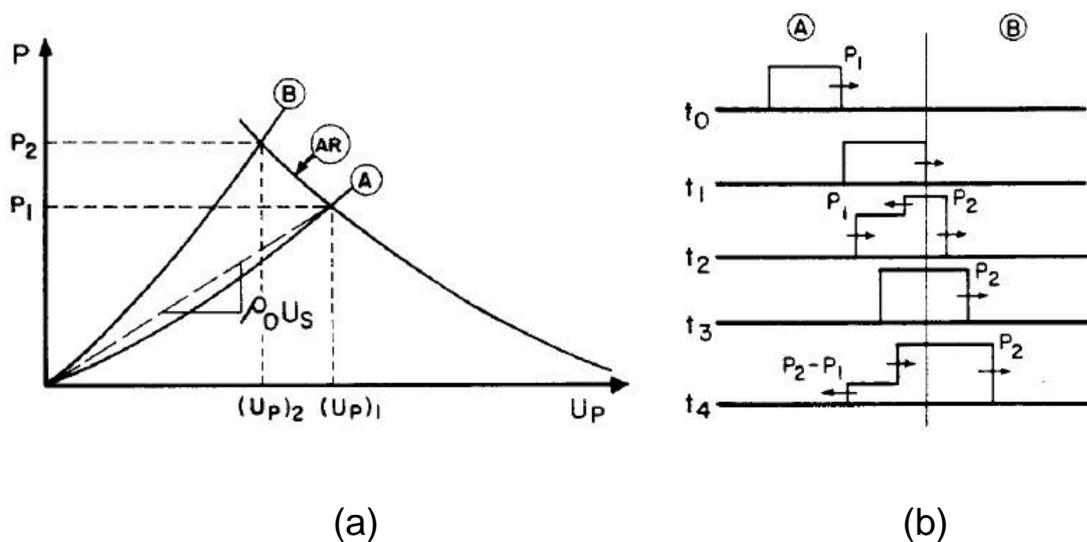
No caso em que o alvo possui duas camadas ou mais, a onda de choque gerada interage na interface entre as camadas. Neste caso, as equações de conservação tomam a forma a seguir (EQ. 2.6 e 2.7):

$$P_2 = \rho_{02}(C_2 + S_2 U_{p2})U_{p2} \quad \text{EQ. 2.6}$$

$$P_1 = \rho_{01}C_1(V - U_{p2}) + \rho_{01}S_1(V - U_{p2})^2 \quad \text{EQ. 2.7}$$

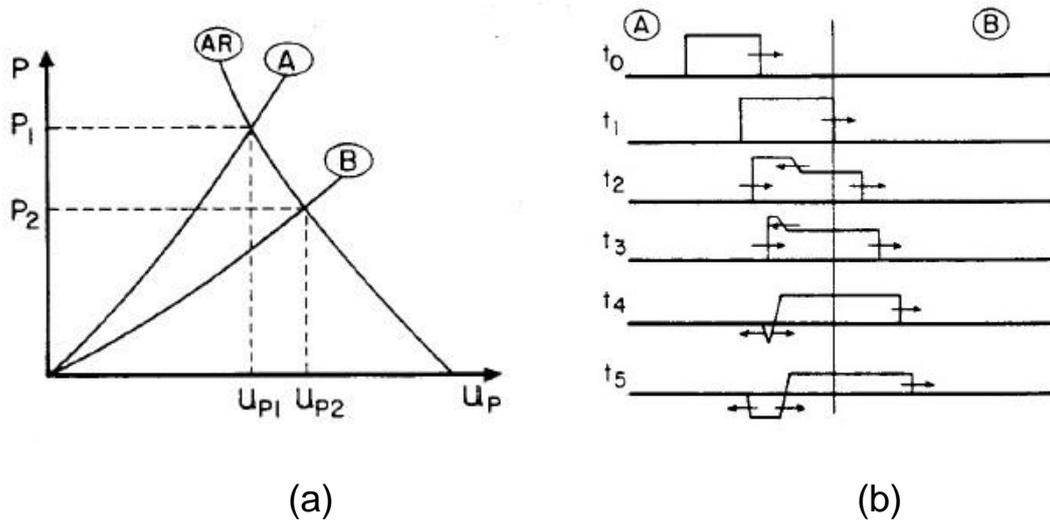
As EQ. 2.6 e 2.7, se plotadas em um mesmo gráfico  $P$  versus  $U_p$ , possibilitam uma solução gráfica para o cálculo das pressões geradas nas interfaces das camadas. Este método é denominado casamento de impedâncias, e é de grande importância no caso em que os alvos possuem mais de uma camada, como nos sistemas de blindagem multicamda (SBM).

No gráfico  $P-U_p$  do casamento de impedâncias (FIG. 2.6 e 2.7), a inclinação no ponto de interseção entre as curvas (EQ. 2.6 e 2.7) tem grandeza  $Z = \rho_0 U_s$  e é denominada impedância de choque. A metodologia do casamento de impedâncias permite tirar as seguintes importantes conclusões: Se o material da segunda camada possui  $Z$  maior que a primeira camada (FIG. 2.6), a onda de choque reflete na interface e retorna como onda compressiva (FIG. 2.6b); Entretanto, se o material da segunda camada possui  $Z$  menor que a da primeira camada (FIG. 2.7), a onda de choque reflete na interface e retorna como onda trativa (FIG.2.7b). Esta onda trativa é responsável pela fragmentação (*spalling*) observada na primeira camada cerâmica. Deste modo, é importante que a impedância da segunda camada seja mínima, para que a cerâmica absorva o máximo de energia possível por sua fragmentação.



**FIG. 2.6** 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.

Adaptado de MEYERS, 1994



**FIG. 2.7** 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.

Adaptado de MEYERS, 1994

Em geral, a proteção balística fornecida pela blindagem se baseia em dois tipos de mecanismos: absorção da energia de impacto e/ou redistribuição da energia de impacto. Em outras palavras, a energia é absorvida por uma rápida conversão e dispersão da energia cinética do projétil, em energia de fratura ou deformação (COOPER & GOTTS, 2005; WANG *et al.*, 2014). O primeiro mecanismo (absorção de energia) é mais comum nas cerâmicas, compósitos e metais de alta resistência, enquanto o segundo mecanismo (redistribuição) em materiais dúcteis, como nos tecidos de fibra sintética e metais de baixa resistência.

## 2.5 MATERIAIS PARA BLINDAGENS MULTICAMADA

### 2.5.1 MATERIAIS CERÂMICOS

Cerâmicas 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). Materiais cerâmicos são rígidos, resistentes à compressão e de alta dureza. 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 (MEDVEDOVSKI, 2010; TASDERMIRCI, TUNUSOGLU & GÜDEN, 2012). A fragmentação ocorre, principalmente, devido à uma onda trativa que é resultado da reflexão da onda de choque na face oposta ao impacto (MONTEIRO *et al.*, 2016c).

Os principais materiais cerâmicos que vêm sendo utilizados em proteção balística são a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), carbetos de silício (SiC) e o carbetos de boro ( $\text{B}_4\text{C}$ ). Alguns nitretos e boretos são outros 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 (SILVA *et al.*, 2014; MEDVEDOVSKI, 2010a).

A presença de aditivos pode alterar a processabilidade da alumina bem como o seu mecanismo de fratura. A adição de 4 a 6% em peso de nióbia ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) 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  $\text{AlNbO}_4$  nos contornos de grãos. Isso aumenta a absorção de energia durante o impacto balístico. O valor ótimo de nióbia encontrado em trabalho anterior foi de 4% (GOMES, 2004). Mais recentemente, Jesus (2016) e Santos (2016) estudaram a adição de fluoreto de lítio nas propriedades da cerâmica mencionada. Foi observado um aumento significativo na densificação do material.

## 2.5.2 MATERIAIS POLIMÉRICOS E COMPÓSITOS

Em aplicações em que materiais leves são necessários, os materiais poliméricos e seus compósitos costumam ser os mais adequados, pois sua densidade varia comumente na faixa de 0,9 a 1,4 g/cm<sup>3</sup> (CALLISTER & RETHWISCH, 2012). São considerados polímeros os materiais que consistem de moléculas relativamente grandes, de peso molecular da ordem de 10<sup>3</sup> a 10<sup>6</sup>, formadas pela repetição de unidades estruturais denominadas *meros* (COWIE, 1991; MANO, 1985). Os compósitos, por sua vez, 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 (MOURA, 2011).

A segunda camada da blindagem é geralmente formada por lâminas de tecido polimérico de alto desempenho, ou por compósitos de matriz polimérica, 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). Neste trabalho, esta segunda camada foi denominada camada intermediária.

Diversos reforços para materiais compósitos têm sido estudados em aplicações balísticas, incluindo fibras de vidro (NUNES, PACIORNIK & D'ALMEIDA, 2004), carbono (ULVEN *et al.*, 2003), aramida (BANDARU *et al.*, 2016; MOBASSERI *et al.*, 2013), polietileno (ALVES *et al.*, 2004). Mais recentemente, fibras naturais lignocelulósicas têm sido consideradas como reforço em compósitos balísticos. Tecidos e fibras como as de juta (LUZ *et al.*, 2015), sisal (Rohen *et al.*, 2015), bambu (CRUZ *et al.*, 2015), rami (ALI *et al.*, 2011; MARSYAHYO *et al.*, 2009; MONTEIRO *et al.*, 2016), kenaf (ABIDIN *et al.*, 2013; AKUBUE, IGBOKWE & NWABANNE, 2015), malva (NASCIMENTO *et al.*, 2017) e linho (WAMBUA *et al.*, 2007), têm sido estudados.

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

### 2.5.3 MATRIZES EPOXÍDICAS

Em um sentido amplo, o termo epóxi se refere a um grupo químico que consiste de um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono ligados entre si. O epóxi mais simples é um anel de três membros, denominado  $\alpha$ -epóxi ou 1,2-epóxi. Este é de grande importância, e dá origem a alguns compostos de interesse, como a epiclorigrina, o ácido glicídico, o glicidol, entre outros. O termo resina epóxi é utilizado para as moléculas que contêm um ou mais grupos  $\alpha$ -epóxi situadas no seu interior, podendo ser nas extremidades ou em estruturas cíclicas na cadeia, capazes de ser convertidas em um polímero termofixo útil. Este termo é utilizado para indicar as resinas tanto no estado termoplástico (pré-cura) como no estado termofixo (pós-cura) (LEE & NEVILLE, 1967).

Embora a presença do grupo funcional epóxi defina a molécula como epoxídica, a base molecular vinculada a este anel pode variar, bem como o número de grupos funcionais na molécula, resultando de várias classes de resinas epóxi. A funcionalidade ( $f$ ) de uma resina epoxídica é caracterizada por uma grandeza chamada “equivalente epóxi”, que é definida como a quantidade de resina que contém um mol de epóxi (RATNA, 2009).

Em geral, para aplicações estruturais comuns, resinas epoxídicas disfuncionais ( $f=2$ ) são satisfatórias, em termos de propriedades. No entanto, muitas aplicações de alto desempenho, como na indústria aeroespacial e de defesa, é necessária a incorporação de resinas de maior funcionalidade, conhecidas como multifuncionais ( $f>2$ ). Resinas trifuncionais ( $f=3$ ) e tetrafuncionais ( $f=4$ ) estão disponíveis comercialmente (RATNA, 2009). A estrutura química destas resinas é mostrada na FIG. 2.8, e algumas suas propriedades físico-químicas se encontram na TAB. 2.3.

**TAB. 2.2** Propriedades físico-químicas das resinas epoxídicas.

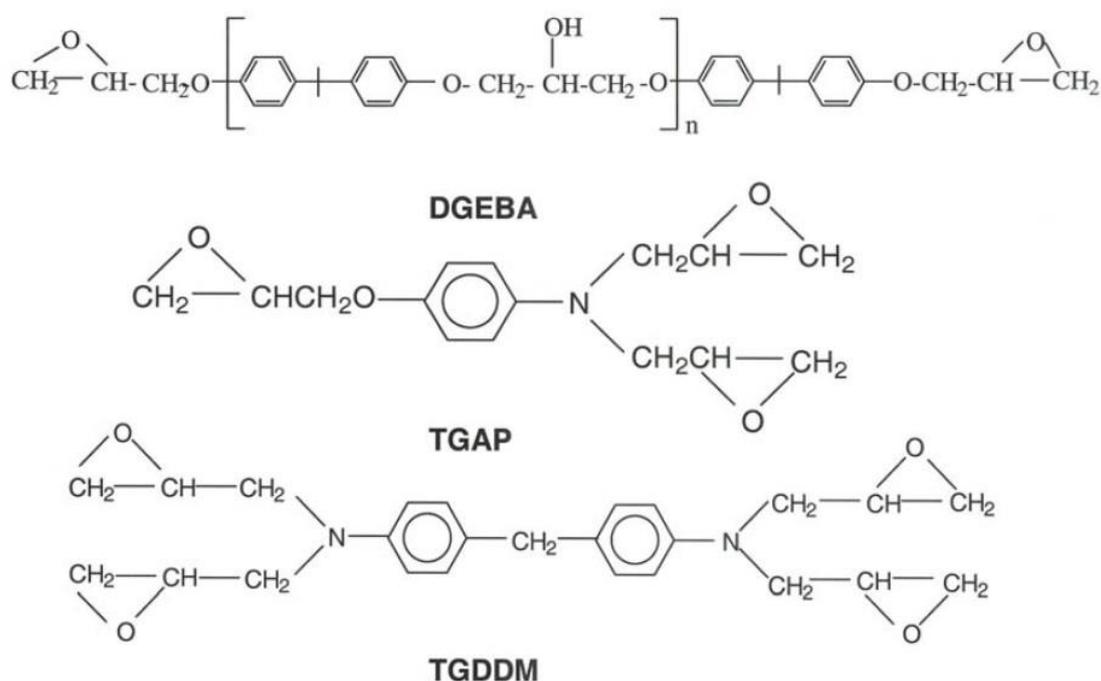
Resina	Viscosidade (Pa.s)	Equivalente epóxi (g/eq.)	Funcionalidade (eq./mol)
DGEBA <sup>1</sup>	3,5	190	2
TGAP <sup>2</sup>	0,5	95	3
TGDDM <sup>3</sup>	94,5	100	4

<sup>1</sup>Diglicidil éter de Bisfenol A.

<sup>2</sup>Triglicidil p-amino fenol.

<sup>3</sup>Tetraglicidil éter de 4,4 diaminofenil metano.

Fonte: Adaptado de RATNA, 2009



**FIG. 2.8** Estruturas químicas das resinas epoxídicas dis e multifuncionais.

Fonte: Adaptado de RATNA, 2009

O processo de solidificação dos termofixos é dominado por uma reação exotérmica e irreversível denominada “cura”, que pode ocorrer na temperatura ambiente ou em altas temperaturas. A reação de cura pode ser ativada por agentes como absorção de umidade e radiação, e por reação química com um agente de cura (OSSWALD & MENGES, 2012). A estrutura do polímero resultante é reticulada,

formada por uma rede tridimensional de alta rigidez e resistência mecânica. À medida que o grau de reticulação aumenta, o movimento dos segmentos de cadeia se torna mais restrito, resultando em melhores propriedades mecânicas do polímero (BRYDSON, 1999).

As resinas epoxídicas podem sofrer a cura reagindo com uma variedade de materiais, chamados agentes de cura ou endurecedores. Os reagentes mais utilizados são à base de aminas, anidridos, tióis e álcoois, e sua seleção é baseada na aplicação em que o polímero será utilizado e nas condições de cura (RATNA, 2009). Como se trata de uma reação de adição, não é formado resíduo de baixo peso molecular, e, por conseguinte, ocorre menor retração na cura em comparação com os outros polímeros termofixos. Entre os agentes de cura disponíveis, as aminas são utilizadas na maioria das aplicações. São divididas em três grupos: Aminas alifáticas, cicloalifáticas e aromáticas. A densidade de ligações cruzadas do polímero resultante pode ser ajustada pela escolha cuidadosa da química e da estequiometria do pré-polímero e do endurecedor amina. A combinação de maior funcionalidade e menor massa molar do pré-polímero resulta em um polímero altamente reticulado (BRYDSON, 1999).

A formulação epoxídica deve conter um agente de cura adequado e alguns ingredientes opcionais selecionados após cuidadosa consideração da aplicação em que a resina será usada. Alguns exemplos são os diluentes e os catalisadores. Diluentes são usados em uma formulação epoxídica para reduzir sua viscosidade ou para eliminar a necessidade de solventes. Em geral, uma maior quantidade de diluentes está associada com a redução da resistência mecânica, módulo de Young e da temperatura de transição vítrea. Portanto, sua quantidade deve ser otimizada (RATNA, 2009). Catalisadores podem ser utilizados se houver necessidade de acelerar a reação de cura. Entre os catalisadores mais comuns encontram-se as aminas terciárias, na cura da resina com anidridos, e os ácidos de Lewis, quando álcoois e anidridos são empregados, além de fenóis, ácidos carboxílicos e álcoois, nas reações cura com aminas (COWIE, 1991; RATNA, 2009).

As resinas epoxídicas têm sido extensivamente investigadas e aplicadas, em virtude da versatilidade do grupo epóxi para uma variedade de reações químicas, e das boas propriedades do polímero reticulado, como a alta resistência mecânica em temperatura ambiente e criogênica, fluência muito baixa, excelente resistência à

corrosão e ao ambiente, capacidade de serviço em temperaturas relativamente altas, elevada constante dielétrica (isolamento elétrico) e excelente adesão (antes e depois da cura) em cerâmica, metal, vidro, entre outros materiais (ABREU, 2008; RATNA, 2009).

#### 2.5.4 FIBRAS NATURAIS LIGNOCELULÓSICAS

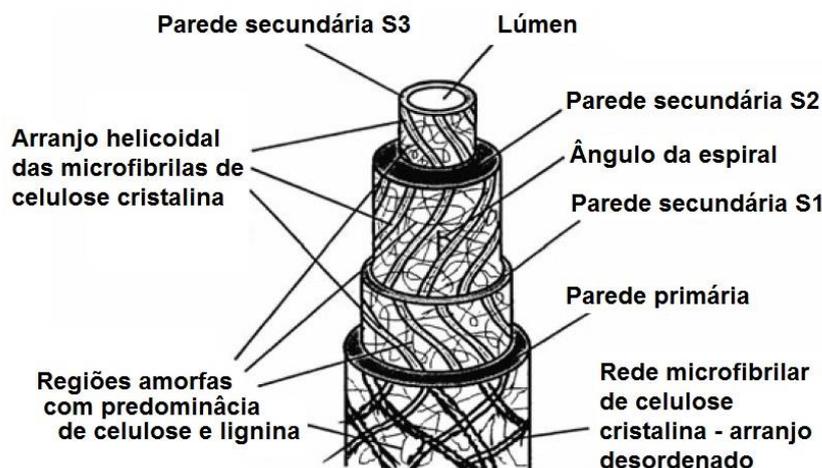
Fibras naturais são classificadas com base em sua origem, animal, vegetal ou mineral. As fibras de origem animal consistem basicamente de proteínas (cabelo, seda e lã). As fibras de origem vegetal possuem predominância de celulose e lignina em sua estrutura, e por isso são denominadas fibras naturais 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 e 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 têm 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 (GÜVEN *et al.*, 2016; KALIA, *et al.*, 2011; MONTEIRO *et al.*, 2009; PICKERING, EFENDY & LE, 2016; SATYANARAYANA *et al.* 2009).

Há uma tendência crescente de se utilizar FNL como cargas ou reforços em compósitos de matriz polimérica. 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 compósitos. Os compósitos reforçados com FNL têm sido aceitos como materiais de engenharia, por sua boa variedade de propriedades, sendo cada vez mais utilizados em aplicações estruturais (GÜVEN *et*

al., 2016; KALIA, *et al.*, 2011; MONTEIRO *et al.*, 2009; PICKERING, EFENDY & LE, 2016; SATYANARAYANA *et al.* 2009).

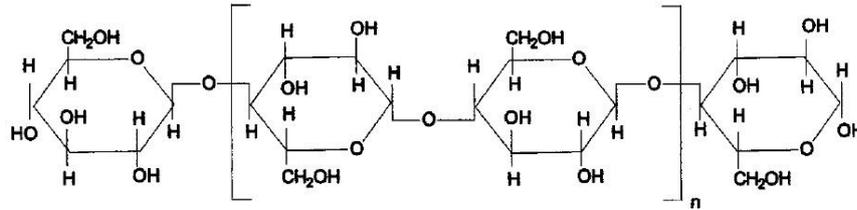
Uma fibra vegetal elementar possui comprimento que varia de 1 a 50 mm e diâmetro entre 10 e 50  $\mu\text{m}$  e são similares a tubos microscópicos, com paredes celulares ao redor do lúmen (cavidade) central. A FIG. 2.9 mostra o arranjo microestrutural das FNL. Tais paredes celulares são formadas por uma matriz de hemicelulose-lignina de composição variável reforçada por 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

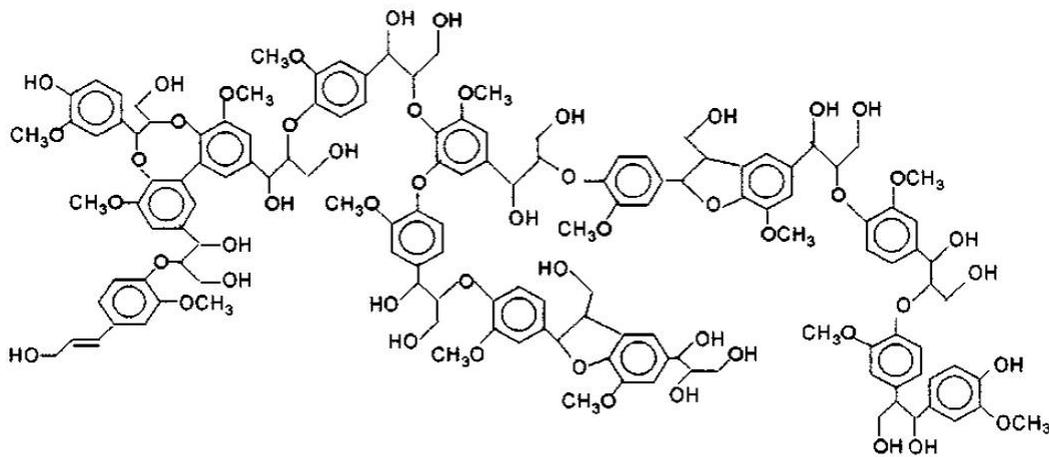
Bledzki & Gassan (1999) definem a celulose como um polímero linear formado por unidades de D-anidroglicopiranoose (também chamadas de anidrogucose ou glucose) ligadas por estruturas  $\beta$ -1,4-glicosídicas (FIG. 2.10). A hemicelulose, por sua vez, é definida como um grupo de polissacarídeos que permanece associada à celulose após a remoção da lignina (exceto a pectina). A estrutura da hemicelulose é similar à da celulose, com três diferenças essenciais: (1) Contém unidades de diferentes açúcares enquanto a celulose só possui as unidades 1,4- $\beta$ -glucopiranoose; (2) Possui alto grau de reticulação, 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.

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.

Adaptado de MOHANTY *et al.*, 2002

As moléculas de hemicelulose são unidas à celulose por ligações de hidrogênio, e agem como aglomerantes das microfibrilas, formando uma rede de celulose/hemicelulose que é considerada o principal componente estrutural da fibra. A lignina também age como aglomerante, além de aumentar 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: primária, contendo uma rede aberta e irregular de microfibrilas de celulose; e secundária, composta por três camadas, S1, S2 e S3 (FIG. 2.9). S2 é a camada mais espessa e 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. O grau de cristalinidade depende principalmente da origem da fibra. Algodão, linho, rami, sisal e banana possuem alta cristalinidade (65-70%). A cristalinidade da celulose resulta das ligações de hidrogênio entre as cadeias de celulose, ainda que existam ligações de hidrogênio também nos domínios amorfos.

Na celulose, existem muitos grupos hidroxila disponíveis para interagir com moléculas de água por ligações de hidrogênio, o que dá às FNL caráter altamente hidrofílico, dificultando a ligação na interface com a matriz polimérica hidrofóbica em compósitos de matriz polimérica (KALIA, *et al.*, 2011).

As propriedades das FNL podem variar significativamente com a composição química, diâmetro, microestrutura (incluindo ângulo microfibrilar), grau de polimerização, fração cristalina da celulose, fonte vegetal, parte do organismo vegetal de que é extraída (caule, folha, raiz, semente, entre outras) e condições de crescimento (idade, condições climáticas, processos de degradação). A TAB. 2.4 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).

Pode-se observar pela TAB. 2.4 que as fibras de curauá estão entre as FNL com melhores propriedades mecânicas, especialmente em relação à resistência específica ( $\sigma/\rho$ ), 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; OLIVEIRA *et al.*, 2012; MONTEIRO *et al.*, 2013; SPINACÉ *et al.*, 2009; TOMCZAK *et al.*, 2007).

Singh e Samanta (2015) revisaram as propriedades e utilização de fibras sintéticas de Kevlar e seus compósitos. Segundo os autores, um dos grandes desafios futuros é a substituição parcial (hibridização) do Kevlar por fibras naturais de alta resistência como juta, sisal, coco e bambu. Os principais objetivos, neste

caso, são a redução do custo destes compósitos sem perda de propriedades mecânicas e a confecção de compósitos mais ambientalmente corretos.

**TAB. 2.3** Propriedades de algumas FNL em comparação com fibras sintéticas.

<b>FNL</b>	<b>Densidade <math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência à tração <math>\sigma</math> (MPa)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>	<b>Máx. <math>\sigma/\rho</math> (MPa.cm<sup>3</sup>/g)</b>
Bambu ( <i>Bambusa vulgaris</i> )	1,03-1,21	106-204	-	493
Coco ( <i>Cocos nucifera</i> )	1,15-1,52	95-220	4-6	191
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

Adaptado de MONTEIRO, *et al.*, 2011

## 2.5.5 FIBRAS E TECIDO DE CURAUÁ

As fibras de curauá são extraídas das folhas do *Ananas erectifolius*, da família das 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 materiais inorgânico (cinzas) (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. 2.12(a) mostra a planta que dá origem às fibras de curauá. As FIG. 2.12(b) e 2.12(c) 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) fibra individual com suas microfibrilas, após fratura em tração.

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

As fibras de curauá têm grande potencial para serem utilizados em compósitos de matriz polimérica. Além de sua utilização tradicional (redes, cobertores e tapetes), as fibras de curauá têm sido largamente utilizadas em compósitos na indústria automobilística (*The Curaua Challenge*, 2009). A FIG. 2.13 mostra um item de automóvel que está sendo fabricado industrialmente com fibras de curauá.



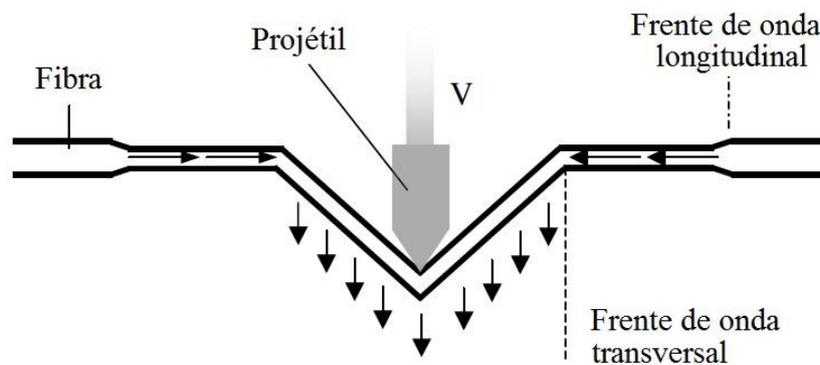
**FIG. 2.13** Visor automotivo fabricado em Nylon 6 reforçado com 20% de curauá.  
Adaptado de *The Curaua Challenge*, 2009

Monteiro *et al.*, 2015, consideraram a aplicação de compósitos epóxi-curauá como camada intermediária de uma blindagem multicamada, sendo o curauá aplicado na forma de fibras contínuas e alinhadas. Monteiro *et al.*, 2016c, por sua vez, consideraram os compósitos poliéster-curauá, nas proporções de 10, 20 e 30% em volume de fibras contínuas. Apesar da existência na literatura de dados sobre a utilização de compósitos reforçados com fibras de curauá em blindagens multicamada, não foram encontrados trabalhos que consideram os compósitos com tecidos de curauá.

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

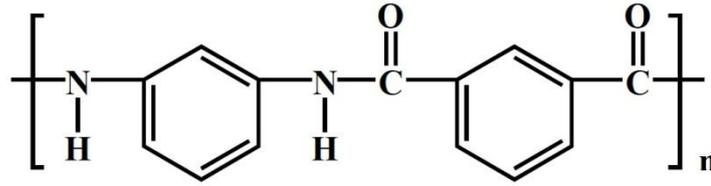
da fibra na velocidade sônica do material (EQ. 2.5). À medida que esta se propaga para longe do ponto de impacto, o material por trás da frente de onda flui para o ponto de impacto, e a fibra é defletida na direção de deslocamento do projétil, adquirindo forma de V (FIG. 2.14). O movimento transversal 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). Este carregamento leva à deformação e/ou fratura da fibra.



**FIG. 2.14** Impacto do projétil em uma única fibra.  
Adaptado de CHEESEMAN & BOGETTI, 2003

## 2.5.6 ARAMIDA

Um dos materiais mais utilizados em blindagens balísticas é a poliamida aromática ou aramida, também conhecida por seus nomes comerciais Kevlar®, Twaron® ou Technora®, dependendo do fabricante. O alto grau de alinhamento das suas cadeias moleculares resulta em boas propriedades, como alta resistência mecânica, baixa deformação até a fratura, alto módulo de Young, alta tenacidade, entre outras características. A FIG. 2.15 mostra a estrutura da Aramida.



**FIG. 2.15** Estrutura da aramida.

Fonte: Adaptado de WANG et al., 2014

## 2.5.7 MATERIAIS METÁLICOS

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 *et al.*, 2014; WILKINS, 1978).

O alumínio e suas ligas são metais que apresentam boas propriedades balísticas, além de sua resistência relativamente alta, boa ductilidade, baixo peso e baixo custo. Ligas como a 2024 T3 e 6061 T6 têm sido bastante estudadas em blindagens balísticas (GILIOLI *et al.*, 2015; KEDZIERSKI *et al.*, 2015; MOBASSERI *et al.*, 2013; SERJOUEI *et al.*, 2015; WILKINS, 1978).

## 2.6 METODOLOGIAS DE OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS

### 2.6.1 ANÁLISE DE UMA VARIÁVEL POR VEZ (UNIVARIADA)

A análise de uma variável por vez, também denominada análise univariada (FERREIRA *et al.*, 2007), é a abordagem tradicional. Corresponde ao procedimento

experimental mais difundido e usual, consistindo em variar apenas um fator por vez enquanto todos os outros são fixados. Quando o melhor valor desta variável é fixado, as outras variáveis passam então a ser consideradas. É um método com certo grau de imprecisão, pois não considera interações entre as variáveis. Na realidade, este método pode não encontrar uma solução para o problema experimental por não explorar completamente o espaço de soluções (RODRIGUES & IEMMA, 2014; BEZERRA *et al.*, 2008).

## 2.6.2 ANÁLISE MULTIVARIADA

As técnicas de análise multivariada consistem em variar um conjunto de fatores simultaneamente (RODRIGUES & IEMMA, 2014; FERREIRA *et al.*, 2007; BEZERRA *et al.*, 2008). Tem uma série de vantagens em relação à análise univariada. Entre elas, pode-se citar:

- Reduz o número de experiências ou repetições e melhora a qualidade da informação obtida através dos resultados. Isto significa uma sensível diminuição do trabalho e, conseqüentemente, do tempo e do custo final.
- Os fatores são analisados simultaneamente, sendo possível verificar e quantificar efeitos sinérgicos e antagônicos entre os fatores de interesse. Um exemplo clássico de fatores que possui interação entre si é o binômio tempo-temperatura. Se analisarmos separadamente cada um deles, não é atingida condição otimizada, pois não se detecta interação entre eles.
- É possível otimizar mais de uma resposta ao mesmo tempo.
- Permite calcular e avaliar o erro experimental, o que é fundamental para especificar o nível de confiança estatística e a reprodutibilidade do resultado desejado.

Na análise multivariada é comum que os níveis das variáveis sejam manipulados na sua forma codificada. Por exemplo, em um experimento em que a temperatura de sinterização de uma cerâmica é uma variável de interesse, três temperaturas são

estudadas, e os níveis são definidos em 1400, 1450 e 1500°C. Neste caso, 1400°C é tratado como nível mínimo, denominado -1, 1450°C o nível médio, tratado como nível 0, e 1500°C o nível alto, +1. A variável codificada pode ser obtida pela EQ. 2.8:

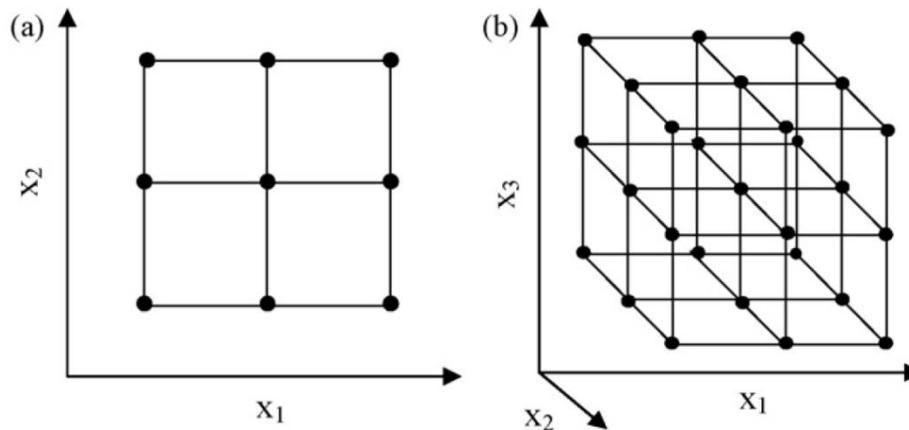
$$c_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\delta} \quad \text{EQ. 2.8}$$

Onde:  $x_i$  é o valor da variável em qualquer nível;  $\bar{x}$  é o valor da variável no nível médio;  $\delta$  é o módulo da diferença entre os valores.

Entre as principais técnicas de análise multivariada estão os experimentos fatoriais completos e fracionários, o delineamento composto central rotacional (DCCR), e o delineamento experimental de Box-Behnken, que tem sido utilizado para otimizar processos químicos instrumentais (FERREIRA *et al.*, 2007) e também propriedades de placas balísticas de compósitos reforçados com fibras naturais (AKUBUE, IGBOKWE & NWABANNE, 2015). Estas técnicas serão discutidas nos tópicos a seguir. Também serão discutidos dois métodos importantes para todas as técnicas de análise multivariada, a regressão múltipla e a metodologia de superfície de respostas (MSR).

### 2.6.2.1 DELINEAMENTOS FATORIAIS COMPLETOS

Os delineamentos fatoriais completos buscam o melhor resultado por meio de uma matriz, onde todas as combinações são investigadas até obtenção de uma solução final (RODRIGUES & IEMMA, 2014). Em outras palavras, todo o espaço experimental é explorado. A FIG. 2.16 mostra a matriz experimental do planejamento fatorial completo para experimentos com dois e três fatores, ambos em três níveis de cada variável.



**FIG. 2.16** Espaço experimental de um estudo utilizando o planejamento fatorial completo para otimização de (a) duas variáveis e (b) três variáveis.

BEZERRA *et al.*, 2008

O planejamento fatorial completo não é aconselhável quando o número de fatores ultrapassa 2, quando o número de experimentos necessários para a completa análise se torna muito grande. Este número pode ser calculado pela EQ. 2.9.

$$N = n^k \quad \text{EQ. 2.9}$$

Onde: N é o número de experimentos; k é o número de variáveis independentes ou fatores e n o número de níveis.

No caso de 3 fatores e 3 níveis, o número mínimo de experimentos é 27. Nestes casos o fatorial completo é geralmente substituído por delineamentos mais eficientes como o DCCR, Box-behken e Doehlert (BEZERRA *et al.*, 2008).

Um atenuante para o problema do rápido crescimento do número de ensaios em fatoriais completos por ser obtido selecionando-se os fatores e/ou níveis através de delineamentos prévios (*screening designs*) executados com base em fatoriais incompletos, denominados fatoriais fracionários (RODRIGUES & IEMMA, 2014).

### 2.6.2.2 DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL (DCCR)

O delineamento composto central rotacional (DCCR) foi apresentado por Box e Wilson em 1951 (BEZERRA *et al.*, 2008). Veio como solução para os seguintes problemas:

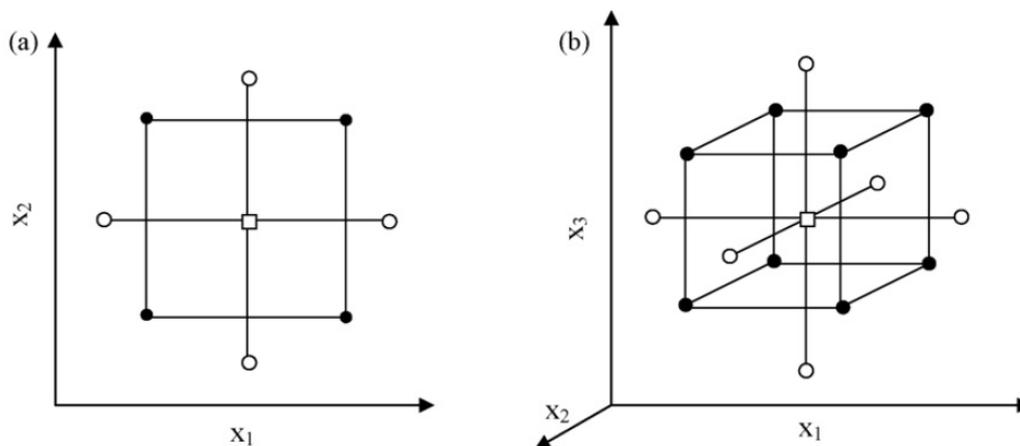
- Em alguns casos, como no fatorial completo  $2^2$ , não há graus de liberdade para o resíduo, não existindo a possibilidade de se estimar o erro padrão. Isto significa que não se pode tecer qualquer inferência estatística sobre as respostas, e assim, o objetivo de se obter informação sobre a população da qual a amostra foi extraída fica comprometido. Para resolver este problema, acrescenta-se ao planejamento ensaios no ponto central, viabilizando o cálculo dos resíduos, do erro padrão e das estimativas por intervalo de confiança, que são bases da inferência estatística.
- Muitas vezes tem-se o interesse em ajustar às respostas experimentais um modelo de segunda ordem, que tem a forma:

$$y = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 \quad \text{EQ. 2.10}$$

Onde:  $y$  é a variável resposta;  $\alpha$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_{11}$ ,  $\beta_{12}$  e  $\beta_{22}$  são constantes;  $x_1$  e  $x_2$  são variáveis independentes ou fatores.

Em tais situações, uma alternativa interessante consiste em adicionar pontos axiais ao fatorial  $2^k$ , como mostrado na FIG. 2.17, que podem ser escolhidos de várias maneiras. O mais comum é utilizar pontos do tipo  $\pm\alpha$ , onde  $\alpha = (2^k)^{1/4}$ .

A adição dos pontos centrais e axiais dá origem ao delineamento composto central rotacional (DCCR).



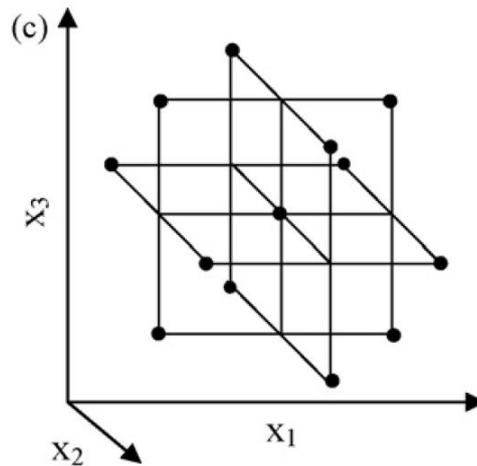
(●) Pontos fatoriais; (○) Pontos axiais; (□) Ponto central.

**FIG. 2.17** Espaço experimental de um estudo utilizando o delineamento composto central rotacional para otimização de (a) duas variáveis e (b) três variáveis.

BEZERRA *et al.*, 2008

### 2.6.2.3 DELINEAMENTO DE BOX-BEHNKEN (DBB)

Box e Behnken, em 1960, sugeriram uma forma de se selecionar pontos para um experimento fatorial com três níveis, que permitisse a estimativa dos coeficientes de primeira e segunda ordens do modelo matemático. Este modelo desenvolvido é mais eficiente e econômico que os correspondentes fatoriais completos ( $3^k$ ), para diferentes números de variáveis (BEZERRA *et al.*, 2008). No delineamento de Box-Behnken, os pontos experimentais estão distribuídos em três fatoriais  $2^2$  interconectados, possuindo um ponto central (FIG. 2.18).



**FIG. 2.18** Espaço experimental de um estudo utilizando o delineamento de Box-Behnken para otimização de três variáveis.

BEZERRA *et al.*, 2008

O número de experimentos do delineamento de Box-Behnken pode ser calculado pela equação:

$$N = 2k(k - 1) + C_0 \quad \text{EQ. 2.11}$$

Onde:  $k$  é o número de fatores e  $C_0$  o número de pontos centrais.

A comparação entre delineamento de Box-Behnken com o DCCR e o fatorial completo  $3^k$  mostra que o Box-Behnken é mais eficiente para delineamentos com 3 níveis. Outra vantagem é a ausência de pontos extremos, ou seja, não há a combinação dos fatores quando todos estão nos seus valores máximos ou mínimos (FERREIRA *et al.*, 2007).

A matriz experimental de Box-Behnken com as variáveis codificadas é apresentada na TAB. 2.5. Esta matriz define quais experimentos são necessários para completa realização do delineamento e da inferência estatística. Além disto, permite as análises estatísticas posteriores de definição do modelo matemático (regressão múltipla) e do gráfico das superfícies de resposta, que serão analisados nas seções posteriores. Deve-se observar ns TAB. 2.5 que os pontos (0,0,0) são os pontos centrais, que devem se feitos, no mínimo, em triplicata.

**TAB. 2.4** Matriz experimental de Box-Behnken.

Fator 1	Fator 2	Fator 3
-1	-1	0
1	-1	0
-1	1	0
1	1	0
-1	0	-1
1	0	-1
-1	0	1
1	0	1
0	-1	-1
0	1	-1
0	-1	1
0	1	1
0	0	0
0	0	0
0	0	0

Adaptado de FERREIRA *et al.*, 2007

O delineamento de Box-Behnken já foi utilizado na otimização das propriedades parâmetros de processamento de um compósito de polietileno reforçado com fibras naturais de Kenaf, para utilização em blindagens balísticas (AKUBUE, IGBOKWE & NWABANNE, 2015). Os parâmetros de processamento: temperatura, tempo de moldagem e fração volumétricas das fibras foram estudados com a finalidade de obter máxima resposta de resistência à tração e flexão. Os compósitos com propriedades otimizadas passaram por teste balístico, obtendo proteção satisfatória para o nível IIIA.

#### 2.6.2.4 REGRESSÃO MÚLTIPLA E METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTAS (MSR)

Na análise de regressão múltipla, elabora-se um modelo estatístico para estudar, objetivamente, a relação entre as variáveis independentes e a variável resposta (dependente). Utilizando-se este modelo, pode-se prever o valor assumido pela variável dependente em função do conhecimento das variáveis independentes (BARBETTA, REIS e BORNIA, 2010, VIEIRA, 2006).

Seja  $Y$  uma variável quantitativa contínua e  $X_1, X_2, \dots, X_k$  variáveis quantitativas ou indicadoras de certos atributos. A análise de regressão múltipla parte de um conjunto de observações  $(x_{11}, x_{21}, \dots, x_{k1}, y_1), (x_{12}, x_{22}, \dots, x_{k2}, y_2), \dots, (x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{kn}, y_n)$  relativas às variáveis  $X_1, X_2, \dots, X_k$  e  $Y$ . Pode-se dizer que um dada observação  $Y$  depende, parcialmente, dos correspondentes valores de  $x_1, x_2, \dots, x_k$  e de uma infinidade de outros fatores representados pelo termo erro,  $\varepsilon$ . Assim, o seguinte modelo para as observações pode ser proposto (BARBETTA, REIS e BORNIA, 2010):

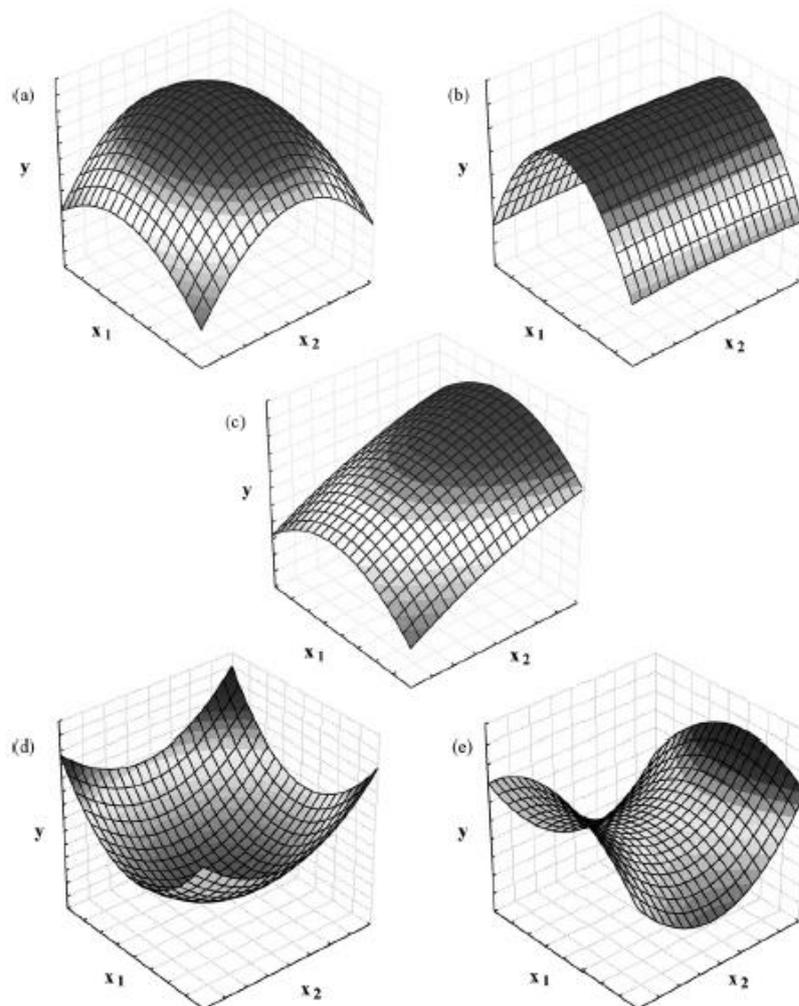
$$Y_i = \alpha + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad \text{EQ. 2.12}$$

Onde:  $\alpha, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  são parâmetros a serem estimados com os dados e  $\varepsilon_i$  representa o efeito (erro) aleatório da  $i$ -ésima observação. A EQ. 2.12 toma por suposição que as variáveis independentes  $X_1, X_2, \dots, X_k$  não devem ter correlações altas entre si. Se houver correlações, um modelo do tipo da EQ. 2.10 deve ser utilizado.

O parâmetro  $R^2$  indica que, na amostra observada, cerca de  $100 \cdot R^2$  % da variação de  $Y$  podem ser explicados por uma relação linear que envolve  $X_1, X_2, \dots, X_k$ . A análise de variância fornece o resultado estatístico da seguinte hipótese nula:  $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k$ . Pela hipótese  $H_0$ , o conjunto de variáveis independentes em estudo não tem poder de explicação sobre a variável dependente. Para verificar a significância das variáveis independentes no resultado, os parâmetros  $F$  da distribuição de Fisher-Snedecor e o  $p$ -valor são calculados. Se  $F > F_c$  (crítico), rejeita-se  $H_0$ , indicando que as variáveis independentes escolhidas são significativas

para explicar a variância de  $Y$ . Em relação aos coeficientes estimados, se algum dos  $p$ -valores for menor que o nível de significância, tal variável independente pode ser excluída do modelo (BARBETTA, REIS e BORNIA, 2010; VIEIRA, 2006).

A metodologia de superfície de resposta (MSR), por sua vez, consiste na representação gráfica do modelo estatístico obtido na etapa de regressão múltipla. Com ela, os resultados são expressos de forma mais clara e de fácil entendimento. A FIG. 2.19 mostra alguns exemplos de superfícies de respostas comuns em modelos quadráticos (BEZERRA *et al.*, 2008).



**FIG. 2.19** Exemplos de curvas de superfície de resposta gerados a partir de um modelo quadrático da otimização de duas variáveis: (a) máximo; (b) platô; (c) máximo fora da região experimental; (d) mínimo; (e) superfície contendo ponto de sela.

BEZERRA *et al.*, 2008

Vários autores têm se dedicado a otimizar o desempenho balístico de blindagens compósitas bicamada por meio do controle da espessura. Na maioria dos trabalhos analisados, a otimização se baseou em modelos analíticos, mas também foram encontrados trabalhos que se basearam em métodos estatísticos e em medições experimentais. Florence (1969) foi provavelmente o primeiro a desenvolver um método de otimização em blindagens compósitas. Seguiu-se de Wilkins (1978) que analisou e modelou o comportamento de SBMs submetidos ao impacto balístico, num sistema composto por uma camada frontal de alumina unida a placa posterior de alumínio. Utilizando um modelo simples, buscou correlacionar as propriedades de cada camada com seu comportamento balístico.

Hetherinton (1992) aplicou um modelo analítico para prever a razão de espessuras que resulta no melhor desempenho balístico de blindagens compósitas de alumina-alumínio. A razão obtida no modelo foi de  $h_1/h_2 = 4\rho_2/\rho_1 = 2,9$ , onde  $h_1$  e  $h_2$  são as espessuras da camada frontal e posterior, respectivamente,  $\rho_1$  e  $\rho_2$  as densidades. O modelo teve boa aproximação do valor 3,1 obtido experimentalmente ao submeter os alvos ao impacto com munição 7,62 mm perfurante (AP).

Ben-Dor *et al.* (2005) utilizaram o modelo analítico de Florence (1967) para verificar a espessuras ótimas para obter o máximo limite balístico. As condições otimizadas foram encontradas, e os autores observaram que nas suas vizinhanças também eram obtidos resultados satisfatórios.

Fawaz, Behdinan e Xu (2006) utilizaram o modelo de Florence (1967) para buscar as condições ótimas de uma blindagem compósita submetida ao impacto em altas velocidades. Os autores desenvolveram uma nova solução para o modelo que pode incluir restrições tanto de combinações de materiais quanto de espessuras. Shi e Grow (2007) desenvolveram trabalho similar, mas as restrições estudadas foram a espessura total e a mínima densidade superficial. Ben-Dor, Dubinsky e Elperin (2009) aplicaram estas mesmas restrições no modelo de Florence, realizando estudo adicional para mais de um impacto balístico.

Yong *et al.* (2010) utilizaram um modelo em elementos finitos em que era possível adicionar, aos poucos e em cada etapa, maior complexidade nas malhas. Isto permite obter resultados preliminares e diminuir o custo do processamento.

Kim, Yoo e Lee (2012) otimizaram as espessuras de blindagens de placas de satélites que devem ser submetidas a impactos com hiper-velocidade. Foram

utilizados o métodos de elementos finitos, técnicas de planejamento de experimentos e a metodologia de superfície de respostas para obter os resultados.

Serjouei *et al.* (2015) utilizaram um modelo semi-analítico (BLV) e sua solução pelo método de elementos finitos para maximizar o limite balístico de uma blindagem alumina-alumínio, minimizando a espessura máxima e densidade superficial.

De todos os trabalhos analisados, não foi encontrado algum que se propusesse a otimizar as espessuras em blindagens compósitas com mais de duas camadas. No presente trabalho, serão utilizadas técnicas estatísticas para realizar a otimização de uma blindagem com três camadas. SBMs com três camadas têm sido objeto de estudos (MONTEIRO *et al.*, 2014; 2015; 2016; 2016a; 2016b; 2016c; LUZ *et al.*, 2015; ROHEN *et al.*, 2015) e se constituem em soluções eficientes contra munições de alta energia, como as de classe III.

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 para caracterização dos materiais e amostras testadas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

##### 3.1.1 TECIDO DE CURAUÁ

Neste trabalho foi utilizado tecido de curauá (FIG. 3.1) tipo manta adquirido da empresa Pematec Triangel do Brasil Ltda. Para a fabricação dos compósitos, o tecido foi cortado nas dimensões do molde metálico (120 x 150 mm), para alvo balístico e os recortes levados à estufa por 24h, a 60°C.



**FIG. 3.1** Aspecto geral do tecido de curauá.

##### 3.1.2 RESINA EPOXÍDICA

A matriz polimérica utilizada na preparação dos compósitos foi a resina epoxídica diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA), designada comercialmente como

“Resina 610”, adquirida da empresa Resinpoxy Ltda. O endurecedor escolhido foi uma amina alifática denominada trietileno tetramina (TETA), adicionada à resina na proporção de 13% em peso, por recomendação do fabricante, com a finalidade de promover a reticulação da resina.

Segundo Moura *et al.* (2011) as resinas DGEBA formam redes de alta resistência mecânica e à abrasão, baixa contração na cura (2 a 3%), baixa absorção de água e temperaturas de trabalho tipicamente entre 100 e 220°C.

### 3.1.3 CERÂMICA (ALUMINA E NIÓBIA)

A cerâmica utilizada neste trabalho foi produzida a partir dos pós de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 96% em peso) e nióbia ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , 4% em peso). O pó de alumina foi adquirido da empresa Treibacher Schleifmittel Brasil Ltda, e o de nióbia, fornecido pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM). As TAB. 3.1 e 3.2 mostram a composição química dos pós de alumina e nióbia, respectivamente.

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.

**TAB. 3.1** Composição química da Alumina.

<b>Elemento</b>	<b>Concentração (%)</b>	<b>Especificação (%)</b>
$\text{Al}_2\text{O}_3$	99,4	Min. 99,1
$\text{SiO}_2$	0,04	Máx. 0,06
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,04	Máx. 0,06
$\text{Na}_2\text{O}$	0,11	Máx. 0,15
$\text{MgO}$	0,03	---
Umidade a 300°C	0,2	Máx. 0,5
Outros	0,18	---

**TAB. 3.2** Composição química da Nióbia.

Elemento	Concentração (%)
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	99,5

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

### 3.1.4 TECIDO DE ARAMIDA

O tecido de aramida utilizado neste trabalho, de trama S745 e gramatura 0,460 kg/m<sup>2</sup> (Fig. 3.2a), foi adquirido da empresa LFJ Blindagens, Comércio e Serviços S.A (Conquext), sob a forma de painéis de 8 camadas de tecido impregnadas com borracha cloroprênica (modelo MENEOKV08). Para obtenção da espessura desejada, vários painéis MENEOKV08 foram unidos com adesivo de poliuretano.



**FIG. 3.2** Aspecto geral do tecido de aramida.

### 3.1.5 LIGA DE ALUMÍNIO

A liga de alumínio 5052 H34 foi fornecida pela empresa Metalak Metais Ltda. Na forma de placas com 120 x 150 mm em três níveis de espessura (3, 5 e 7 mm). Os valores nominais de resistência à tração, limite de escoamento, ductilidade da liga são mostrados na TAB. 3.3. A composição química nominal, por sua vez, é mostrada na TAB. 3.4.

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

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>	<b>Especificação</b>
Resistência à tração (MPa)	249	Min. 235 Max. 285
Limite de Escoamento (MPa)	205	Min. 180
Ductilidade (%)	10	Min. 10

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

<b>Elemento</b>	<b>Concentração (%)</b>	<b>Especificação<sup>1</sup> (%)</b>
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

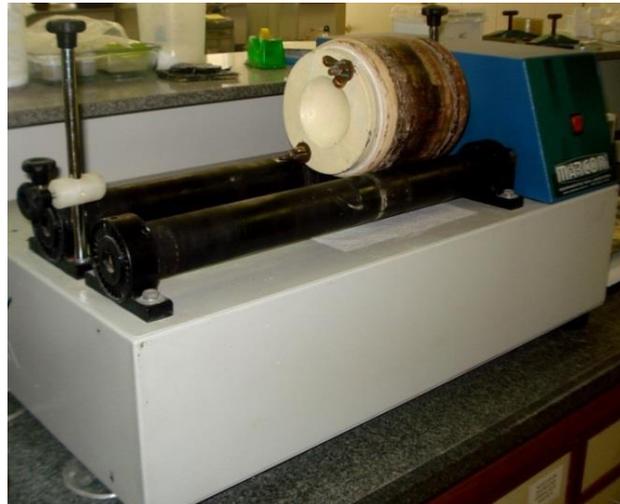
<sup>1</sup>Fonte: ASM Aerospace Specification Metals Inc., 2015.

## 3.2 MÉTODOS DE FABRICAÇÃO

### 3.2.1 FABRICAÇÃO DAS PASTILHAS CERÂMICAS

#### 3.2.1.1 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 polietileno glicol líquido (11,3g, 1,53%p) foram misturados em um moinho com bolas de alumina, modelo MA 500 (FIG. 3.3), por 8 horas. O moinho está disponível no Laboratório de Materiais Cerâmicos do IME.



**FIG. 3.3** Moinho de bolas MARCONI MA500.

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

### 3.2.1.2 PRENSAGEM DO PÓ

O pó cerâmico peneirado em quantidades distintas (dependendo da espessura desejada, 80, 100 ou 120 g) foi prensado em matriz hexagonal (FIG. 3.4), formada por dois punções e uma camisa flutuante (FIG. 3.4a). Um par de calços foi utilizado para manter a camisa na posição correta (FIG. 3.4b). Uma carga de 12 toneladas, equivalente a 30 MPa, foi aplicada, com o auxílio da prensa hidráulica semiautomática Nowak (FIG. 3.5), disponível no laboratório de Fundição e Tratamentos Termomecânicos do IME.



**FIG. 3.4** Matriz utilizada na moldagem dos corpos cerâmicos. (a) Peças individuais; (b) Conjunto montado, pronto para receber a carga.



**FIG. 3.5** Prensa hidráulica semiautomática Nowak, com capacidade para 30 toneladas.

### 3.2.1.3 SINTERIZAÇÃO DAS PEÇAS CERÂMICAS

As pastilhas cerâmicas “verdes” foram sinterizadas em forno INTI, modelo FE 1700 (FIG. 3.6), disponível no Laboratório de Materiais Cerâmicos do IME. A rota de sinterização, concebida para proporcionar uma adequada evaporação do ligante orgânico, foi desenvolvida por TRINDADE *et al.*, 2013, e é 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.

Após a evaporação do ligante, a composição do material passa a ser 96% de Alumina e 4% de Nióbia.



**FIG. 3.6** Forno INTI FE 1700, utilizado na sinterização das pastilhas cerâmicas.

Neste trabalho foi medida a espessura, densidade e densificação dos corpos cerâmicos, para controle da qualidade. A densidade ( $\rho$ ) foi avaliada pela relação entre a massa ( $m$ ) e o volume ( $V_p$ ) da cerâmica sinterizada (EQ. 3.1).

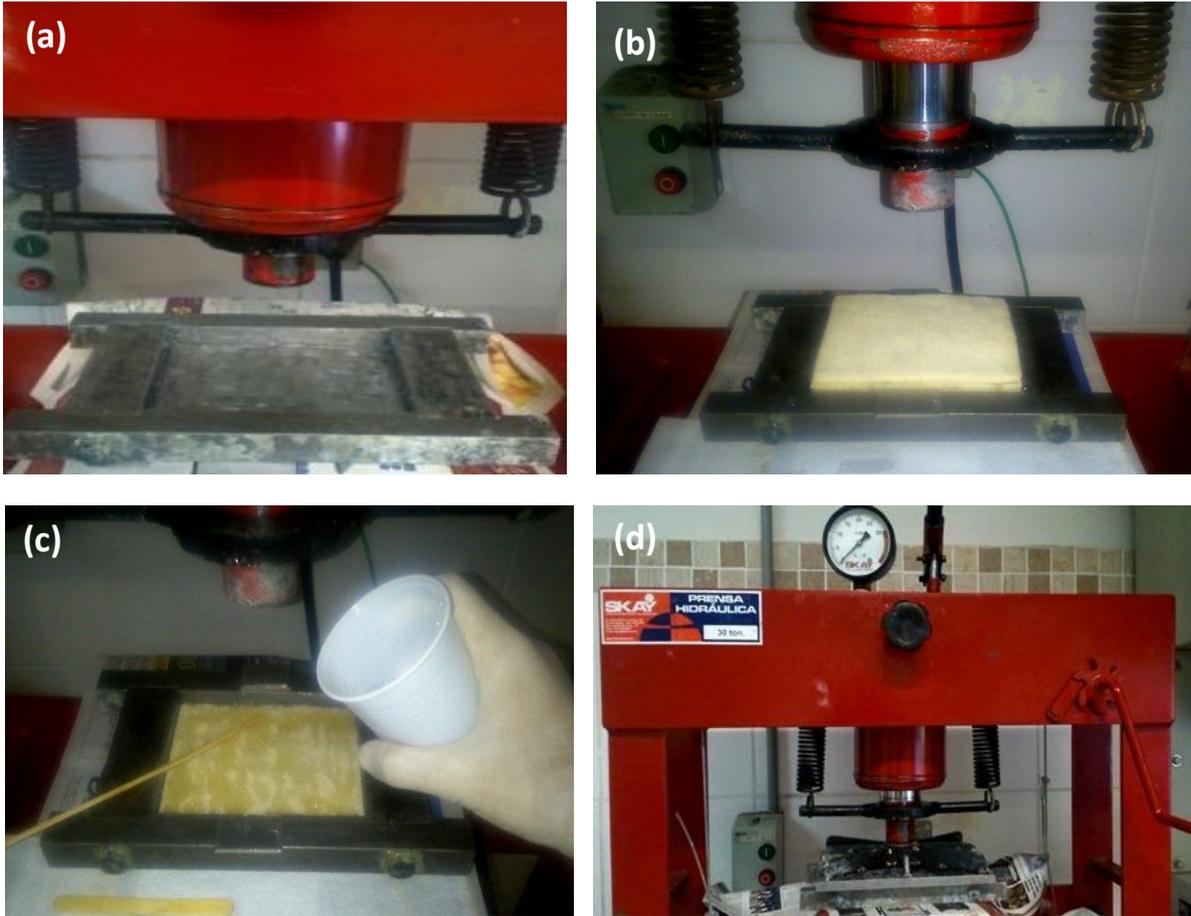
$$\rho_v = \frac{m}{V_p} \quad \text{EQ. 3.1}$$

### 3.2.2 FABRICAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Os compósitos reforçados com tecido de curauá foram preparados na proporção de 30% em volume, pois estes tiveram o melhor resultado para fibras de curauá em trabalhos anteriores (MONTEIRO *et al.*, 2015; MONTEIRO *et al.*, 2016c). A massa de epóxi a ser utilizada no molde levou em consideração os dados de densidade da resina DGEBA/TETA encontrados na literatura (GARCIA *et al.*, 2007; POLYMER DATABASE, 2016), e verificados experimentalmente, com a medição da densidade geométrica da placa de epóxi puro (1,1 g/cm<sup>3</sup>).

No caso do tecido de curauá, partiu-se do pressuposto que sua densidade é a mesma da fibra, ou seja, admite-se que na fabricação do compósito a resina penetra os espaços vazios do tecido (entre as fibras e nos poros abertos das fibras). A densidade do curauá é 0,996 g/cm<sup>3</sup>, conforme medido por Simonassi *et al.*, 2012, é próximo do valor 1,1 ±0,9 g/cm<sup>3</sup> obtido por SPINACÉ, *et al.*, 2009. Assim, a densidade teórica do compósito com 30% de tecido de curauá seria 1,07 g/cm<sup>3</sup>, segundo a regra das misturas (CALLISTER & RETHWISCH, 2012).

Para a preparação dos compósitos, o tecido de curauá foi cortado em fragmentos, e estes foram secos em estufa a 60°C por 24h. Os compósitos foram preparados por prensagem uniaxial em matriz metálica (FIG. 3.7), à temperatura ambiente (25°C), adicionando-se a resina epóxi e os recortes de tecido em camadas na cavidade da matriz (FIG. 3.7b e 3.7c). A mistura foi mantida sob pressão de 5 MPa por 24h, com o auxílio da prensa hidráulica Skay (FIG. 3.7d), disponível no laboratório de materiais cerâmicos do IME. Exemplo de uma placa de compósito produzido é mostrada na FIG. 3.8.



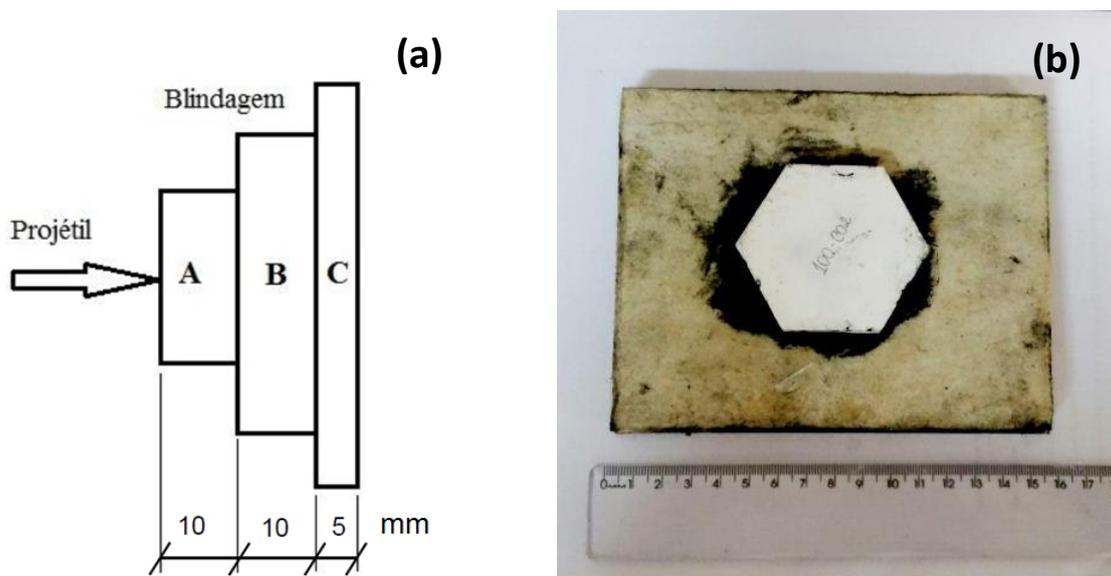
**FIG. 3.7** Etapas da fabricação dos compósitos: (a) lubrificação da matriz; (b) posicionamento do tecido; (c) vazamento da resina; (d) prensagem.



**FIG. 3.8** Placa de compósito epóxi-curauá produzida por prensagem uniaxial a frio.

### 3.2.3 FABRICAÇÃO DAS PLACAS BALÍSTICAS MULTICAMADA

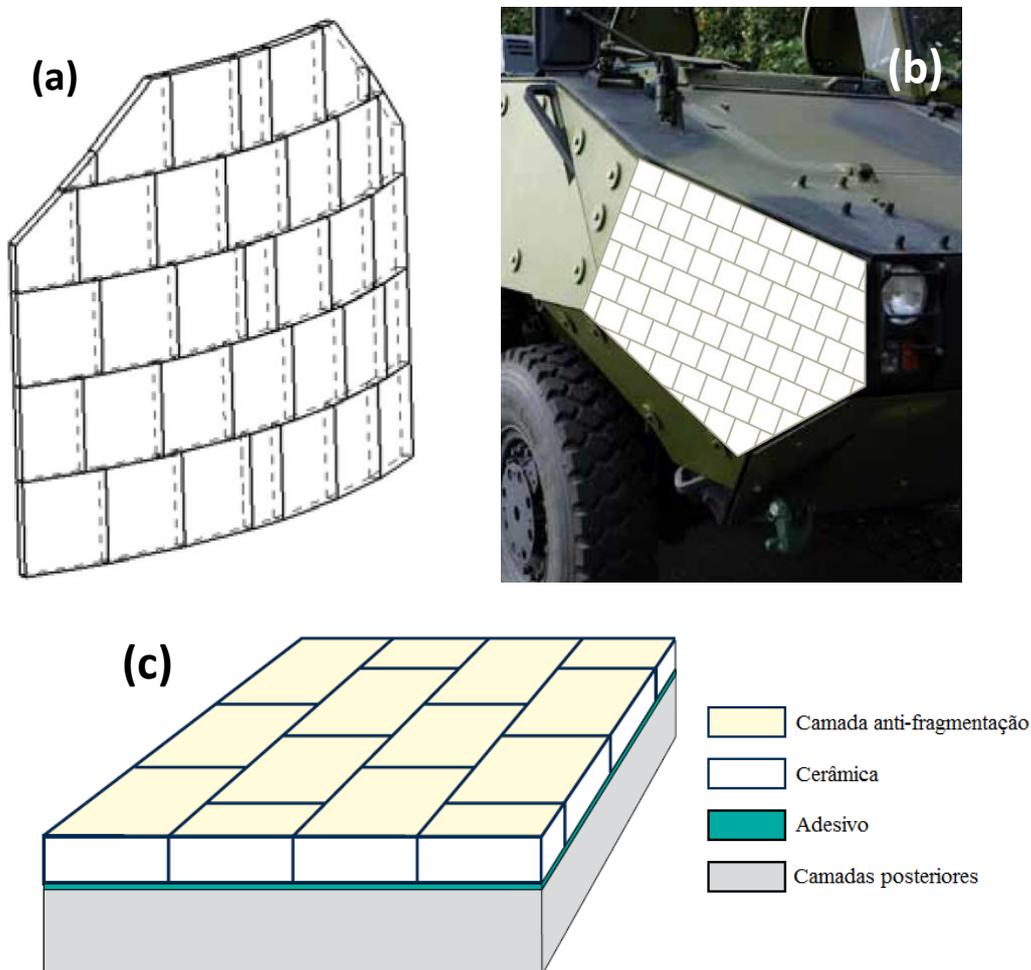
Blindagens multicamada são formadas pela sobreposição de duas ou mais camadas de materiais distintos. Neste trabalho, as camadas de cerâmica, compósito e alumínio foram unidas pela colagem, com o auxílio de um adesivo de poliuretano. A FIG. 3.9 mostra o esquema de montagem de uma blindagem multicamada e o corpo de prova final obtido. As espessuras indicadas na FIG. 3.9(a) têm sido utilizadas em recentes trabalhos contra munição 7,62 mm. A otimização destes valores de espessura é o principal objetivo da presente investigação.



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

Este tipo de corpo-de-prova foi projetado com base na utilização prática das placas balísticas. Nesta situação, o material cerâmico, devido à sua característica de fratura frágil e total fragmentação no impacto, é bastante utilizado na forma de um mosaico de pastilhas (FIG. 3.10). Assim, espera-se que somente a cerâmica que recebe o impacto seja fragmentada (e alguma das mais próximas, dependendo da energia de impacto), permitindo a proteção contra múltiplos impactos. Além disso, como é realizado apenas um disparo contra cada corpo-de-prova (garantindo a

condição inicial conhecida de cada um), apenas uma pastilha cerâmica foi posicionada no centro da cada placa. Este é considerado o cenário mais severo, uma vez que o confinamento da pastilha cerâmica em um mosaico resulta em melhor absorção de energia e redução no trauma transmitido ao usuário (JIUSTI *et al.*, 2017).



**FIG. 3.10** Figuras esquemáticas de placas de blindagem multicamada com mosaico cerâmico: (a) placa rígida de colete; (b) interior da carcaça de aço de um carro de combate; (c) descrição das camadas.

Adaptado de CERAMTECH ETEC GMBH, 2010

As dimensões das pastilhas, a sua forma (plana, convexa, forma geométrica), bem como a presença da camada anti-fragmentação afetam o desempenho balístico da camada cerâmica (HAZELL, ROBERSON & MOUTINHO, 2008; CHAGAS, 2014).

A camada anti-fragmentação pode ser uma camada de tecido de aramida, por exemplo. No entanto, neste trabalho foi avaliada apenas sua espessura, sendo as outras variáveis fixadas (pastilha hexagonal com ~60 cm entre arestas, com camada anti-fragmentação, com face de impacto plana).

### 3.3 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO

#### 3.3.1 MEDIDA DA ESPESSURA, DENSIDADE VOLUMÉTRICA E SUPERFICIAL DAS CAMADAS

Para fins de controle de qualidade das camadas, e para estimativa do peso resultante dos materiais, as pastilhas cerâmicas, placas de compósito e de alumínio, tiveram suas dimensões e massa medidas. As dimensões (comprimento, largura e espessura) foram medidas com o auxílio de um paquímetro Mitutoyo, e a massa foi medida utilizando uma balança analítica Gehaka AG 200. Foi calculada a densidade pela EQ. 3.1, e a densidade superficial ( $D_{sup}$ ) pela EQ. 3.2.

$$D_{sup} = \rho_v t \quad \text{EQ. 3.2}$$

Onde:  $\rho_v$  é a densidade volumétrica (geométrica do material) e  $t$  é a espessura do material.

A cerâmica, devido à sua maior porosidade, teve sua densidade medida com maior precisão através da pesagem hidrostática (método de Arquimedes), de acordo com a norma ABNT NBR 6220:2011. Neste ensaio, as peças cerâmicas são mantidas em água fervente por 1 hora, sob agitação, para entrada de água em sua estrutura. Após isto, tiveram sua massa imersa ( $m_i$ ) medida com o auxílio de um dispositivo especial (Figura 3.11).



**FIG. 3.11** Dispositivo especial para medição da massa imersa da cerâmica através do princípio de Arquimedes.

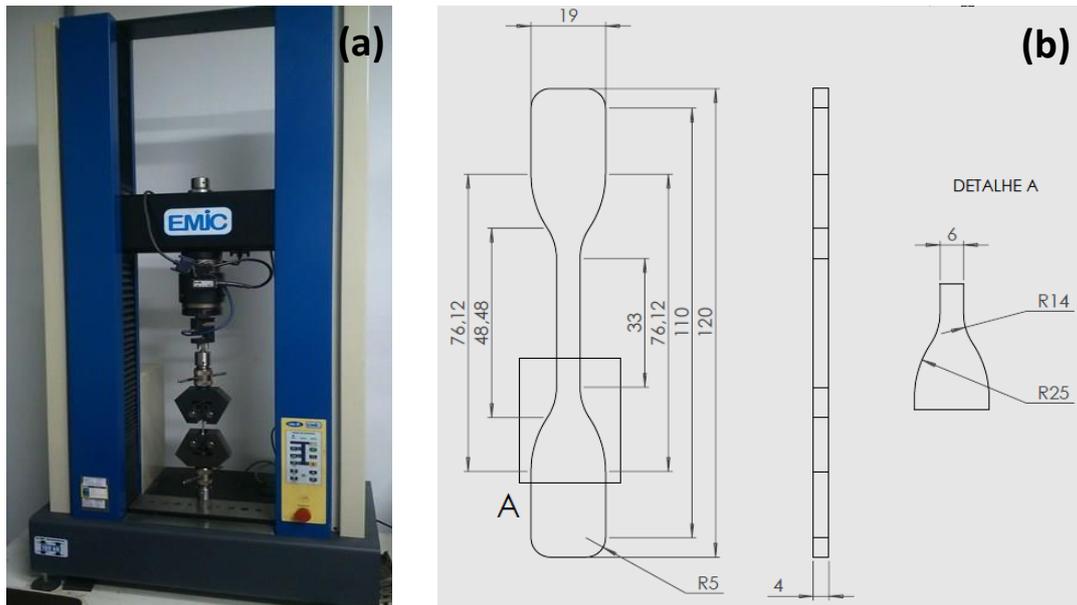
Outras medidas foram realizadas, como a massa úmida ( $m_u$ ), após secagem da peça com papel, e massa seca ( $m_s$ ), após secagem em estufa por 1h. Utilizando os valores medidos, pode-se calcular a densidade volumétrica ( $\rho_v$ ) aparente da cerâmica pela EQ. 3.3.

$$\rho_v (g/cm^3) = m_s \frac{\rho_a}{(m_u - m_i)} \quad \text{EQ. 3.3}$$

Onde:  $\rho_a = 1 \text{ g/cm}^3$  = densidade da água.

### 3.3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

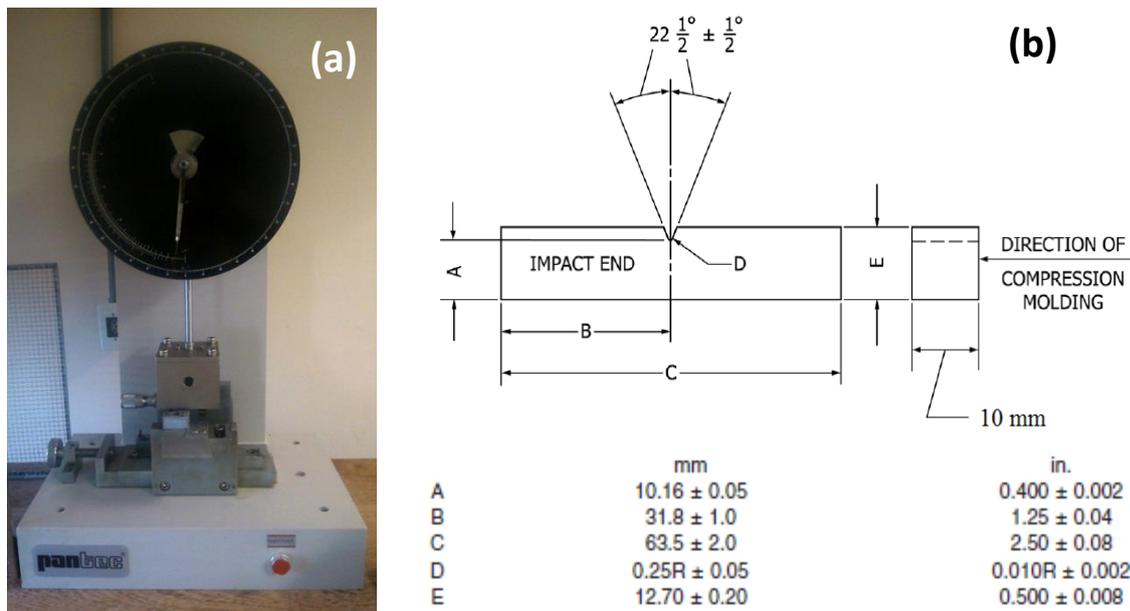
O ensaio de tração do compósito foi realizado utilizando a máquina de ensaios EMIC 60 DL10000 (FIG. 3.12a), a uma velocidade de 3mm/min (taxa de deformação  $4,5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ), utilizando uma célula de carga de 10 kN. Foram ensaiados corpos de prova fabricados segundo a norma ASTM D638 (FIG. 3.12b). O equipamento de ensaio está disponível no Laboratório de Ensaios Mecânicos do IME.



**FIG. 3.12** Ensaio de tração: equipamento para realização dos ensaios modelo DL10000 EMIC; (b) Corpo-de-prova segundo a ASTM D638 (dimensões em mm).

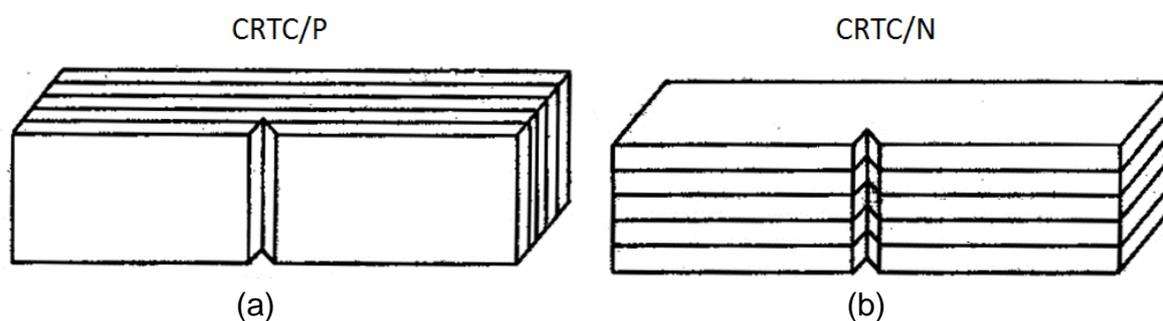
### 3.3.3 ENSAIO DE IMPACTO

Ensaio de impacto Izod foram realizados para avaliar a tenacidade ao impacto do compósito. Foi utilizada uma máquina Pantec, modelo CH/IZ-25 (FIG. 3.13a), utilizando um martelo de 22J, à temperatura ambiente ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ). As amostras retangulares (65 x 12 x 12 mm) foram produzidas utilizando as dimensões especificadas pela norma ASTM D256 (FIG. 3.13b).



**FIG. 3.13** Ensaio de impacto: (a) Equipamento ensaios Charoy/Izod modelo CH/IZ-25 da Pantec; (b) Corpo-de-prova segundo a ASTM D256.

Como a orientação do entalhe (e do carregamento) poderia influenciar a resistência ao impacto do material, foram confeccionados corpos de prova do compósito (30% de tecido de curauá) com entalhe normal (CRTC/N) ou paralelo ao plano do tecido (CRTC/P), como mostra a FIG. 3.14.



**FIG. 3.14** Orientação do entalhe em relação ao plano do tecido no compósito.

Em trabalho anterior (BRAGA *et al.*, 2017), foram examinados compósitos reforçados com 30%vol. de fibras contínuas e alinhadas de curauá com entalhe normal (CRFC/N) ou paralelo (CRFC/P) ao eixo das fibras. Estes resultados foram utilizados para comparação em relação aos resultados de tecido de curauá.

### 3.3.4 ENSAIO DE DUREZA

Para controle da qualidade das placas alumínio, a dureza Rockwell Superficial das placas de alumínio de diferentes espessuras foi medida. Foi utilizado Durômetro Pantec modelo RBSM (FIG. 3.15), na escala 15T, com indentador esférico de aço endurecido de 1,59 mm, pré-carga de 3 kgf e carga de 15 kgf. O equipamento está disponível no laboratório de ensaios mecânicos do IME. Foram realizadas 6 medidas de dureza em cada placa.



**FIG. 3.15** Durômetro Rockwell Pantec RBSM.

Este ensaio foi selecionado por ser uma análise rápida, não-destrutiva e que possibilita o controle da qualidade deste material integrante dos SBMs de forma simples e eficaz. Além disso, outros métodos de ensaio de dureza como Brinell ou Rockwell comum não permitiram o teste da placa de 3 mm. Assim, considerou-se a escala Rockwell superficial a mais adequada. As propriedades mecânicas em tração de uma das placas da liga já foi medida em trabalhos anteriores (BRAGA, 2015).

### 3.3.5 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG/DTG)

A estabilidade térmica das fibras de curauá, da rede epoxídica e do compósito foi estudada com o auxílio da análise termogravimétrica (TG/DTG). Este estudo foi feito para verificar a temperatura de trabalho do compósito. Foi utilizado o analisador termogravimétrico Q500, da empresa TA Instruments, na faixa de 25 a 700°C, em taxa de 10°C/min, em atmosfera de nitrogênio.

### 3.3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV/EDS)

Após os ensaios, com o objetivo de identificar modos de falha e as características de superfície dos materiais, foi realizada avaliação microscópica dos fragmentos rompidos, com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) FEI modelo Quanta FEG 250 (FIG. 3.16), disponível no Laboratório de Microscopia Eletrônica do IME. 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. 3.16** Microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta FEG 250.

### 3.3.7 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 as blindagens em diferentes configurações de espessuras. 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.

Neste caso, o SBM foi posicionado em frente a um bloco de plastilina (CORFIX<sup>®</sup>) com 50 mm de espessura, e densidade de 1,7 g/cm<sup>3</sup>. Após o impacto balístico, por meio de um sistema laser (FIG. 3.17), foi medida a deformação (indentação) deixada pela blindagem na plastilina. Um conjunto de medidas foi realizado no interior da cavidade da indentação, e o maior valor de profundidade encontrado foi utilizado como indicativo do trauma. A blindagem foi considerada eficiente se este maior valor fosse igual ou inferior a 44 mm (NIJ 0101.06).



**FIG. 3.17** Medida do trauma (indentação) no material de referência (plastilina).

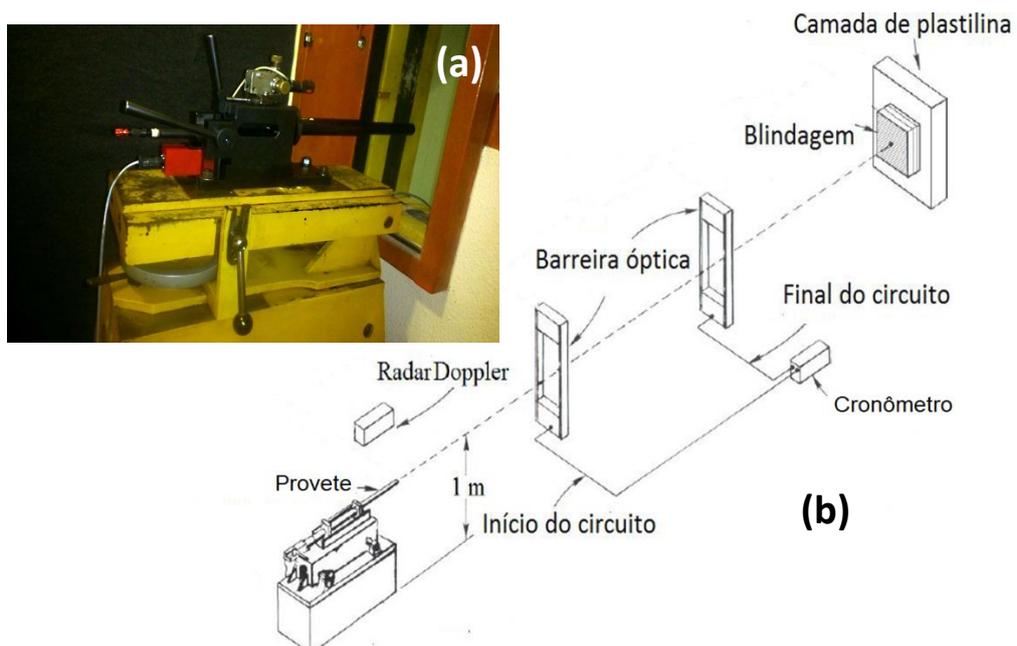
As condições gerais dos ensaios foram:

- Munição: calibre 7,62 mm M1 (Fig. 3.18), 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. 3.18** Munição calibre 7,62 mm M1.

- 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;
- Ângulo de incidência no alvo: 90°;
- Local: Centro de Avaliações do Exército (CAEx), linha de tiro IV, destinada aos testes que empregam armas e munições até o calibre .50". Foi utilizado um provete calibre 7,62 mm (FIG. 3.19a), um dispositivo de fixação do alvo. Para medição da velocidade do projétil, foi utilizado um radar Doppler WEIBEL modelo SL-520P e uma barreira ótica HPI (*High Pressure Instrumentation*), modelo B471, a fim de verificar se atende às exigências da norma, validando o disparo. Um esquema do sistema é mostrado na FIG. 3.19b.



**FIG. 3.19** Ensaio balístico: (a) Provete calibre 7.62 mm com mira laser;  
(b) Diagrama esquemático relativo ao arranjo experimental.

Adaptado de Monteiro *et al.*, 2014

### 3.3.8 MÉTODO ESTATÍSTICO DE WEIBULL

A distribuição de Weibull é a distribuição estatística mais popular para cálculos de engenharia de confiabilidade. Ela tem a grande vantagem de se adequar a diversos casos reais apenas pelo ajuste de poucos parâmetros (O'CONNOR & KLEYNER, 2012). A função de distribuição cumulativa de Weibull é dada pela equação:

$$F(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x}{\theta} \right)^\beta \right] \quad \text{EQ. 3.4}$$

Onde:  $\theta$  e  $\beta$  são parâmetros estatísticos, conhecidos, respectivamente, como unidade característica (ou parâmetro de escala) e módulo de Weibull (ou parâmetro de forma).

Rearranjando-se a EQ. 3.4, obtém-se:

$$\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{1-F(x)} \right) \right] = \beta \ln(x) - [\beta \ln(\theta)] \quad \text{EQ. 3.5}$$

A EQ. 3.5 consiste de uma reta com coeficiente angular igual a  $\beta$  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).

A modelo de Weibull foi utilizado neste trabalho para quantificar a confiabilidade estatística de alguns parâmetros medidos, como o diâmetro médio das fibras na manta de curauá e o tamanho médio de grão da cerâmica. Foi utilizado o software *Weibull Analysis* para a obtenção dos parâmetros e gráfico da distribuição.

### 3.3.9 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL DE BOX-BEHNKEN E MSR

Entre as técnicas multivariadas apresentadas neste trabalho (seção 2.6), foi selecionado o delineamento experimental de Box-Behnken e a MSR para otimização do desempenho das blindagens. O motivo do uso DBB é que este é comprovadamente mais eficiente para delineamentos com 3 níveis em relação às outras metodologias (FERREIRA *et al.*, 2007). Em outras palavras, o DBB possibilita resultados satisfatórios com menor quantidade de experimentos. A MSR, por sua vez, é uma solução experimental que facilita a apresentação dos resultados. O DBB foi realizado utilizando-se o software Microsoft Excel, e os gráficos da MSR foram realizados utilizando-se o software Origin.

### 3.3.10 OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL LINEAR

Sendo o trauma máximo admitido de 44 mm (NIJ-0101.06) e existindo resultados experimentais de SBMs com espessuras proporcionais de suas camadas, pode-se calcular os valores mínimos destas espessuras para satisfazer este trauma. Assim, foram realizados ensaios balísticos em placas do mesmo SBM da FIG. 3.9(a) com espessuras diminuídas proporcionalmente. Através de regressão linear, podem ser obtidas as espessuras mínimas para o trauma de 44 mm. Estas espessuras servirão de comparação com aquelas otimizadas por delineamento experimental de Box-Behnken e MSR.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente trabalho foi organizado em diferentes etapas, com a finalidade de alcançar cada objetivo específico e, por fim, o objetivo geral.

Primeiramente, será estudada a resistência balística de laminados de aramida (Kevlar<sup>®</sup>) contra projéteis 7,62 mm, em função da espessura, a fim de estimar a espessura limite do laminado acima da qual o projétil é capturado. O objetivo será verificar se o laminado dispensaria o uso da cerâmica e alumínio (SBM) nesta situação. Por este motivo, será realizada uma comparação qualitativa com os resultados já obtidos para os SBMs de 25 mm, que utilizavam camada frontal cerâmica, camada intermediária de aramida, e camada posterior de alumínio (Braga, 2015; Monteiro *et al.*, 2016). Deste modo, será avaliado se há realmente vantagem em se utilizar blindagens multicamada nas outras etapas do trabalho (otimização).

Em uma segunda etapa, será inserido o tecido de curauá nos SBMs, por apresentar as vantagens já discutidas na seção 1.2. Testes balísticos serão executados para verificar a viabilidade de utilização destes compósitos em SBMs.

Na terceira etapa, serão realizados ensaios para caracterização das matérias-primas dos SBMs, com a finalidade de se garantir que as únicas variáveis do estudo de otimização serão as espessuras (as densidades superficiais) de cada camada.

Na quarta e última etapa, será realizado o estudo da influência da espessura (ou densidade superficial) de cada camada na performance geral da blindagem, e a otimização das espessuras das camadas. Para isto, será utilizado o Planejamento de Box-Behnken e a Metodologia de Superfície de Respostas (MSR). Utilizou-se, comparativamente, resultados da otimização experimental linear do item 3.3.10.

#### 4.1 COMPARAÇÃO ENTRE CONFIGURAÇÕES: LAMINADO DE KEVLAR® VERSUS BLINDAGEM MULTICAMADA

Estudos anteriores (MONTEIRO *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2016; MONTEIRO *et al.*, 2016a) mostram que espessuras de 25 mm já são suficientes para que SBMs retenham os projéteis 7,62 mm, o que se deve, em grande parte, à grande absorção de energia realizada pela camada cerâmica. Esta energia foi estimada por MONTEIRO *et al.*, 2014 como 55,3% da energia total do projétil, sendo atribuída à alta dureza e resistência da cerâmica, que provoca a erosão e fratura da ponta do projétil, como observado também por outros autores (GOMES, 2004; SILVA *et al.*, 2014).

O tecido de aramida foi escolhido para esta etapa porque é um dos mais utilizados na atualidade, e por possuir propriedades uniformes e bem conhecidas (MONTEIRO *et al.*, 2014; WANG *et al.*, 2014). A FIG. 4.1 mostra um dos alvos laminados utilizados neste ensaio.



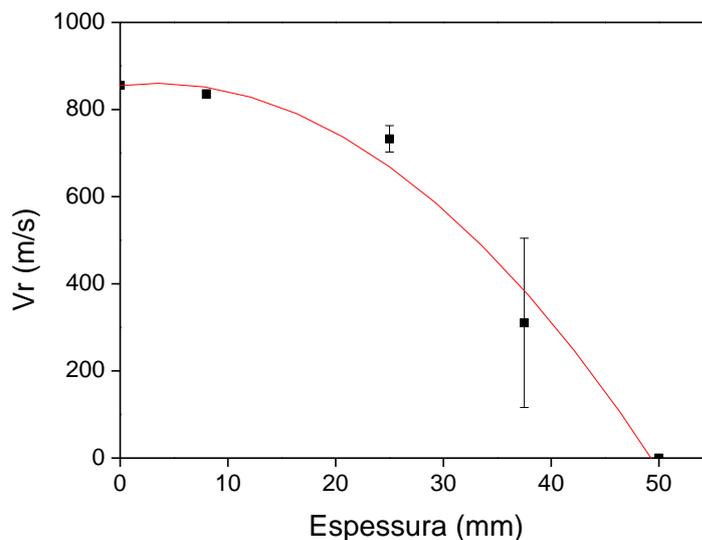
**FIG. 4.1** Laminado de aramida montado em suporte para o ensaio balístico. Os adesivos na sua superfície indicam os pontos a serem atingidos pelos disparos.

A TAB. 4.1 mostra os resultados médios do ensaio balístico nos laminados de aramida. São mostradas as velocidades médias de impacto do projétil no alvo ( $V_i$ ), e as velocidades residuais, após o impacto ( $V_r$ ), para as diferentes espessuras de

laminados de aramida. Os dados brutos das velocidades de  $V_i$  e  $V_r$ , medidas pelo radar Doppler podem ser encontrados no Apêndice I. Os dados da TAB. 4.1 podem ser mais bem visualizados pelo gráfico da FIG. 4.2, no qual são plotados os dados de  $V_r$  em função da espessura do laminado.

**TAB. 4.1** Velocidade de impacto ( $V_i$ ) e residual ( $V_r$ ) do projétil obtidos no ensaio balístico para os laminados de aramida com diferentes espessuras e densidades superficiais.

Espessura (mm)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )	$V_i$ (m/s)	$V_r$ (m/s)
8,00	9	861 ±7	835 ±10
25,0	27	859 ±6	732 ±30
37,5	40	843 ±6	310 ±194
50,0	54	857 ±3	0



**FIG. 4.2** Velocidade residual do projétil após impacto com os alvos de aramida, em função da espessura dos laminados.

Observa-se que, com o aumento da espessura ( $t$ ) do laminado, a velocidade residual diminui, seguindo com boa aproximação uma função quadrática (ajuste  $R^2 = 0,98138$ ,  $p$ -valor = 0,01862). Assim, o modelo ajustado segue a equação:

$$V_r \text{ (m/s)} = 856,02891 + 2,64152t - 0,40571t^2 \quad \text{EQ. 4.1}$$

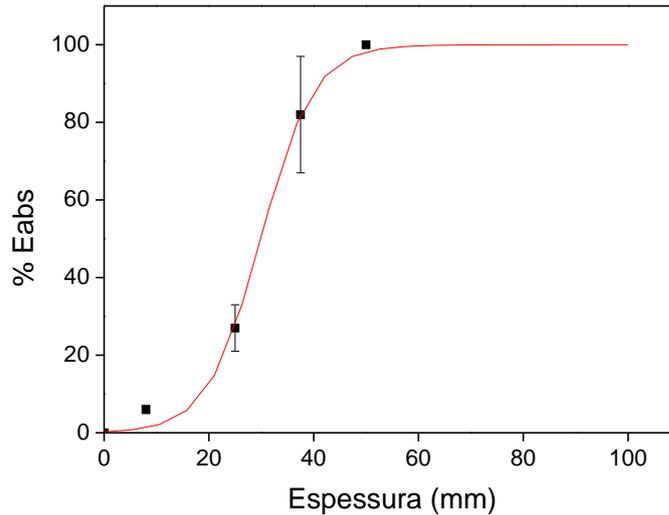
Resolvendo a EQ. 4.1, obtém-se o valor  $t = 49,3$  mm para a espessura limite.

A tendência não-linear da curva  $V_r \times t$  já era esperada, em virtude da forma pontiaguda do projétil 7,62 mm, que concentra a carga em pequenas regiões do tecido, fraturando com facilidade fios da trama de aramida. Naturalmente, os laminados de pequena espessura quase não são percebidos pelo projétil, perdendo pouca velocidade ao passar pelo alvo, ocorrendo, provavelmente, a fratura de poucas fibras na região de impacto. Em espessuras próximas a 20 mm, começa a haver uma perda de energia mais contundente, provavelmente pela entrada de outros mecanismos de absorção de energia, como a delaminação, e atuação da estrutura como um todo, distribuindo a carga para locais afastados da região de impacto.

Com base nos dados de  $V_i$  e  $V_r$ , pode ser calculado o percentual de energia absorvida pelos laminados mediante o impacto balístico. Assim, a TAB. 4.2 mostra as energias médias de impacto do projétil no alvo ( $E_i$ ), as energias residuais dos fragmentos após o impacto ( $E_r$ ), bem como o percentual de energia absorvida por cada alvo ( $\%E_{abs}$ ), os laminados de aramida de diferentes espessuras. Na FIG. 4.3, os dados são apresentados na forma gráfica. Os valores individuais calculados também se encontram no Apêndice I.

**TAB. 4.2** Energia absorvida pelos laminados de aramida com diferentes espessuras (densidades superficiais).

<b>Espessura laminado (mm)</b>	<b><math>E_i</math> (kJ)</b>	<b><math>E_r</math> (kJ)</b>	<b><math>\%E_{abs}</math></b>
8,00	3,60 $\pm$ 0,06	3,39 $\pm$ 0,08	6 $\pm$ 1
25,0	3,58 $\pm$ 0,05	2,61 $\pm$ 0,21	27 $\pm$ 6
37,5	3,45 $\pm$ 0,05	0,63 $\pm$ 0,53	82 $\pm$ 15
50,0	3,57 $\pm$ 0,03	0	100



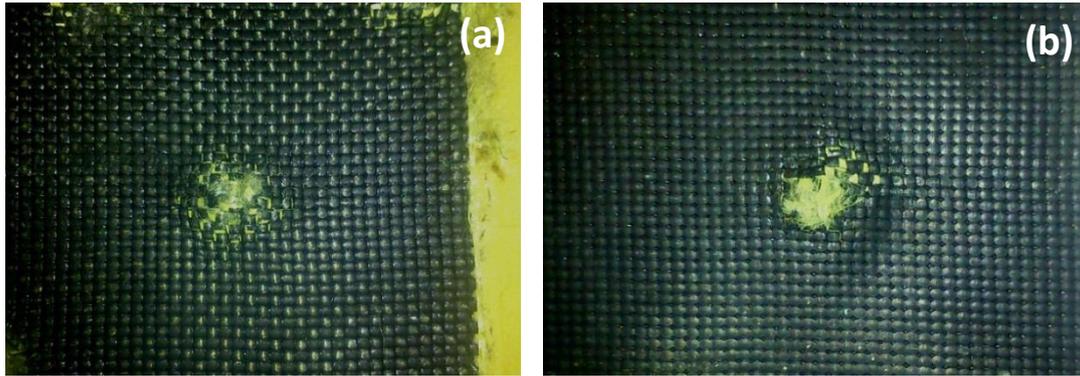
**FIG. 4.3** Percentual de energia absorvida pelos alvos de aramida, em função da espessura dos laminados.

Foi aproximada uma função sigmoide do tipo dose-resposta aos dados de energia absorvida, utilizando como condições de contorno os limites inferior 0% e superior 100%. A curva ajustada apresenta parâmetros  $A_1 = 0\%$  e  $A_2 = 100\%$ , por consequência das condições de contorno, centro em 29,8827%, crescendo com taxa 0,08606. Assim, o modelo ajustado fica de acordo com a equação:

$$\%E_{abs}(J) = \frac{100}{1+10^{(29,88273-t) 0,08606}} \quad \text{EQ. 4.2}$$

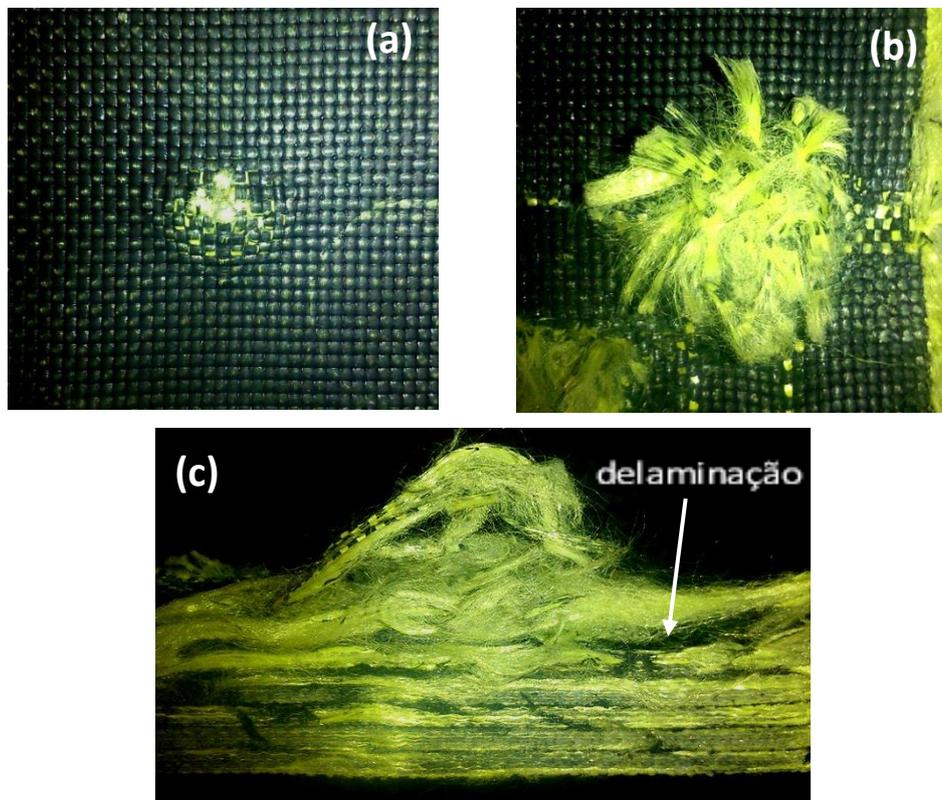
A inflexão presente na sigmoide sinaliza mais fortemente a mudança de mecanismo mencionada anteriormente. Observa-se que o laminado só passa a resistir ao disparo em espessuras entre 37,5 e 50 mm. Isto é consideravelmente mais espesso que os 25 mm das blindagens multicamada, apesar de o peso ser razoavelmente baixo ( $D_{sup} = 54 \text{ kg/m}^2$ ).

Os mecanismos de fratura foram investigados por meio da avaliação do aspecto geral macroscópico (FIG. 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8) e por micrografias eletrônicas (FIG. 4.9). Nos laminados de 8 mm, foram observados apenas as perfurações de entrada e saída do projétil, com as fibras fraturadas projetadas para fora na parte posterior (FIG. 4.4).



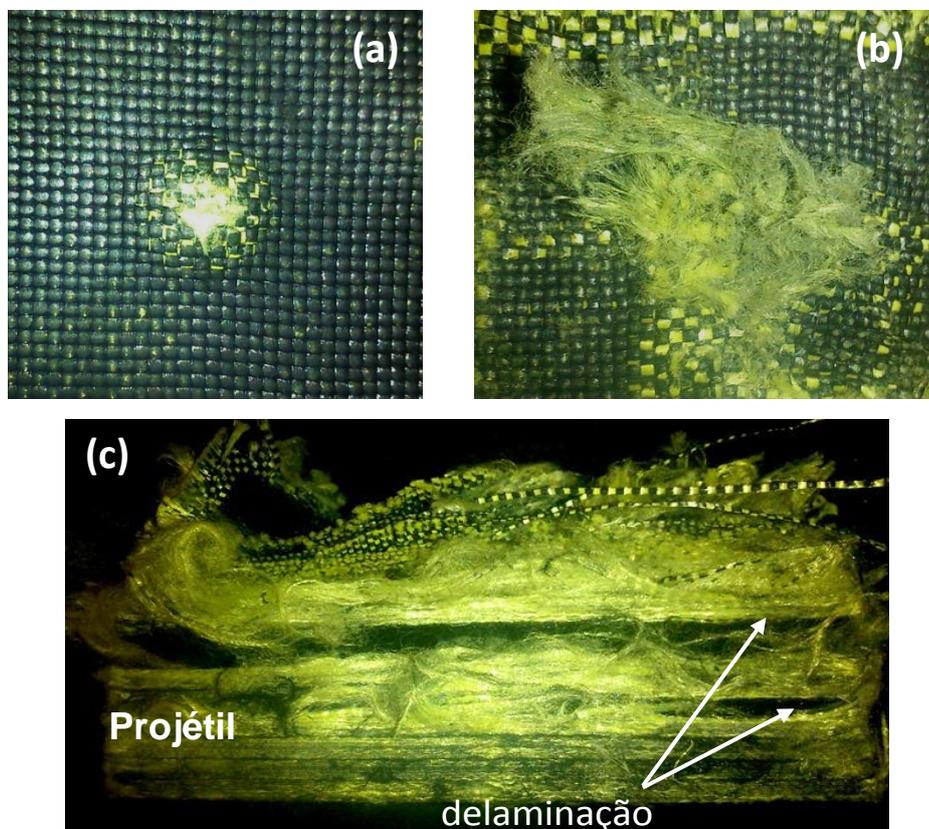
**FIG. 4.4** Imagens macroscópicas de um laminado de aramida de 8 mm (16 camadas) após o impacto com o projétil 7,62 mm; (a) região de entrada do projétil e (b) região de saída.

Nos laminados de 25 mm, observou-se uma maior quantidade de fibras fraturadas na saída do projétil, e já há sinais de delaminação (FIG. 4.5c).

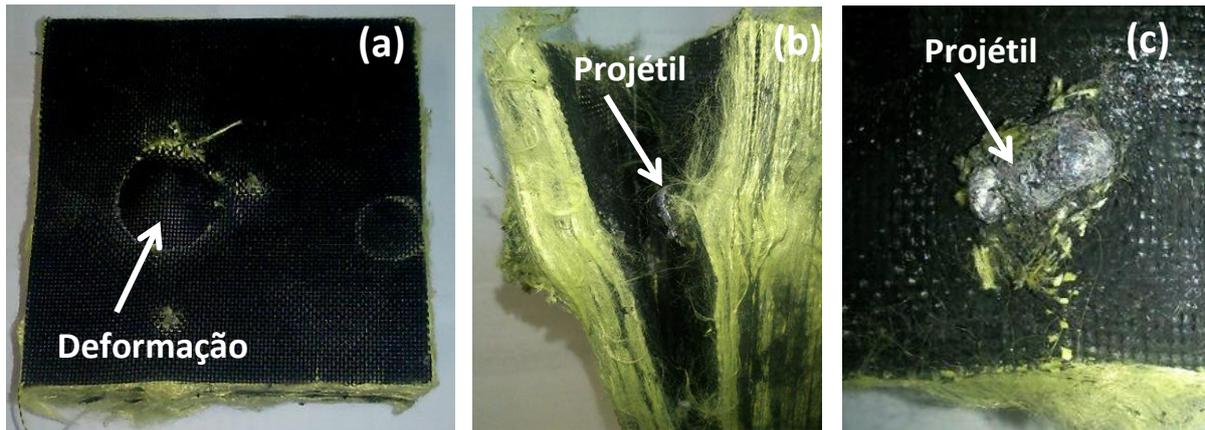


**FIG. 4.5** Imagens macroscópicas de um laminado de aramida de 25 mm (48 camadas) após o impacto com o projétil 7,62 mm; (a) região de entrada do projétil; (b) região de saída e (c) detalhe da delaminação.

Nos laminados 37,5 mm, foram observadas as perfurações e intensa delaminação (FIG. 4.6c). Estas evidências confirmam a gradual mudança de mecanismo de fratura da aramida com o aumento do número de camadas. Finalmente, nos laminados com 96 camadas (50 mm), foi observada delaminação (FIG. 4.7b), bem como semi-esferas de deformação na face posterior da placa (FIG. 4.7a), que indica a deformação provocada pelo projétil. Naik e Shirao (2004) observaram a formação de semi-esferas de deformação similares em compósitos, com o auxílio de uma câmera de alta velocidade. Eles o incluíram em seu modelo como mecanismo de absorção de energia, juntamente com a deformação e fratura dos fios, delaminação e fratura da matriz polimérica. Tabiei e Nilakantan (2008) relatam que este fenômeno é comum em laminados, especialmente nas camadas posteriores de um sistema com várias camadas de tecido, e pode ser denominado *bowing* (ou formação de arco).

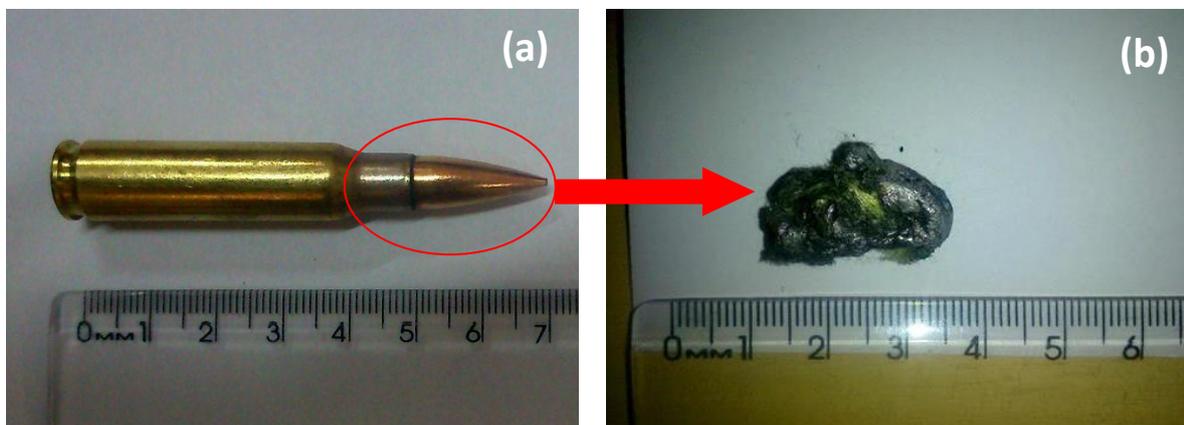


**FIG. 4.6** Imagens macroscópicas de um laminado de aramida de 37,5 mm (72 camadas) após o impacto com o projétil 7,62 mm; (a) região de entrada do projétil; (b) região de saída e (c) detalhe da delaminação.

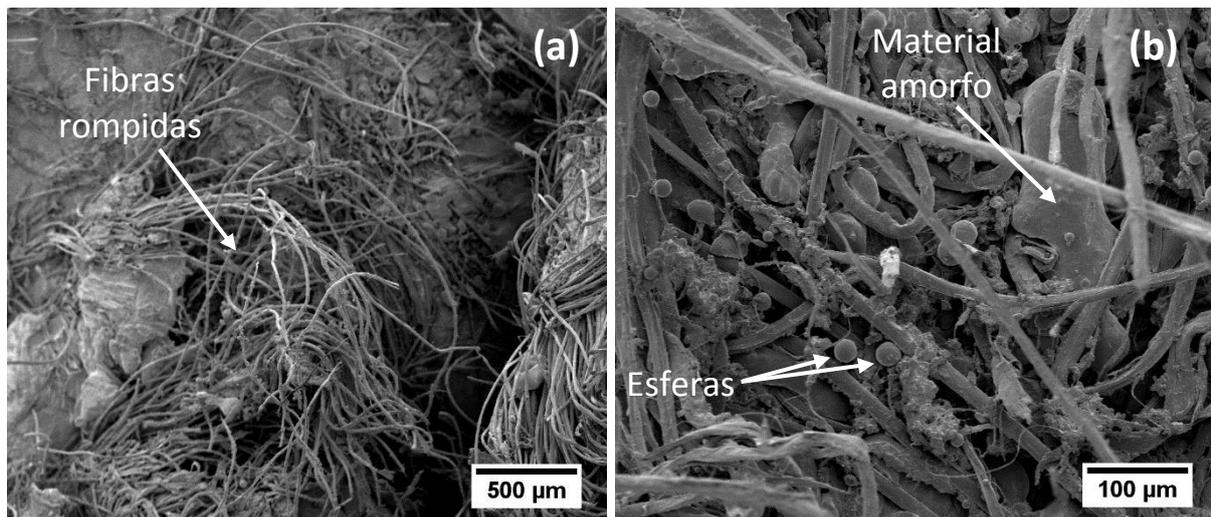


**FIG. 4.7** Imagens macroscópicas de um laminado de aramida de 50 mm (96 camadas) após o impacto com o projétil 7,62 mm; (a) aspecto geral da face posterior; (b) delaminação ao longo da espessura; (c) detalhe do projétil capturado.

Um dos projéteis foi recuperado (FIG. 4.7c e 4.8b) e levado ao MEV para exame microscópico (FIG. 4.9). A FIG. 4.8 mostra a grande deformação que o projétil sofreu no impacto com a aramida. As imagens microscópicas evidenciam grande quantidade de fibras de aramida rompidas ao redor do projétil, algumas regiões amorfas e pequenas esferas. As regiões amorfas são, provavelmente, partes do projétil que foram fundidas durante o impacto balístico. Tabiei e Nilakantan (2008) relatam que a principal causa do aquecimento localizado é o atrito entre a superfície de contato do projétil com os fios e os filamentos individuais. As esferas são, provavelmente, fragmentos do propelente.



**FIG. 4.8** Detalhe da munição 7,62 mm; (a) antes do disparo, ainda com o cartucho; (b) após a captura pela blindagem.



**FIG. 4.9** Micrografias eletrônicas da superfície do projétil recuperado; (a) 100x; (b) 500x.

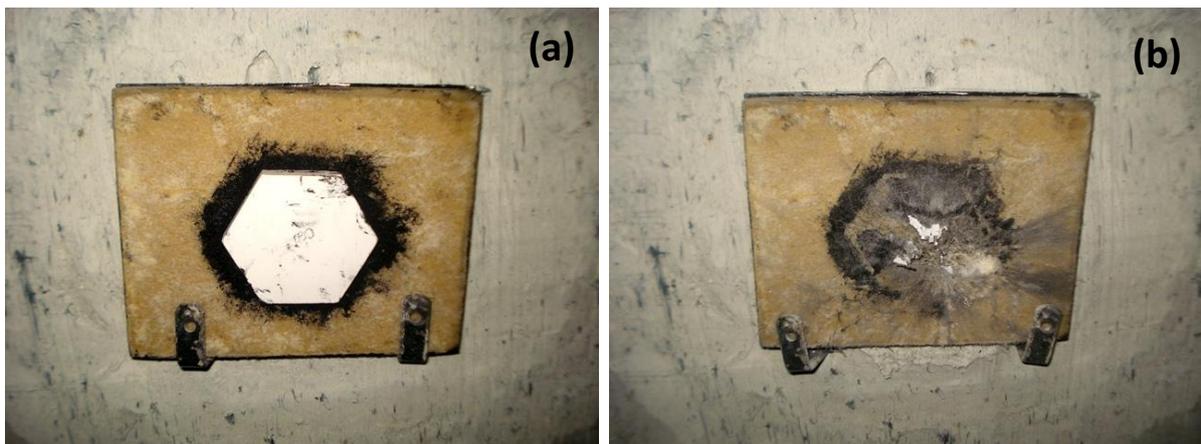
Segundo Wang *et al.*, 2014, os mecanismos de dissipação da energia cinética do projétil são baseados em absorção e redistribuição de energia. No momento do impacto, ondas de tensão transferem energia do ponto de impacto para as regiões mais distantes do laminado, no plano da placa e ao longo da espessura. Uma onda longitudinal passa a se propagar ao longo dos fios, enquanto uma onda transversal se propaga ao longo da espessura do laminado. Os efeitos observados nos laminados são decorrentes da passagem destas ondas de tensão, que provocam deformação e fratura dos fios, delaminação e formação da semi-esfera posterior.

A comparação entre o desempenho balístico dos laminados de aramida com as blindagens multicamada estudadas por outros autores (MONTEIRO *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2016; MONTEIRO *et al.*, 2016a) mostrou que é possível trabalhar com menores espessuras em blindagens multicamada. Sendo assim, o estudo de otimização da blindagem seguirá com os testes de blindagens multicamada.

## 4.2 ENSAIOS PRELIMINARES PARA VERIFICAR A VIABILIDADE DO USO DE TECIDO DE CURAUÁ EM SBM

Na presente seção serão apresentados os testes balísticos de SBMs com camada intermediária de compósito reforçado com tecido de curauá. Os testes foram realizados para verificar se o SBM teria um desempenho similar aos utilizados por outros autores (Monteiro *et al.*, 2014; 2015; 2016; 2016a, 2016c), na mesma configuração, e para saber se o tecido de curauá é promissor para utilização na camada intermediária. Também se deseja saber se os mecanismos de fratura são os mesmos encontrados para os SBMs com aramida e com outras fibras naturais.

O percentual de fibras escolhido foi o de 30 %vol., devido ao melhor desempenho em trabalhos anteriores para os compósitos de fibra de curauá (BRAGA, 2015; Monteiro 2016c). Dois testes preliminares foram realizados. A FIG. 4.10 mostra um SBM de tecido de curauá posicionado na plastilina, antes e após o disparo.



**FIG. 4.10** Ensaio balístico de SBM com camada intermediária de compósito reforçado com 30% de tecido de curauá; (a) antes e (b) após o impacto.

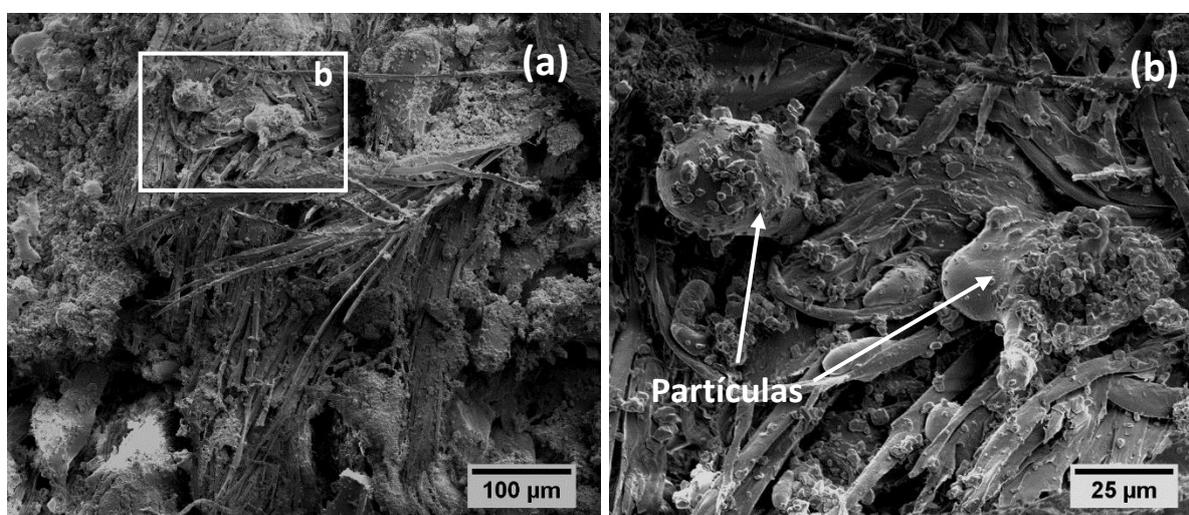
Observa-se pela FIG. 4.10 que o SBM resistiu à penetração do projétil. A cerâmica frontal foi totalmente fragmentada, como já era esperado. O trauma na plastilina foi medido, e é apresentado na TAB. 4.3, juntamente com a espessura da camada cerâmica ( $t_c$ ), espessura do compósito ( $t_{cp}$ ), espessura do alumínio ( $t_a$ ), espessura total ( $T$ ) e velocidade de impacto ( $V_i$ ).

**TAB. 4.3** Trauma (mm) medido pela deformação na plastilina para os SBM com camada intermediária de compósito reforçado com 30% de tecido de curauá.

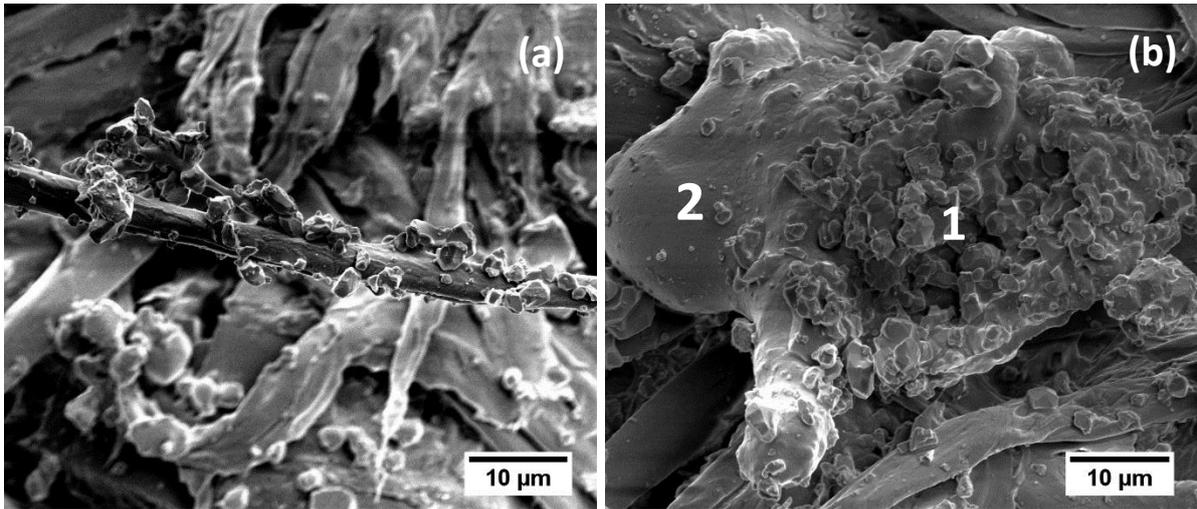
Ensaio	$t_c$ (mm)	$t_{cp}$ (mm)	$t_a$ (mm)	$T$ (mm)	Trauma (mm)	$V_i$ (m/s)
1	10,91	11,57	5,17	27,65	28,2	834,52
2	10,69	10,83	5,12	26,64	27,8	851,84
<b>Média</b>	<b>10,80</b>	<b>11,20</b>	<b>5,15</b>	<b>27,15</b>	<b>28,0 ±0,3</b>	<b>843,18</b>

Todos os corpos de prova obedeceram ao critério da NIJ-0101.06, de indentação (*Trauma*) abaixo de 44 mm. O valor médio de trauma  $28 \pm 0,3$  mm é considerado adequado quando comparado com outros SBM da literatura (CRUZ *et al.*, 2015; LUZ *et al.*, 2015; ROHEN *et al.*, 2015; MONTEIRO *et al.*, 2016). Fragmentos ao redor da região de impacto foram analisados no MEV, para verificar os mecanismos de fratura. As FIG. 4.11 e 4.12 mostram seu aspecto microscópico, em menores aumentos (FIG. 4.11) e maiores aumentos (FIG. 4.12). Observa-se intensa deposição de fragmentos cerâmicos na superfície das fibras. A FIG. 4.12a mostra o detalhe de uma fibra com vários fragmentos em sua superfície.

Uma das partículas presentes na FIG. 4.11b foi selecionada para estudo mais aprofundado. Como mostra a FIG. 4.12b, ela é composta por uma região rugosa (ponto 1), que possui características da fratura intergranular da cerâmica, bem como uma região lisa (ponto 2). Um espectro de EDS foi obtido para cada ponto, e a composição química destes são mostradas na TAB. 4.4.



**FIG. 4.11** Micrografias eletrônicas dos fragmentos ao redor do impacto do projétil no compósito reforçado com tecido de curauá; (a) 500x; (b) 2.000x.



**FIG. 4.12** Micrografias eletrônicas dos fragmentos ao redor do impacto do projétil no compósito reforçado com tecido de curauá; (a) detalhe de uma fibra, 5.000x; (b) detalhe de uma partícula, 5.000x.

**TAB. 4.4** Análise química por EDS em dois pontos da partícula selecionada.

Elemento	Composição (%)	
	Ponto 1	Ponto 2
O	31,02	2,30
Al	33,75	0,33
Si	0,84	-
Nb	21,60	19,30
Pt	12,78	5,45
Pb	-	72,62

Como mostra a TAB. 4.4, as partes da partícula observada são, na realidade, fragmentos do projétil (rico em Pb) fundidos com incrustações de fragmentos da cerâmica fraturada (rica em Al e O). A fusão do chumbo deve-se ao atrito com a blindagem, e à dissipação da energia cinética do projétil também na forma de calor (TABIEI & NILAKANTAN, 2008). A platina identificada deve-se ao recobrimento condutor para análise no MEV. A FIG. 4.12, juntamente com a TAB. 4.4 confirmam que o projétil é deformado e fragmentado pela camada cerâmica dura e resistente, transformando-se em uma nuvem de fragmentos, que é coletada pela camada de

compósito. Este mecanismo já foi discutido em trabalho anterior (MONTEIRO *et al.*, 2014).

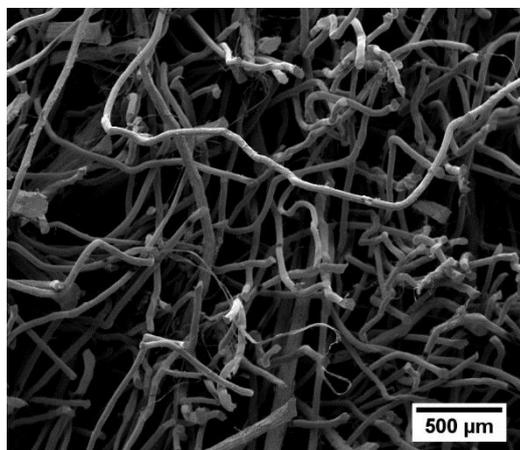
### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Nesta seção estão apresentados os resultados referentes à caracterização das matérias-primas que foram utilizadas nos ensaios principais.

#### 4.3.1 CARACTERIZAÇÃO DO TECIDO DE CURAUÁ E DO COMPÓSITO DE MATRIZ EPOXÍDICA

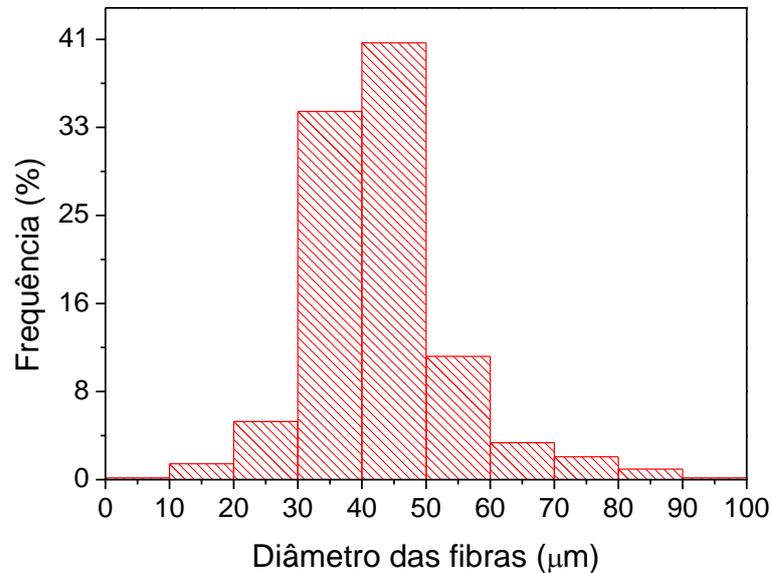
##### 4.3.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

O tecido de curauá utilizado neste trabalho possui uma densidade superficial de aproximadamente 0,830 kg/m<sup>2</sup>. Neste, a direção das fibras é aparentemente aleatória, como mostra a imagem eletrônica da FIG. 4.13.



**FIG. 4.13** Micrografia eletrônica do tecido de curauá, mostrando as fibras em orientação aproximadamente aleatória. 100x.

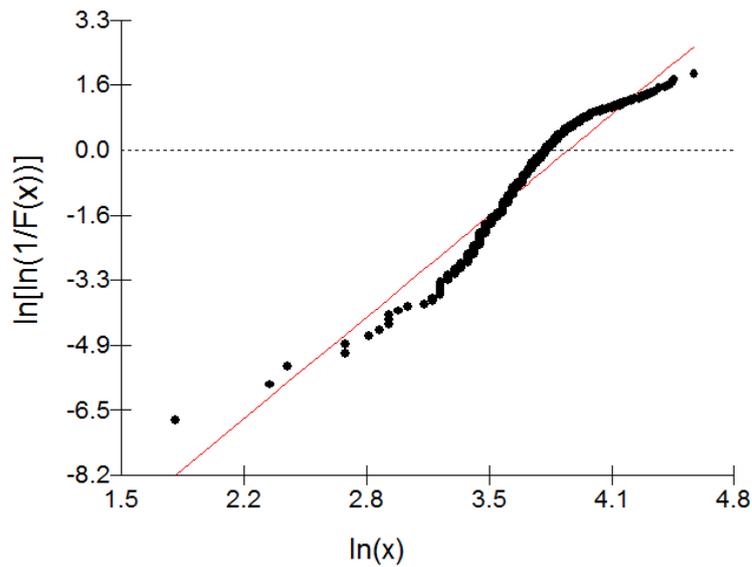
A partir da FIG. 4.13, e de outras imagens do tecido, foram medidos os diâmetros das fibras de curauá. O histograma da FIG. 4.14 mostra a distribuição de frequência das fibras por seus diâmetros.



**FIG. 4.14** Histograma de diâmetro das fibras de curauá no tecido.

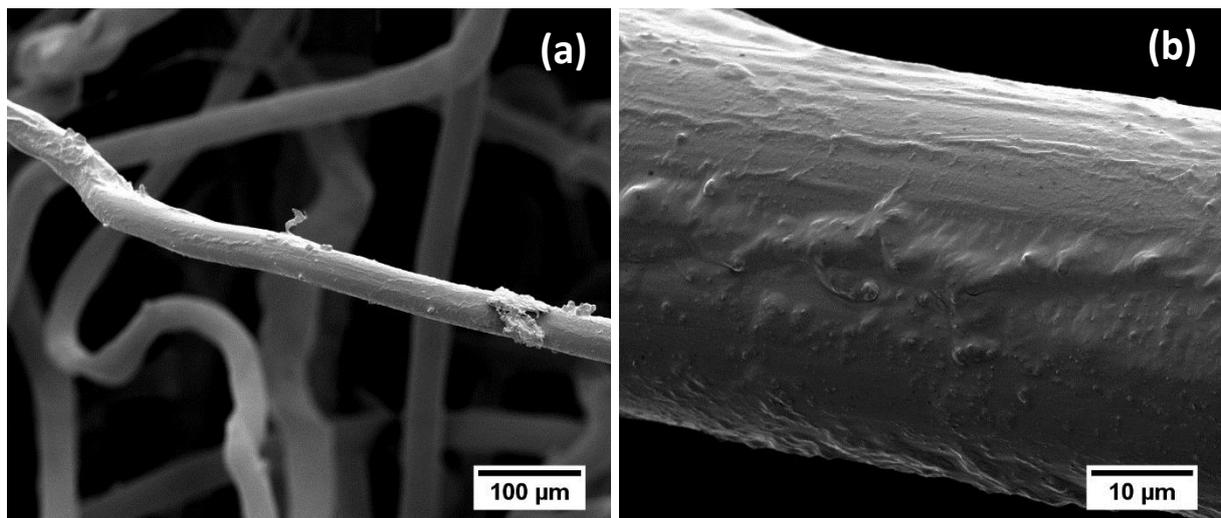
Foram identificadas fibras com diâmetro variando de 10 a 90 µm, com média  $42 \pm 11$  µm. Estas fibras podem ser consideradas finas, quando comparadas com um lote de fibras de curauá examinadas por Simonassi *et al.* (2012). Eles identificaram fibras de curauá “in natura” com diâmetros variados de 50 a 230 µm, com média 94 µm. Foi verificado no mesmo estudo que, quanto mais finas as fibras, maior o seu módulo elástico, e assim, as fibras deste trabalho podem ser consideradas de boa qualidade para utilização em compósitos.

Foi utilizada a estatística de Weibull para caracterizar a distribuição de diâmetros. A FIG. 4.15 mostra o gráfico de Weibull para a distribuição. Observa-se bom ajuste linear, quantificado pelo parâmetro  $R^2 = 0,9580$ , e o parâmetro  $\beta = 3,86$  mostra uma distribuição relativamente larga ao redor do valor característico  $\theta = 49,72$  µm.



**FIG. 4.15** Gráfico da distribuição de Weibull para o diâmetro das fibras de curauá no tecido.

Outras imagens das fibras foram obtidas com maiores aumentos, para verificar as suas características superficiais (FIG. 4.16). Observa-se certa rugosidade na superfície da fibra, relativamente pequena quando comparada com outras fibras naturais como o sisal e a piaçava (MONTEIRO *et al.*, 2011).



**FIG. 4.16** Micrografias eletrônicas do tecido de curauá; (a) fibra, 500x; (b) detalhe da fibra, 5.000x.

#### 4.3.1.2 ESTABILIDADE TÉRMICA

A estabilidade térmica das fibras, da resina epoxídica e do compósito também foram estudadas. As FIG. 4.17, 4.18 e 4.19 mostram as curvas TG/DTG do tecido de curauá, da resina epoxídica e do compósito com 30% de curauá, respectivamente.

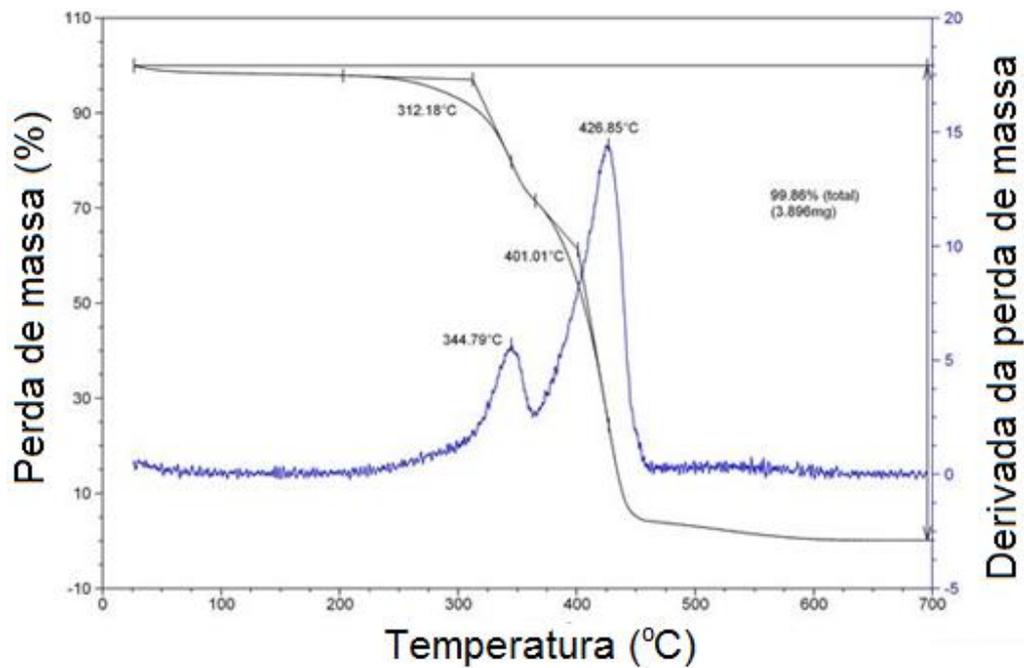


FIG. 4.17 Curva TG/DTG para o tecido de curauá.

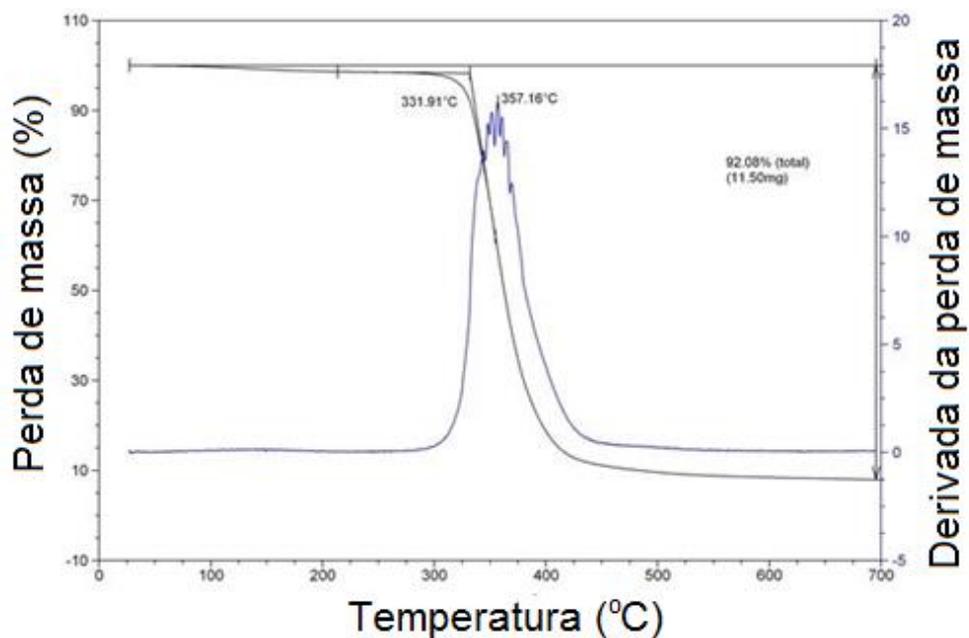
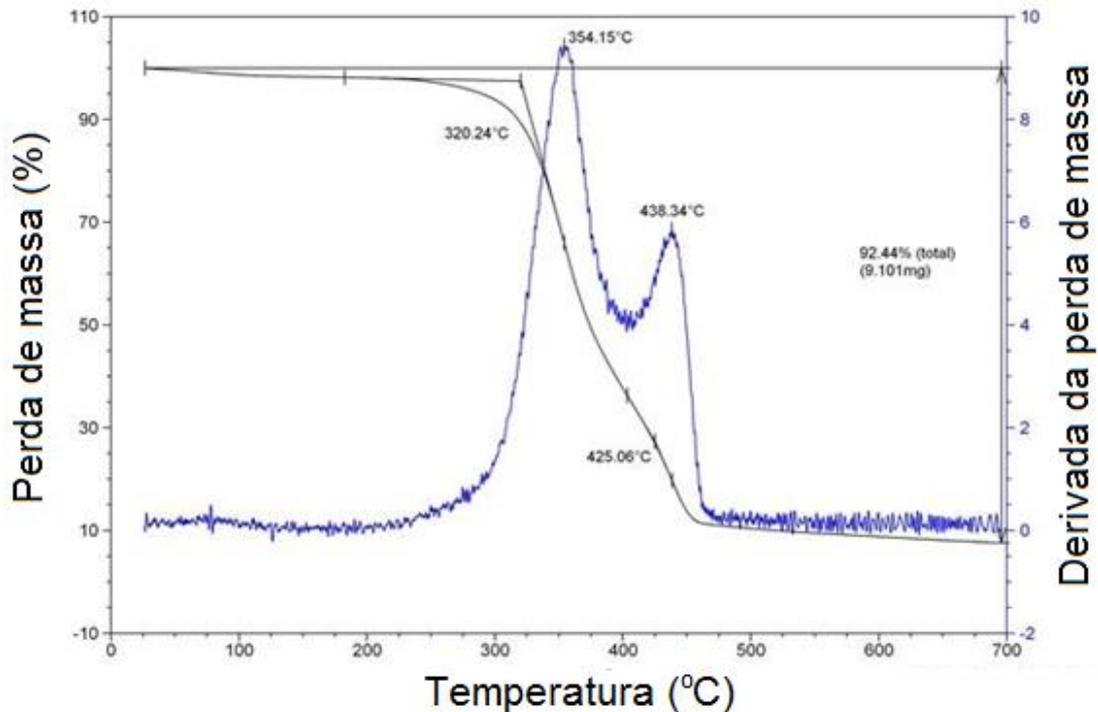


FIG. 4.18 Curva TG/DTG para a resina epoxídica.



**FIG. 4.19** Curva TGA/DTG para o compósito reforçado com 30% de curauá.

A curva de TG na FIG. 4.17, relativa ao tecido de curauá, mostra uma pequena perda de massa abaixo de 100°C, que está relacionada com a perda de umidade. Em 312°C ocorre um evento com grande perda de massa, que termina a aproximadamente 430°C, restando um resíduo de cerca de 10%. A curva da derivada (DTG) na FIG. 4.19 apresenta dois picos, indicando que a perda de massa após 312°C está relacionada a duas reações. A primeira, com taxa máxima em 344,79°C, é a decomposição térmica da lignina, como reportado pela literatura (MONTEIRO *et al.*, 2012; TOMCZAK *et al.*, 2007). A segunda, com taxa máxima em 426,85°C, é a decomposição da celulose (MONTEIRO *et al.*, 2012; TOMCZAK *et al.*, 2007).

A curva de TG na FIG. 4.18, da resina epoxídica, apresenta apenas um evento com grande perda de massa entre 332°C e 400°C, que consome 90% da massa do sistema. A curva de DTG (FIG. 4.21) mostrou apenas um pico com máximo em 357°C. Esta transformação, segundo a literatura (SILVA, 2014a), está relacionada à decomposição ou despolimerização das macromoléculas da resina.

A curva de TG na FIG. 4.19, relativa ao compósito, inicia com uma pequena perda de massa a cerca de 100°C, relacionada à perda de umidade. Em 320°C

ocorre um evento com grande perda de massa, que termina a aproximadamente 450°C, restando um resíduo de cerca de 10%. A curva de DTG (FIG. 4.22) apresenta dois picos, indicando que a perda de massa após 320°C está relacionada a dois conjuntos de reações. O primeiro, com taxa máxima em 354°C, é relativo à decomposição da lignina e à degradação da resina (MONTEIRO *et al.*, 2012; TOMCZAK *et al.*, 2007). Já o segundo pico, com máximo em 438,34°C, está relacionado à degradação da celulose. O segundo, com taxa máxima em 426,85°C, é a decomposição da celulose (MONTEIRO *et al.*, 2012; TOMCZAK *et al.*, 2007).

Os resultados indicam que o compósito reforçado com 30% de curauá é estável até temperaturas próximas a 300°C.

#### 4.3.1.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO EM TRAÇÃO

O comportamento mecânico do compósito reforçado com tecido de curauá (CRTC) sob tração e impacto foi investigado. A TAB. 4.6 mostra a média da resistência à tração uniaxial, em comparação com o resultado do compósito reforçado com 30% de fibras de curauá (contínuas e alinhadas, designado CRFC) e com a resina epóxi pura (DGEBA/TETA), obtidos por outros autores (BRAGA *et al.*, 2017; GARCIA *et al.*, 2007).

**TAB. 4.5** Resistência à tração do compósito reforçado com 30% de tecido de curauá em comparação com outros resultados da literatura.

Propriedade	Material		
	CRTC <sup>1</sup>	CRFC <sup>2</sup>	DGEBA/TETA <sup>3</sup>
Resistência à tração (MPa)	26 ±1	60 ±3	53 ±2

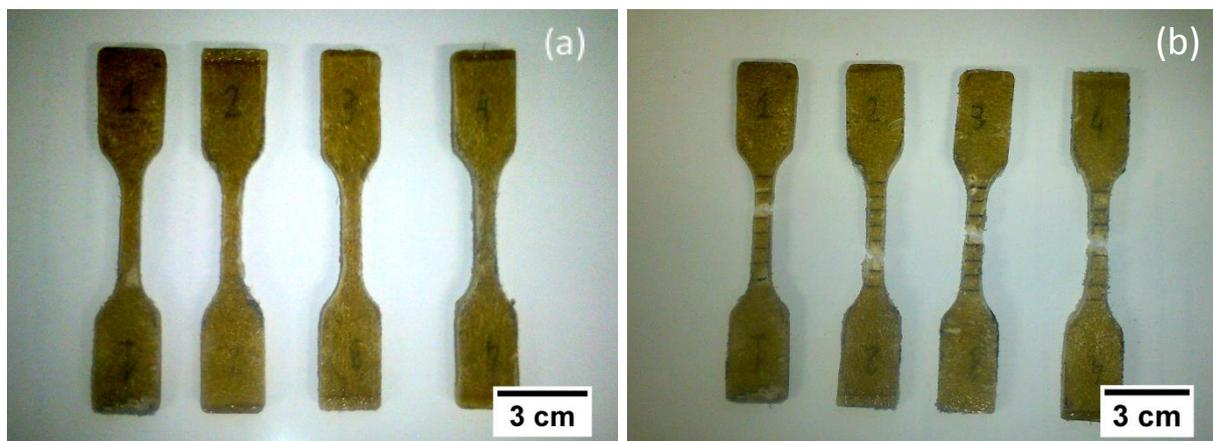
<sup>1</sup>Presente trabalho.

<sup>2</sup>BRAGA *et al.*, 2017.

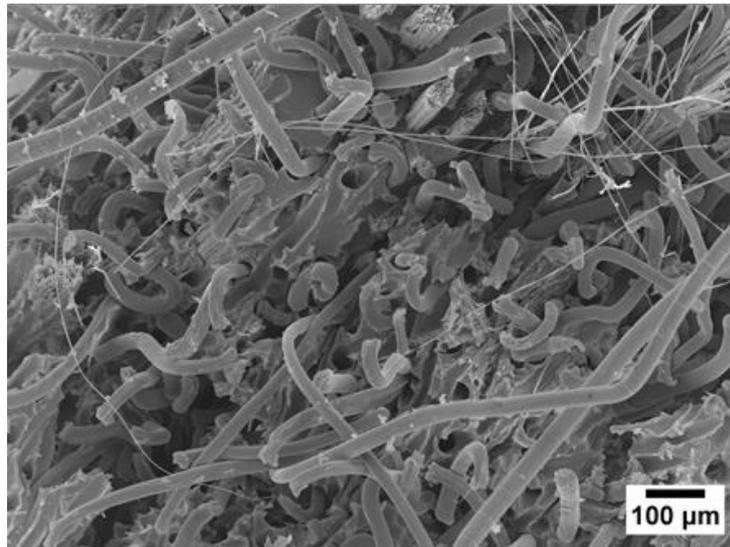
<sup>3</sup>GARCIA *et al.*, 2007.

A FIG. 4.20 mostra o aspecto dos corpos de prova antes e após o ensaio. Observa-se que os corpos-de-prova romperam dentro do comprimento útil, como previsto. Pela TAB. 4.6, observa-se, que a resistência à tração do compósito reforçado com tecido é menor em relação ao compósito reforçado com fibras, bem como em relação à resina pura. Isto pode ser atribuído ao não-alinhamento das fibras no tecido, que, em conjunto com a fraca interface fibra-matriz, perturba a continuidade do polímero, diminuindo a sua resistência à tração. Estas características podem ser diretamente observadas por meio das micrografias eletrônicas da fratura, FIG. 4.21 e 4.22, que mostram as fibras em direções aleatórias no compósito, bem como grande quantidade de fibras sacadas e descoladas da matriz, que são indicativos da baixa resistência da interface. Segundo Monteiro *et al.*, 2013, a fraca interface é resultado da pouca afinidade entre a matriz epoxídica (hidrofóbica) e as fibras de curauá (hidrofílicas). Neste caso, a matriz tem dificuldade em transferir a carga para as fibras, diminuindo a resistência do material.

Por outro lado, no caso do compósito com fibras alinhadas, os esforços compressivos que agem perpendicularmente ao eixo de carregamento poderiam promover uma adesão mecânica entre as fases do compósito, possibilitando esta transferência de carga para as fibras, aumentando levemente a resistência à tração do material em relação à resina epoxídica.

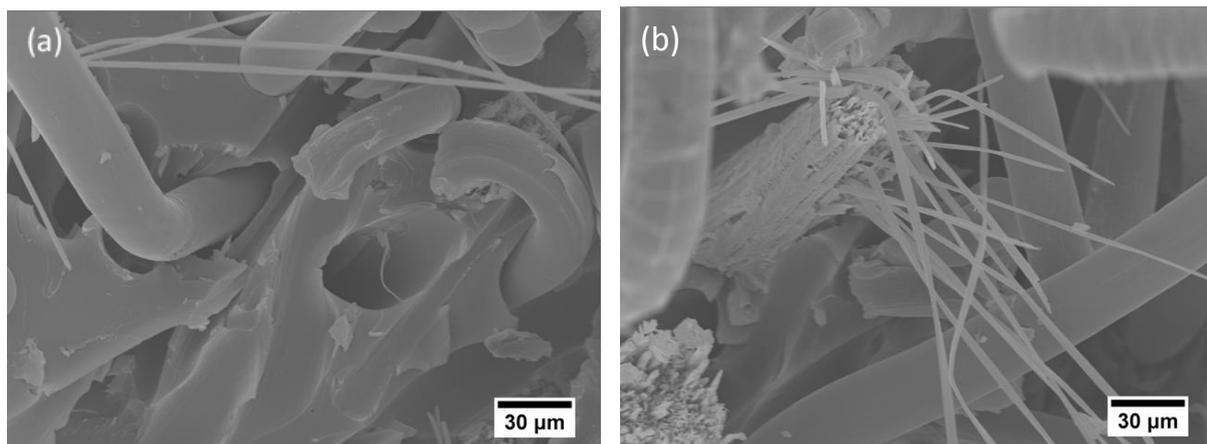


**FIG. 4.20** Aspecto geral dos corpos de prova de tração: (a) antes do ensaio e (b) após o ensaio.



**FIG. 4.21** Micrografia eletrônica mostrando a fratura em tração do compósito. 100x.

Outro detalhe microestrutural que a FIG. 4.24 mostra, melhor visualizado na FIG. 4.25b, é a característica de fratura das fibras de curauá, como já observado por outros autores (MONTEIRO *et al.*, 2008; MONTEIRO *et al.*, 2013). Sob carregamento de tração, tipicamente, as fibras de curauá se dividem em vários filamentos, que participam individualmente do processo de ruptura.



**FIG. 4.22** Micrografia eletrônica mostrando detalhes microestruturais da fratura em tração do compósito: (a) fibras sacadas, 500x; (b) fibras rompidas, 500x.

#### 4.3.1.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO SOB IMPACTO

A TAB. 4.6 mostra as energias médias de impacto Izod para os compósitos reforçados com tecido e fibras de curauá, bem como da resina epoxídica (Amaral *et al.*, 2013; Garcia *et al.* 2007).

**TAB. 4.6** Energia de impacto do compósito reforçado com 30% de tecido de curauá em comparação com outros resultados da literatura.

Propriedade	Material				
	CRTC/N <sup>1</sup>	CRTC/P <sup>1</sup>	CRFC/N <sup>2</sup>	CRFC/P <sup>2</sup>	DGEBA/TETA <sup>3,4</sup>
E <sub>Izod</sub> (J/m)	433 ±36	400 ±35	410 ±55	24 ±1	39 ±9
E <sub>Izod</sub> (10 <sup>3</sup> J/m <sup>2</sup> )	38 ±3	35 ±1	35 ±5	2,2 ±0,1	0,18

<sup>1</sup>Presente trabalho.

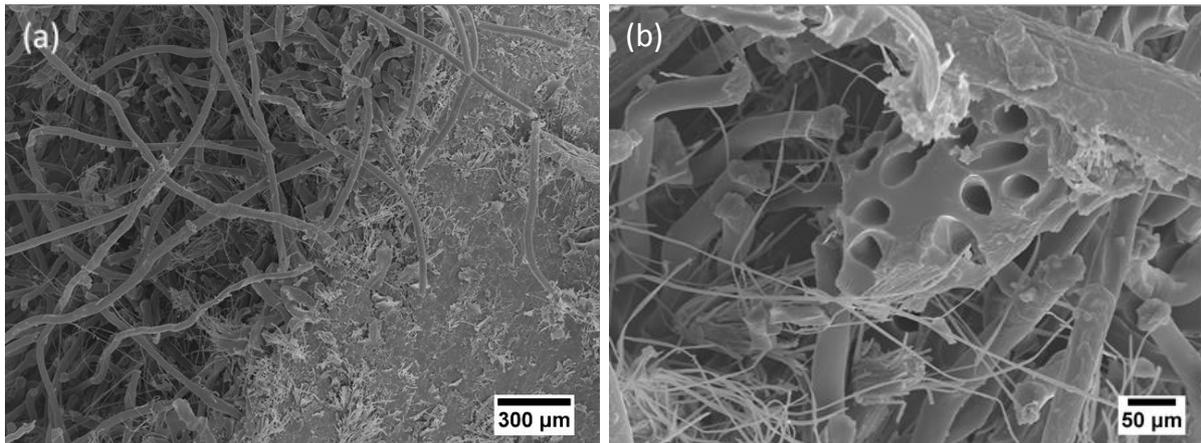
<sup>2</sup>BRAGA *et al.*, 2017.

<sup>3</sup>GARCIA *et al.*, 2007.

<sup>4</sup>AMARAL *et al.*, 2013.

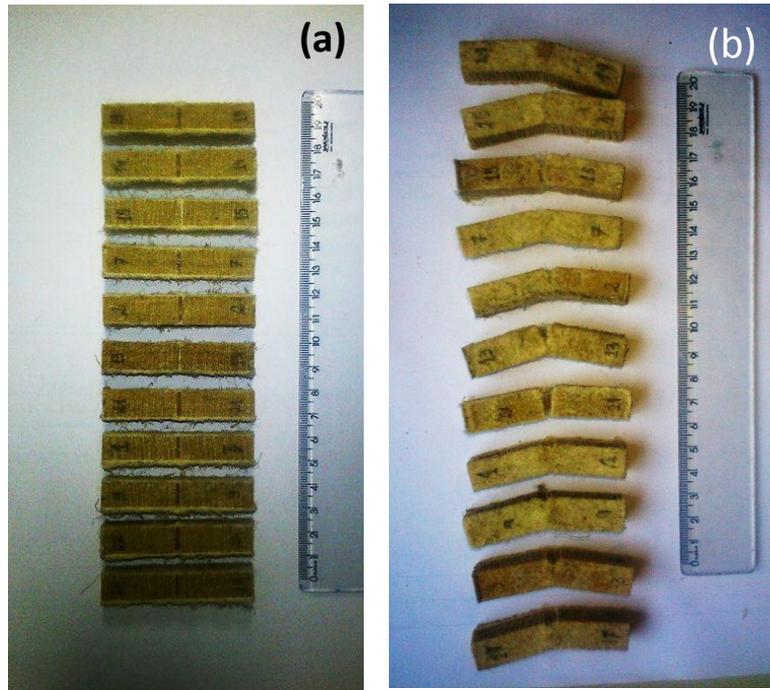
A partir da TAB. 4.6 pode-se observar que a resistência ao impacto Izod para os compósitos reforçados com fibras e tecido de curauá (com exceção da configuração CRFC/P) são cerca de 10 vezes maiores que os valores reportados pela literatura para a resina epóxi DGEBA/TETA (Amaral *et al.*, 2013; Garcia *et al.* 2007). A maior tenacidade ao impacto pode ser atribuída à existência da fraca interface, já discutida anteriormente, que apesar de diminuir a resistência à tração do compósito, resulta em maior área de superfície de fratura e maior energia absorvida no impacto. Esta maior superfície passa a existir quando a trinca iniciada no entalhe tem sua direção de propagação alterada ao interagir com a fibra, fazendo-a percorrer um caminho maior durante o processo de fratura. A FIG. 4.23 mostra o aspecto microscópico da fratura em impacto do compósito. Observa-se intenso *pullout* das fibras, característico da fraca interface fibra-matriz. Outro detalhe microestrutural observado foi a divisão das fibras em microfibrilas, após a fratura. Isto indica que algumas fibras participaram ativamente do processo fratura, provavelmente por estarem orientadas

em direções favoráveis ao carregamento de impacto, sofrendo fratura por mecanismo similar ao observado em tração.

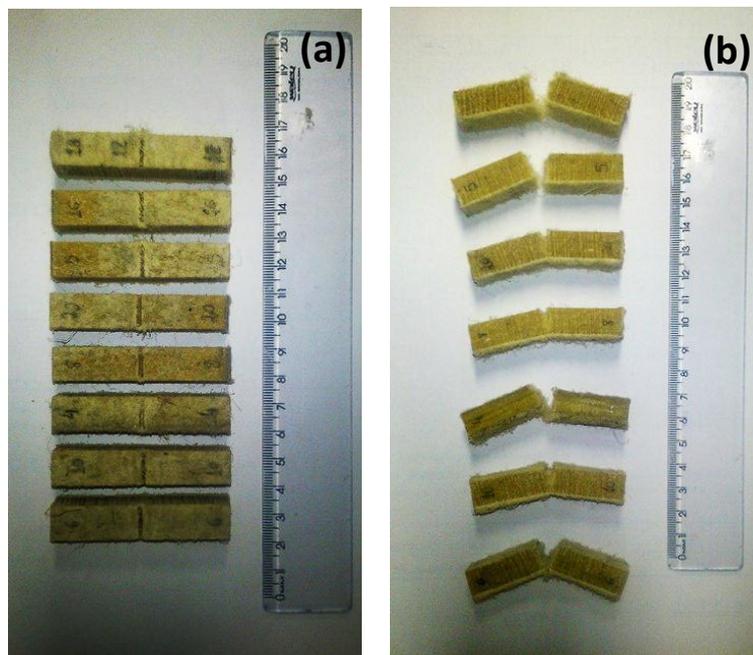


**FIG. 4.23** Micrografia eletrônica mostrando detalhes microestruturais da fratura em impacto do compósito. (a) 50x; (b) 500x.

As FIG. 4.24 e 4.25 mostram o aspecto geral dos corpos-de-prova Izod das configurações CRTC/N e CRTC/P. Estas imagens, juntamente com os valores de resistência ao impacto Izod (TAB. 4.7) mostram que a localização do entalhe e direção de carregamento de impacto praticamente não interferem no comportamento do material. No caso das fibras contínuas e alinhadas, CRFC/N e CRFC/P, pelo contrário, a posição do entalhe e direção de carregamento influenciam fortemente no comportamento de impacto do compósito (BRAGA *et al.*, 2017).



**FIG. 4.24** Aspecto geral dos corpos de prova de impacto com entalhe normal ao plano do tecido: (a) antes do ensaio e (b) após o ensaio.



**FIG. 4.25** Aspecto macroscópico dos corpos de prova de impacto com entalhe paralelo ao plano do tecido: (a) antes do ensaio e (b) após o ensaio.

#### 4.3.1.5 DENSIDADE DOS COMPÓSITOS

A última análise realizada nos compósitos foi a medida da densidade geométrica. A Tabela 4.8 mostra os resultados de espessura ( $t$ ), densidade volumétrica ( $\rho_v$ ), juntamente com os valores de porcentagem de tecido no compósito e densidade superficial calculada ( $D_{sup}$ ). A densidade mostrada na Tabela 4.8 é consistente com o valor  $1,07 \text{ g/cm}^3$  calculado pela regra das misturas para o compósito de matriz epóxi reforçado com 30 %vol. de curauá (CALLISTER & RETHWISCH, 2012). Os valores mostrados na Tabela 4.8 serviram de base para o cálculo da densidade superficial nas próximas etapas do trabalho. A FIG. 4.26 mostra o aspecto geral dos compósitos produzidos, do ponto de vista das espessuras.

**TAB. 4.7** Valores médios de densidade dos compósitos.

Grupo	$t$ (mm)	$\rho_v$ (g/cm <sup>3</sup> )	%vol. de tecido de curauá	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )
-1	6,9 ±0,1	1,00 ±0,03	43 ±1	6,9
0	11,7 ±0,3	1,07 ±0,02	34 ±3	12,5
+1	17,3 ±0,6	1,06 ±0,04	33 ± 2	18,3

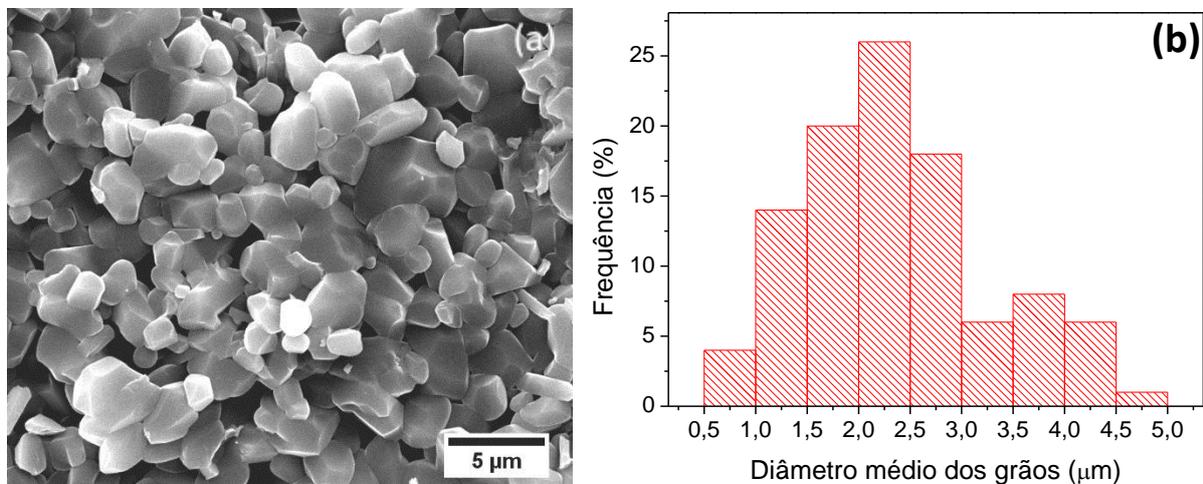


**FIG. 4.26** Aspecto geral dos compósitos produzidos com diferentes espessuras.

#### 4.3.2 CARACTERIZAÇÃO DA CERÂMICA

A cerâmica utilizada como camada frontal neste trabalho foi caracterizada por meio de MEV, para quantificação dos tamanhos de grão, e pela medida da densidade volumétrica (método de Arquimedes). Este material já foi investigado por outros autores, e suas propriedades já são bem conhecidas (TRINDADE *et al.*, 2014; TRINDADE *et al.*, 2014a).

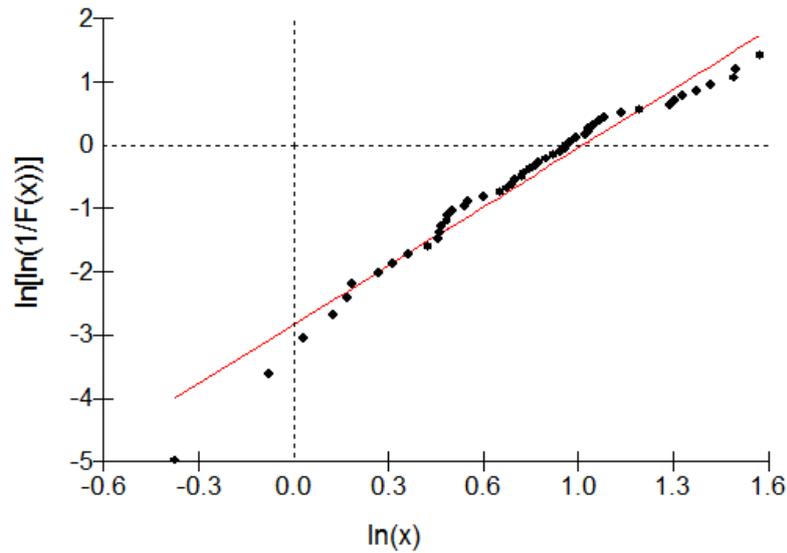
A FIG. 4.27a mostra o aspecto de fratura do material após o impacto balístico. Observa-se fratura frágil predominantemente intergranular, como já esperado. Por meio das imagens foi obtido o histograma de tamanhos de grão, que é mostrado na FIG. 4.27b.



**FIG. 4.27** Tamanhos de grão da cerâmica: (a) Micrografia eletrônica mostrando o aspecto da fratura e os grãos, 10.000x; (b) Histograma.

Observa-se pela FIG. 4.27a que os grãos da cerâmica são relativamente pequenos. As medidas de tamanho de grão indicam diâmetro médio de  $2 \pm 1$  µm. A FIG. 4.30b mostra uma distribuição aparentemente bimodal. Para verificar esta hipótese, foi aplicada a estatística de Weibull aos dados. Foram obtidos os parâmetros ( $\beta = 2,907$ ,  $\theta = 2,651$  e  $R^2 = 0,9637$ ) e a reta da distribuição de Weibull (FIG. 4.28). A observação da FIG. 4.28 juntamente com o valor do ajuste  $R^2$  não corroboram o indicativo de distribuição bimodal, de forma que os grãos podem ser

considerados como distribuídos de forma aleatória unimodal, similarmente à curva de Weibull.



**FIG. 4.28** Reta de Weibull para os diâmetros dos grãos.

A TAB. 4.8 mostra os valores de espessura ( $t$ ), densidade de Arquimedes ( $\rho_v$ ), densificação, valores médios, e o valor calculado para densidade superficial ( $D_{sup}$ ) para as cerâmicas utilizadas.

**TAB. 4.8** Valores médios de densidade das cerâmicas.

Grupo	Massa (g)	$t$ (mm)	$\rho_v$ (g/cm <sup>3</sup> )	Densificação média (%)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )
-1	80	8,3 ±0,2	3,56 ±0,06	89 ±2	29,5
0	100	10,5 ±0,2	3,44 ±0,09	86 ±2	36,1
+1	120	12,2 ±0,1	3,60 ±0,04	90 ±1	43,9

Os valores de densidade encontrados são coerentes e próximos entre si, permitindo a comparação de comportamento balístico entre as cerâmicas de diferentes espessuras.

### 4.3.3 CARACTERIZAÇÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO

A liga de alumínio 5052 H34, utilizada como última camada no SBM, teve sua densidade e dureza avaliados. A TAB. 4.9 mostra os valores de espessura ( $t$ ), densidade ( $\rho_v$ ), e os valores calculados para densidade superficial ( $D_{sup}$ ), para as placas de diferentes espessuras.

**TAB. 4.9** Valores médios de densidade das placas de liga 5052 H34.

Grupo	$t$ (mm)	$\rho_v$ (g/cm <sup>3</sup> )	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )
-1	3,02 ±0,04	2,69 ±0,04	8,12
0	5,15 ±0,05	2,66 ±0,03	13,70
+1	7,15 ±0,05	2,66 ±0,04	19,02

Os resultados da TAB. 4.9 mostram que o peso, e, conseqüentemente, a densidade superficial de cada placa, são decorrentes exclusivamente da espessura, pois as suas densidades volumétricas são estatisticamente equivalentes. Os valores de densidade são compatíveis com o valor 2,68 g/cm<sup>3</sup> disponível na literatura para a liga 5052 H34 (ASM, 2015).

A liga também foi avaliada pelo ensaio de dureza Rockwell superficial na escala 15T, para controle de qualidade. A TAB. 4.10 resume os resultados dos testes, relacionando a espessura ( $t$ ), com a dureza (HRS 15T) e desvio padrão.

**TAB. 4.10** Dureza das placas de liga de alumínio.

Grupo	$t$ (mm)	HRS 15T	Média geral
-1	3	66 ±1	
0	5	64 ±2	65 ±2
+1	7	64 ±2	

Os resultados da TAB. 4.10 mostram que as placas de diferentes espessuras possuem dureza muito próxima, sendo estas estatisticamente equivalentes. Segundo Callister e Rethwisch, 2012, a dureza segue uma relação aproximadamente proporcional em relação à resistência à tração. As propriedades

mecânicas em tração, como a resistência de  $234 \pm 4$  MPa e a extensão de  $19 \pm 2\%$  já foram obtidas para a liga 5052 H34 em trabalho anterior (BRAGA, 2015).

Sendo os resultados de densidade e dureza similares para as diferentes placas de liga 5052 H34, tem-se a segurança de que não irão influenciar nos ensaios posteriores (balísticos). Assim, o estudo da influência da espessura de cada no comportamento balístico de um SBM poderá ser realizado de forma mais precisa.

#### 4.4 SUPERFÍCIES DE RESPOSTA E OBTENÇÃO DO MODELO DE REGRESSÃO MÚLTIPLA

Foram elaborados corpos-de-prova com diferentes espessuras de camada, seguindo-se a matriz experimental de Box-Behnken (TAB. 2.4), e utilizando os grupos de materiais apresentados nas TAB. 4.7, 4.8 e 4.9. Na TAB. 4.11 estão resumidas as informações sobre espessuras ( $t$ ) e densidades superficiais ( $D_{sup}$ ) calculadas, utilizadas na análise do DBB. Os valores são levemente diferentes dos anteriores (TAB. 4.7, 4.8 e 4.9) pois é necessário que a diferença de espessura seja fixa entre os níveis. Por exemplo, entre cada nível de espessura da cerâmica há uma diferença de 2 mm.

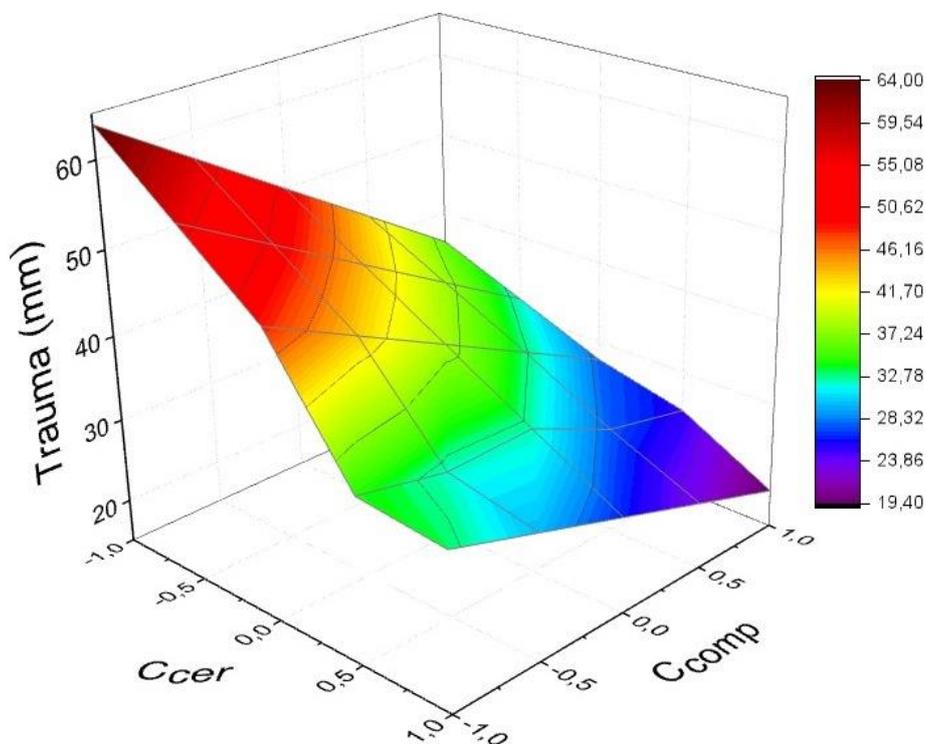
**TAB. 4.11** Espessuras utilizadas na análise de Box-Behnken e densidades superficiais calculadas para as camadas.

Grupo	Informação da camada					
	Cerâmica		Compósito		Alumínio	
	$t$ (mm)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )	$t$ (mm)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )	$t$ (mm)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )
-1	8,5	28,05	6,5	6,96	3,0	7,98
0	10,5	34,65	11,5	12,31	5,0	13,30
+1	12,5	41,25	16,5	17,65	7,0	18,62

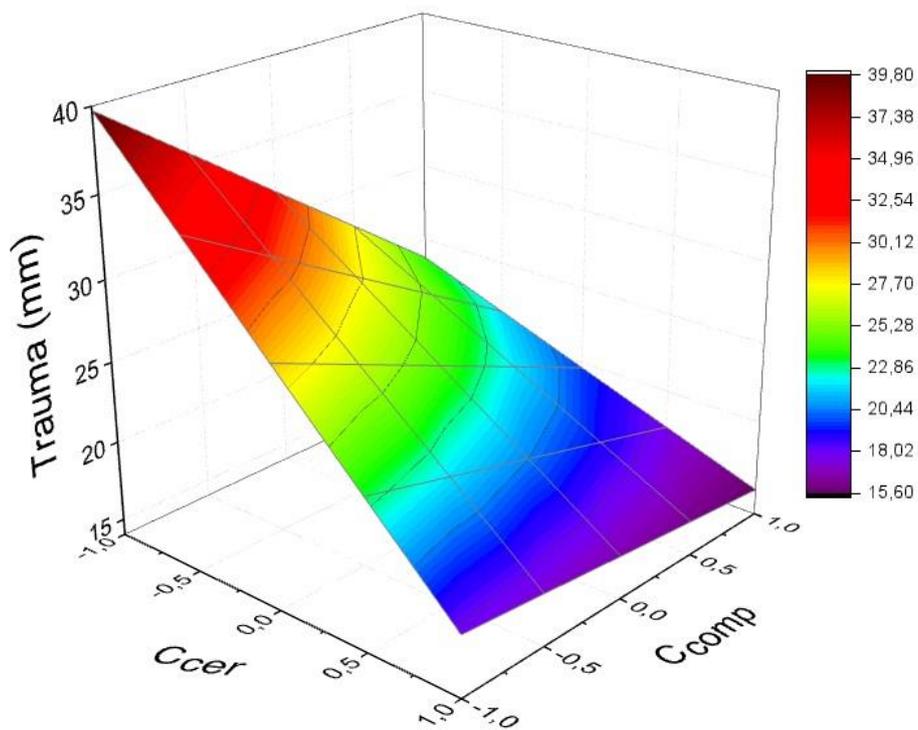
Para descrição dos SBMs foi estabelecida a nomenclatura  $\bar{I}$ , 0 e 1 para os níveis -1 (mínimo), 0 (médio) e +1 (máximo), respectivamente. Assim,  $1\bar{I}0$ , por exemplo, representa o SBM com camada cerâmica de 12,5 mm de espessura (nível +1),

compósito de 6,5 mm de espessura (nível -1), e alumínio de 5 mm de espessura (nível 0). A matriz de Box-Behnken prevê experimentos distribuídos nas configurações  $\bar{1}10$ ,  $1\bar{1}0$ ,  $\bar{1}10$ ,  $110$ ,  $\bar{1}0\bar{1}$ ,  $10\bar{1}$ ,  $\bar{1}01$ ,  $101$ ,  $0\bar{1}\bar{1}$ ,  $01\bar{1}$ ,  $0\bar{1}1$ ,  $011$ , que são denominados pontos fatoriais, bem como três experimentos no ponto 000, denominado ponto central. No presente trabalho, visando uma estatística mais precisa, optou-se por duplicar os pontos do planejamento de Box-Behnken, realizando-se 30 experimentos. Cada um destes corpos-de-prova foi submetido ao ensaio balístico com munição 7,62 mm. O resultado de trauma, juntamente com o aspecto geral das placas, pode ser visto no Apêndice II.

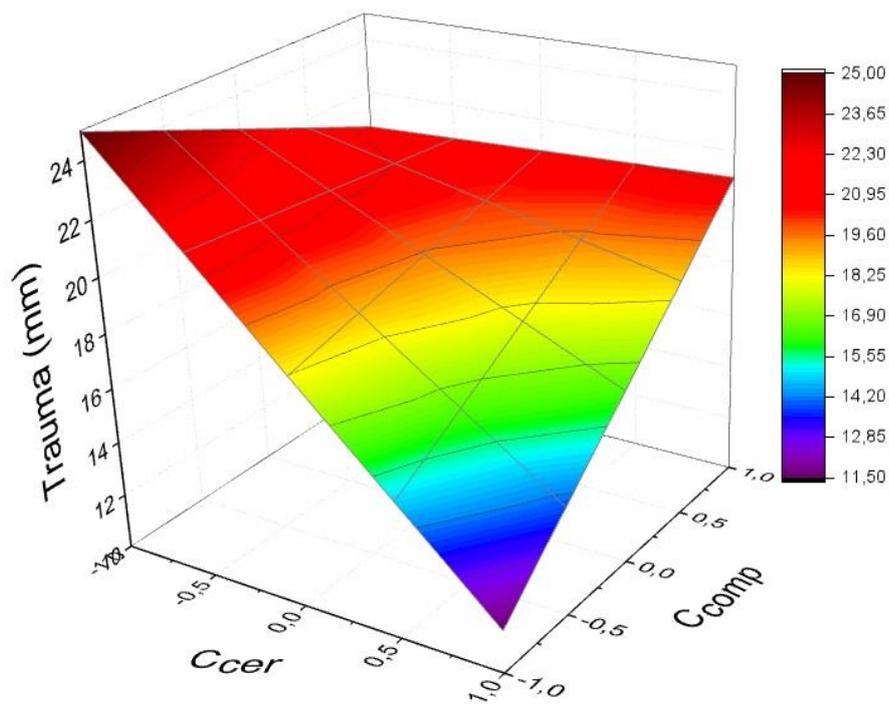
A partir dos valores de trauma, foram obtidas as superfícies de resposta (FIG. 4.29, 4.30 e 4.31), bem como a estatística e análise de variância (TAB. 4.12). Neste caso, GL indica os graus de liberdade da estatística, SQ a soma dos quadrados, QM os quadrados médios, F a estatística “F de Snedecor” e  $F_c$  seu valor crítico, utilizados em cálculos de inferência estatística.



**FIG. 4.29** Resposta do trauma em função das espessuras codificadas  $C_{cer}$  e  $C_{comp}$ , com espessura real do alumínio fixada em 3 mm.



**FIG. 4.30** Resposta do trauma em função das espessuras codificadas  $C_{cer}$  e  $C_{comp}$ , com espessura real do alumínio fixada em 5 mm.



**FIG. 4.31** Resposta do trauma em função das espessuras codificadas  $C_{cer}$  e  $C_{comp}$ , com espessura real do alumínio fixada em 7 mm.

**TAB. 4.12** Estatística e análise de Variância (ANOVA) da regressão múltipla.

Estatística					
R <sup>2</sup>	0,843	Erro padrão	5,28	Nº de observações	30
ANOVA	GL	SQ	QM	F	F <sub>c</sub>
Regressão	7	3,30 x10 <sup>3</sup>	472	16,90	1,66 x10 <sup>-7</sup>
Resíduo	22	6,14 x10 <sup>2</sup>	27,3		
Total	29	3,92 x10 <sup>3</sup>			

Pela análise da TAB. 4.12, observa-se que o coeficiente de correlação é alto,  $R^2 = 0,843$ , indicando que cerca de 84,3% das variações de trauma no experimento podem ser explicadas pela variação de espessura das camadas. Além disso, o valor da estatística F é altamente significativa ( $F \gg F_c$ ), podendo-se afirmar que as espessuras de camada influem fortemente na variação do trauma. Confirma-se então, a importância da espessura das camadas do SBM na absorção do trauma.

As superfícies de resposta das FIG. 4.29, 4.30 e 4.31 mostram que, como esperado, a cerâmica tem maior absorção de energia que o compósito, como pode ser visto na inclinação da curva de resposta, quando visualizado pelo plano definido pelos eixos  $C_{cer}$  e *Trauma*. Outro resultado de importância da regressão múltipla são os coeficientes da EQ. 2.12, que foram calculados para a presente regressão, e podem ser visualizados na TAB. 4.13.

**TAB. 4.13** Coeficientes da regressão múltipla para o *Trauma*.

Variável	Coefficiente	Erro padrão	p-valor
$\alpha$	24,21	1,41	3,25 x10 <sup>-14</sup>
$\beta_1$	-7,53	1,32	9,81 x10 <sup>-6</sup>
$\beta_2$	-4,55	1,32	2,31 x10 <sup>-3</sup>
$\beta_3$	-9,31	1,32	4,54 x10 <sup>-7</sup>
$\beta_4$	3,48	1,87	7,62 x10 <sup>-2</sup>
$\beta_5$	4,29	1,87	3,16 x10 <sup>-2</sup>
$\beta_6$	5,85	1,87	4,85 x10 <sup>-3</sup>
$\beta_9$	4,64	1,93	2,54 x10 <sup>-2</sup>

O coeficientes  $\beta_7$  e  $\beta_8$  foram considerados não-significativos para o nível de confiança de 90%, pois seus p-valores foram maiores que 0,1, e por isso não foram apresentados na TAB. 4.13, e foram retirados do modelo. O modelo ajustado para o trauma fica então:

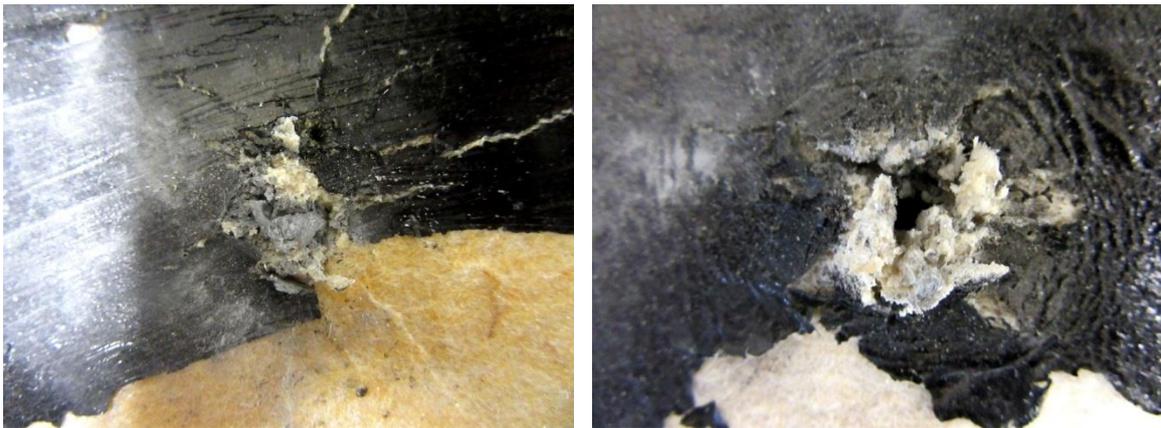
$$\begin{aligned} \text{Trauma (mm)} = & 24,21 \pm 1,41 - (7,53 \pm 1,32)C_{cer} - (4,55 \pm 1,32)C_{comp} \\ & - (9,31 \pm 1,32)C_{Al} + (3,48 \pm 1,87)C_{cer}C_{Comp} + (4,29 \pm 1,87)C_{cer}C_{Al} \\ & + (5,85 \pm 1,87)C_{comp}C_{Al} + (4,64 \pm 1,93) C_{Al}^2 \end{aligned} \quad \text{EQ. 4.3}$$

#### 4.5 AVALIAÇÃO DO MODELO DE REGRESSÃO MÚLTIPLA

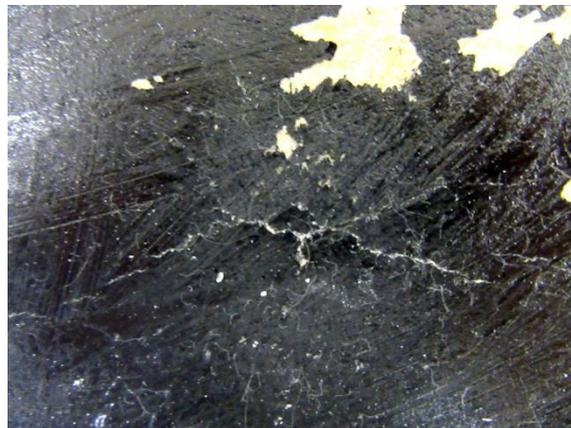
A EQ.4.3 apresenta um resultado que não era esperado, pois o coeficiente da regressão associado à camada cerâmica ( $\beta_1 = -7,53 \pm 1,32$ ) é numericamente menor que o associado ao alumínio ( $\beta_3 = -9,31 \pm 1,32$ ). A influência da espessura do compósito também foi significativa no *Trauma* ( $\beta_2 = -4,55 \pm 1,32$ ). O fato de  $\beta_3$  ser maior que  $\beta_1$  indica a maior importância da deformação plástica do material metálico da terceira camada na absorção do trauma do que a fratura da cerâmica. Interações entre as camadas foram identificadas, como evidenciado pelos coeficientes  $\beta_4$ ,  $\beta_5$ ,  $\beta_6$  e  $\beta_9$ . Tais interações podem ser atribuídas à propagação das ondas de choque através das camadas (ver seção 2.4). Estas ondas sofrem múltiplas reflexões nas interfaces, e a magnitude das ondas refletidas e transmitidas depende da diferença de impedância das diferentes camadas do SBM.

Apesar do menor coeficiente  $\beta_1$ , já foi mostrado na seção 4.2 a relevância da cerâmica na fragmentação do projétil, bem como sua importância no comportamento geral da blindagem. Pode ser verificado que alguns corpos-de-prova com cerâmica no nível -1 tiveram fragmentação parcial do projétil ou perfuração do compósito e/ou alumínio, como pode ser visto na FIG. 4.32. Isto pode indicar a aproximação do limite de diminuição de espessura da cerâmica, ou seja, é provável que a espessura da cerâmica não possa ser diminuída abaixo de 8,5 mm, pois neste caso haverá alto risco de perfuração devido à insuficiente fragmentação do projétil. Observa-se um bom desempenho da cerâmica na espessura de 10 mm, como pode ser visto na

FIG. 4.33. Neste caso ocorreu maior fragmentação do projétil e não houve fratura do compósito.



**FIG. 4.32** Detalhe do verso do compósito nas placa (a) 3-1 ( $\bar{I}10$ ) e (b) 5-2 ( $\bar{I}0\bar{I}$ ), que possuem a cerâmica no nível -1.



**FIG. 4.33** Detalhe do verso do compósito nas placa 12-1 (011). Observar que não há perfuração do compósito, apesar da maior  $D_{sup}$  (73,6 kg/m<sup>2</sup>) desta placa.

Considerando as interações,  $\beta_4$  (cerâmica-compósito),  $\beta_5$  (cerâmica-alumínio),  $\beta_6$  (compósito-alumínio) e  $\beta_9$  (2<sup>a</sup> ordem para alumínio), foi evidenciado um efeito maximizador do trauma transmitido ao usuário caso as camadas estejam ambas no nível mínimo (-1) ou máximo (+1). Isto ocorre pelo fato dos produtos  $C_{cer}C_{Al}$ ,  $C_{cer}C_{Comp}$ ,  $C_{comp}C_{Al}$  e  $C_{Al}^2$  se tornarem positivos, aumentando o *Trauma* na EQ. 4.3. Com base nesta equação, foram calculados os valores de trauma do modelo para os diferentes SBMs. A TAB. 4.14 mostra os valores de trauma para todas as configurações, com seus desvios em relação ao modelo.

**TAB. 4.14** Valores de trauma em comparação ao calculado pelo modelo.

<b>Tipo</b>	<b><math>C_{cer}</math></b>	<b><math>C_{comp}</math></b>	<b><math>C_{AI}</math></b>	<b>Trauma (mm)</b>	<b>Modelo (mm)</b>	<b>Erro (mm)</b>	<b>Perfurou?</b>
1-1	-1	-1	0	37	40	+3	Sim
1-2	-1	-1	0	37	40	+3	Sim
2-1	1	-1	0	20	18	-2	Não
2-2	1	-1	0	14	18	+4	Não
3-1	-1	1	0	29	24	-5	Não
3-2	-1	1	0	21	24	+3	Não
4-1	1	1	0	21	16	-5	Não
4-2	1	1	0	16	16	0	Não
5-1	-1	0	-1	53	50	-3	Sim
5-2	-1	0	-1	42	50	+8	Sim
6-1	1	0	-1	22	26	+4	Não
6-2	1	0	-1	22	26	+4	Não
7-1	-1	0	1	20	23	+3	Não
7-2	-1	0	1	25	23	-2	Não
8-1	1	0	1	9	16	+7	Não
8-2	1	0	1	21	16	-5	Não
9-1	0	-1	-1	51	49	-2	Sim
9-2	0	-1	-1	57	49	-8	Sim
10-1	0	1	-1	24	28	+4	Não
10-2	0	1	-1	35	28	-7	Não
11-1	0	-1	1	17	18	+1	Não
11-2	0	-1	1	25	18	-7	Não
12-1	0	1	1	14	21	+7	Não
12-2	0	1	1	26	21	-5	Não
13-1	0	0	0	28	24	-4	Não
13-2	0	0	0	28	24	-4	Não
13-3	0	0	0	27	24	-3	Não
13-4	0	0	0	22	24	+2	Não
13-5	0	0	0	20	24	+4	Não
13-6	0	0	0	19	24	+5	Não

Os maiores valores para o erro no trauma calculado foram 8 e 7 mm, consistentes com a dispersão encontrada nos valores experimentais. O valor calculado pelo modelo apresentou-se, na maioria das vezes, intermediário em relação aos valores medidos. A dispersão nos valores de trauma pode ser atribuída ao efeito de aresta, típico de blindagens com camada cerâmica formada por peças em mosaico (Chagas, 2014). Neste caso, os valores de trauma sofrem um aumento significativo, caso o impacto do projétil esteja próximo da interface entre duas peças do mosaico. Uma peça para proteção de aresta foi proposta como solução pra este efeito (Chagas, 2014).

#### 4.6 COMPARAÇÃO ENTRE AS BLINDAGENS TESTADAS

Para comparação entre os SBMs, foi desenvolvido um índice de desempenho que leva em consideração o *Trauma* na EQ. 4.3 e a densidade superficial ( $D_{sup}$ ). Ele foi denominado neste trabalho como índice Trauma-Peso (*ITP*), e é calculado pela EQ. 4.4.

$$ITP = \left(\frac{44 \text{ mm}}{Trauma}\right) \left(\frac{100}{D_{sup}}\right) \quad \text{EQ.4.4}$$

Neste caso, quanto maior o valor do *ITP*, em princípio, melhor o desempenho da blindagem em absorção de energia do projétil por unidade de massa e área. A TAB. 4.15 mostra este índice calculado para cada configuração. Estes valores também estão apresentados no Apêndice II.

**TAB. 4.15** Índices calculados para comparação entre os SBMs.

Configuração	Trauma (mm)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )	ITP (mm/kg/m <sup>2</sup> )
II0	40	50,5	2,2
1I0	18	64,6	3,8
I10	24	61,2	3,0
110	16	75,3	3,7
II	50	50,4	1,7
10I	26	64,5	2,6
I01	23	61,2	3,2
101	16	75,3	3,6
0II	49	52,1	1,7
01I	28	62,8	2,5
0I1	18	62,9	3,8
011	21	73,6	2,9
000	24	62,9	2,9

Um índice como este poderia levar em conta também o custo da blindagem. No entanto, como o custo das matérias-primas é bastante volátil, e depende de fatores como oferta, demanda, região geográfica e tempo, decidiu-se não utilizá-lo para cálculo do índice. Por outro lado, uma estimativa do custo por m<sup>2</sup> de cada placa balística foi fornecido nas tabelas do Apêndice II. Foram utilizados valores da literatura para estimativa do custo (CALLISTER & RETHWISCH, 2012; MONTEIRO *et al.*, 2016).

Pela análise da TAB. 4.15, observa-se que os maiores *ITP* foram calculados para as configurações 0I1 (*ITP* = 3,8), 1I0 (*ITP* = 3,8), 110 (*ITP* = 3,7) e 101 (*ITP* = 3,6). Observa-se a vantagem dos SBMs com camada de alumínio no nível +1, possuindo 3 dos 4 maiores *ITP*. De fato, a mesma análise estatística anterior (regressão múltipla) aplicada ao índice *ITP* como variável de saída, indica uma influência predominante da camada de alumínio, como mostra a TAB. 4.16, com seu alto coeficientes  $\beta_3$  e  $\beta_9$ , e seus p-valores altamente significativos. Isto ocorreu devido à grande absorção de energia do alumínio, aliada à sua baixa densidade (2,7 g/cm<sup>3</sup>).

**TAB. 4.16** Coeficientes da regressão múltipla para o *ITP*.

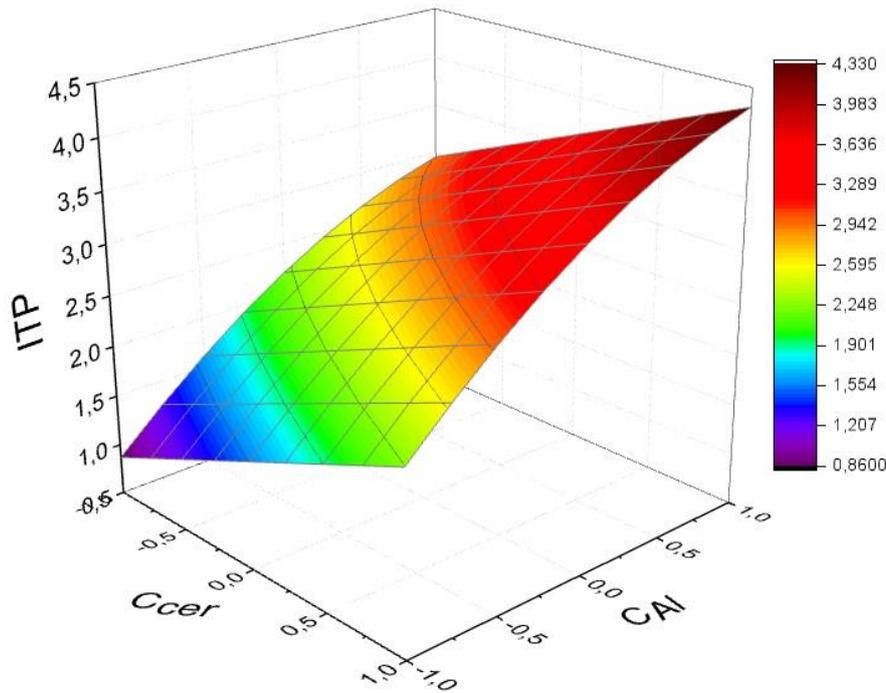
Variável	Coeficiente	Erro padrão	p-valor
$\alpha$	2,891	0,131	$3,51 \times 10^{-6}$
$\beta_1$	0,453	0,080	$2,39 \times 10^{-3}$
$\beta_3$	0,604	0,080	$6,47 \times 10^{-4}$
$\beta_4$	-0,233	0,113	$9,44 \times 10^{-2}$
$\beta_9$	-0,294	0,118	$5,48 \times 10^{-2}$

Uma propriedade interessante do *ITP* é o fato de apresentar um valor baixo quando o trauma se aproxima e ultrapassa os 44 mm, limite estabelecido pela NIJ-0101.06 (2008). Isto ocorreu, por exemplo, com os SBMs  $\bar{I}0\bar{I}$  e  $0\bar{I}\bar{I}$ . Ambos com *ITP* = 1,9, relativamente baixo, havendo nestes casos a fratura da camada posterior (ver Apêndice II). Neste caso, o *ITP* serviria como boa propriedade de projeto. Por outro lado, uma desvantagem observada no *ITP* é uma certa insensibilidade ao incremento do peso (ou  $D_{sup}$ ). Desta forma SBMs tão pesados quanto  $75 \text{ kg/m}^2$ , apresentaram índices relativamente altos (3,7 e 3,6, respectivamente, para as configurações 110 e 101). Ao se estabelecer, por exemplo, um critério de  $D_{sup}$  máxima em  $65 \text{ kg/m}^2$ , estas duas configurações de alto *ITP* seriam rejeitadas, pelo peso inaceitável. Outra alternativa é manter as razões entre espessuras dos corpos-de-prova com maiores *ITPs*, diminuindo a espessura total da blindagem.

Pela análise da TAB. 4.16, pode-se finalmente obter um modelo ajustado para o *ITP* variando-se as espessuras codificadas das camadas.

$$ITP = (2,89 \pm 0,13) + (0,45 \pm 0,08)C_{cer} + (0,60 \pm 0,08)C_{Al} - (0,23 \pm 0,2)C_{comp}C_{Al} - (0,29 \pm 0,12)C_{Al}^2 \quad \text{EQ. 4.5}$$

Um breve exame da EQ. 4.5 permite concluir que os valores máximos de *ITP* ocorrem para os valores mínimos de espessura do compósito ( $C_{comp}$ ), devido à interação com a camada de alumínio ( $C_{Al}$ ). Por este motivo,  $C_{comp}$  foi fixado em -1, e foi construída a superfície de respostas da FIG. 4.34.



**FIG. 4.34** Resposta do *ITP* em função das espessuras codificadas  $C_{cer}$  e  $C_{Al}$ , com espessura real do compósito fixada em 6,5 mm (nível -1).

Pela análise da FIG.4.34, observa-se que o ponto de máximo do modelo ocorre para  $C_{cer} = +1$ ,  $C_{comp} = -1$  e  $C_{Al} = +1$ , chegando ao valor de *ITP* de 4,3. Este resultado pode ser comparado com os valores da TAB. 4.15, e observa-se que as configurações experimentais de maior *ITP*,  $0\bar{1}1$  ( $ITP = 3,8$ ) e  $1\bar{1}0$  ( $ITP = 3,8$ ), são bem próximas ao otimizado (ponto de máximo da FIG.4.34).

#### 4.7 OTIMIZAÇÃO DE ESPESSURAS

Para se obter as espessuras otimizadas, deve-se manter a relação de espessuras de máximo *ITP* obtidas na seção anterior, diminuindo a espessura total até que se alcance o *Trauma* do modelo (EQ. 4.3) igual a 44 mm. Para isto, também é necessário obter o modelo do *Trauma* em função das espessuras nas variáveis originais. Estas variáveis são a espessura da cerâmica ( $t_c$ ), do compósito ( $t_{cp}$ ) e do alumínio ( $t_a$ ). Isto pode ser feito substituindo-se a EQ. 2.8 no modelo do *Trauma* com variáveis codificadas (EQ. 4.3). Obtém-se assim a equação:

$$\begin{aligned} \text{Trauma (mm)} = & 321,278 - 19,117t_c - 11,137t_{cp} - 34,231t_a + 0,869 t_c \cdot t_{cp} + 1,072t_c \cdot t_a \\ & + 0,585 t_{cp} \cdot t_a + 1,160 t_a^2 \end{aligned} \quad \text{EQ. 4.6}$$

Após isto, deve-se substituir o valor de *Trauma* pelo valor 44 mm, considerado limite pela NIJ-0101.06. O resultado é mostrado a seguir.

$$\begin{aligned} 277,278 - 19,117t_c - 11,137t_{cp} - 34,231t_a + 0,869 t_c \cdot t_{cp} + 1,072t_c \cdot t_a \\ + 0,585 t_{cp} \cdot t_a + 1,160 t_a^2 = 0 \end{aligned} \quad \text{EQ. 4.7}$$

Para resolver a EQ. 4.7, são necessárias relações entre as variáveis  $t_c$ ,  $t_{cp}$  e  $t_a$ . Para isto, foram considerada as seguintes configurações:

(1) Máximos *ITPs* da TAB. 4.17, que correspondem ao melhores resultados de corpos-de-prova testados no presente trabalho. Correspondem às configurações *ITP*, 0Ī1 (*ITP* = 3,8) e 1Ī0 (*ITP* = 3,8). Nas variáveis originais (espessuras), 0Ī1 é  $t_c = 10,5$  mm,  $t_{cp} = 6,5$  mm e  $t_a = 7$  mm, e 1Ī0 é  $t_c = 12,5$  mm,  $t_{cp} = 6,5$  mm e  $t_a = 5$  mm.

(2) Máximo *ITP* do modelo da EQ. 4.5 e FIG. 4.34. Corresponde à configuração 1Ī1. Nas variáveis originais,  $t_c = 12,5$  mm,  $t_{cp} = 6,5$  mm e  $t_a = 7$  mm.

Os resultados da otimização encontram-se na TAB. 4.17.

**TAB. 4.17** Espessuras otimizadas.

Caso	Configuração	Espessura otimizada			$D_{sup}$
		$t_c$	$t_{cp}$	$t_a$	
1	0Ī1	6,029	5,601	9,044	54,195
	1Ī0	4,269	5,550	10,673	55,140
2	1Ī1	5,390	5,005	9,624	53,881

Observa-se pela TAB. 4.17 que é possível reduzir a densidade superficial da configuração 1Ī1 para 53,881 kg/m<sup>2</sup>, se mantida a razão entre as espessuras das camadas. A redução, em princípio, respeitaria o desempenho mínimo especificado

pela NIJ-0101.06 de *Trauma* inferior a 44 mm. Entretanto, testes balísticos com esta configuração teriam de ser realizados para validação deste resultado.

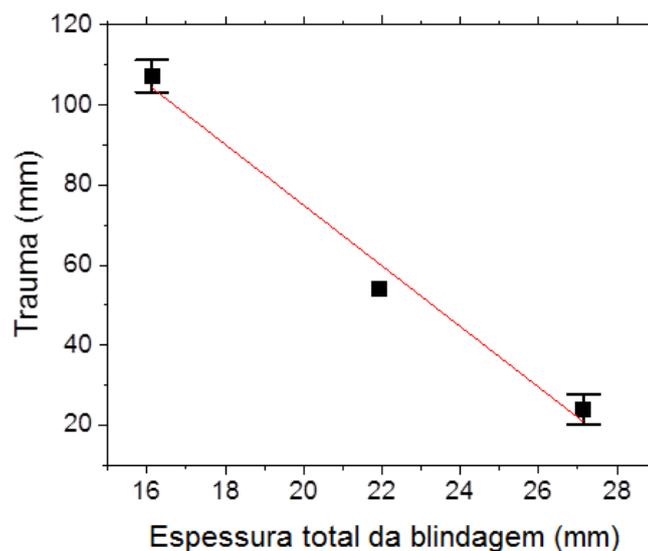
#### 4.8 OTIMIZAÇÃO LINEAR

Para fins de comparação das espessuras otimizadas obtidas na seção 4.7, foi realizada uma otimização “linear”, da configuração 000 ( $t_c = 10,5$  mm;  $t_{cp} = 11,5$  e  $t_a = 5,0$  mm), que foi utilizada em trabalhos anteriores (Monteiro *et al.*, 2014; 2015; 2016; 2016a, 2016c). Nesta metodologia, buscou-se diminuir proporcionalmente as espessuras, a fim de se obter o *Trauma* de 44 mm. Três espessuras distintas foram testadas, e foi realizada a interpolação linear, como segue:

$$Trauma \text{ (mm)} = -(7,58 \pm 0,96)T + (226,52 \pm 21,40) \quad \text{EQ. 4.8}$$

Onde:  $T$  = a espessura total do SBM em mm.

A FIG. 4.38 mostra o gráfico obtido experimentalmente, bem como a reta interpolada.



**FIG. 4.35** Otimização linear do SBM de configuração 000.

O coeficiente de correlação  $R^2 = 0,968$  é alto, indicando uma alta correlação da espessura total do SBM com o trauma. Igualando a EQ. 4.8 ao valor de 44 mm, e isolando a espessura T, obtém-se o valor de 24,08 mm para a espessura total. Reduzindo-se proporcionalmente as espessuras médias das camadas no nível 0 da TAB. 4.12, obtém-se  $t_c = 9,5$  mm,  $t_{cp} = 10,4$  e  $t_a = 4,1$  mm. Este SBM teria  $D_{sup} = 55,7$  kg/m<sup>2</sup>, que é significativamente mais pesado que o SBM com espessuras otimizadas obtido na seção 4.9, com  $D_{sup} = 53,881$  kg/m<sup>2</sup>. Isto mostra que a razão de espessuras obtida pela análise de Box-Behnken foi superior à simples otimização linear.

É importante ressaltar que ao igualar o *Trauma* a 44 mm, a placa balística ficaria no limite da aprovação/reprovação no teste balístico realizado com base na NIJ-0101.06. Por este motivo, no projeto da blindagem, como em todo projeto de engenharia, é necessário considerar um fator de segurança adequado a ser utilizado. O cálculo deste fator não será discutido no presente trabalho.

## 5 CONCLUSÕES

No presente trabalho, foram estudadas diversas configurações de blindagens utilizadas para proteção balística contra projéteis 7.62 mm. A seguir são apresentadas as conclusões do trabalho:

- Os sistemas de blindagem baseados em laminados de aramida possibilitaram a retenção do projétil 7,62 mm apenas na espessura de 50 mm, que equivale a uma densidade superficial de 54 kg/m<sup>2</sup>. Estas placas são significativamente mais espessas que blindagens multicamada previamente testadas para o mesmo nível de proteção (MONTEIRO *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2016; MONTEIRO *et al.*, 2016a).
- Com o auxílio do delineamento experimental de Box-Behnken e da Metodologia de Superfície de Resposta, foi possível quantificar a influência das espessuras de camada no comportamento geral da blindagem multicamada estudada. A maior influência provém do alumínio, com coeficiente da regressão múltipla linear  $\beta_3 = -9,31$  e quadrático  $\beta_9 = 4,64$ , seguido da cerâmica, com coeficiente  $\beta_1 = -7,53$ , e do compósito, com coeficiente  $\beta_2 = -4,55$ . O sinal de negativo nos coeficientes indica que, quanto maior a espessuras das camadas, menor é o trauma transmitido ao usuário da blindagem.
- Foi identificada e quantificada a interação entre as camadas, que é relativa à interação das ondas de choque nas interfaces entre materiais. Esta relação foi significativa em todas as interfaces, quantificada pelos parâmetros de segunda ordem  $\beta_4 = 3,48$ ,  $\beta_5 = 4,29$  e  $\beta_6 = 5,85$ .
- Foi desenvolvido um índice de desempenho, denominado Índice Trauma-Peso (*ITP*), para comparação entre os sistemas de blindagem testados. O *ITP* se mostrou adequado do ponto de vista da segurança, apresentando um baixo valor quando o trauma se aproxima e ultrapassa os 44 mm estabelecidos pela NIJ-0101.06 (2008).
- As configurações de maior *ITP* testadas experimentalmente neste trabalho foram a 0Ī1 e 1Ī0 (*ITP* = 3,8). Por meio da regressão múltipla aplicada ao *ITP* foi

possível verificar a condição otimizada, que é a configuração 111 ( $ITP = 4,3$ ). Mantendo-se esta proporção entre as espessuras das camadas, é possível diminuir a densidade superficial da blindagem para  $53,88 \text{ kg/m}^2$ , mantendo-se o desempenho mínimo especificado pela NIJ-0101.06. As espessuras otimizadas são, portanto,  $t_c = 9,62 \text{ mm}$ ,  $t_{cp} = 5,00 \text{ mm}$  e  $t_a = 5,39 \text{ mm}$ . Esta configuração obtida pela análise de Box-Behnken foi superior à simples otimização linear das espessuras do SBM previamente estudado, que apresentou densidade superficial de  $55,7 \text{ kg/m}^2$  (Monteiro *et al.*, 2014; 2015; 2016; 2016a, 2016c).

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar outras frações de curauá no compósito (40%, 50%, 60%), 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;
- Substituir a camada de alumínio por laminados de aramida, simulando o colete IIIA por trás da *hard armor*, aproximando a blindagem testada de sistemas reais de proteção pessoal.
- Testar o compósito reforçado com tecido de curauá como blindagem para outros níveis de proteção, como I, II ou IIIA.
- Realizar testes de  $V_{50}$  para o compósito reforçado com tecido de curauá.
- Desenvolver outros índices de desempenho que atuem nas limitações do índice Trauma-Peso (*ITP*), que rejeitem automaticamente o excesso de peso (ou  $D_{sup}$ ), além de incorporarem o custo de matérias-primas e processamento no projeto da blindagem.
- Aplicar o Planejamento de Box-Behnken ou o Fatorial Completo na obtenção da máxima energia absorvida em ensaios de velocidade residual.
- Realizar testes em escala piloto (placas de tamanho real) na configuração que obteve o melhor resultado neste trabalho, utilizando camada cerâmica de 9,62 mm, camada compósita de 5,00 mm e camada de alumínio de 5,39 mm.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- ABREU, M.M.S.P. **Estudo da Reocinética de Cura de Resinas Epoxídicas por Meio de Diferentes Técnicas de Análise**. Dissertação de Mestrado do Curso de Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo. 2008.
- AKELLA, K.; NAIK, N.K. Composite Armor – A Review. **Journal of the Indian Institute of Science**, Vol. 95, n. 3, p. 297-312. 2015.
- AKUBUE, P.C.; IGBOKWE, P.K.; NWABANNE, J.T. Production of Kenaf Fibre Reinforced Polyethylene Composite for Ballistic Protection. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, Vol. 6, n. 8, p. 1-7. 2015.
- 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.
- 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, n. 2, p. 105-111. 2004.
- AMARAL, C.R.; RODRIGUEZ, R.J.S.; GARCIA, F.G.; JUNIOR L.P.B., CARVALHO, E.A. Impact of Aliphatic Amine Comonomers on DGEBA Epoxy Properties. **Polymer Engineering and Science**, Vol. 54, n. 9, p. 2132-2138. 2013.
- 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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15000**: Blindagens para impactos balísticos - classificação e critérios de avaliação. Rio de Janeiro: ABNT. 2005.

ASM Aerospace Specification Metals Inc. **Aluminum 5052 H34**. Disponível em: <<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA5052H34>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

American Society for Testing Materials. **ASTM D256**: Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. Conshohocken, Pensilvania: ASTM. 2015.

American Society for Testing Materials. **ASTM D638 – 02a**: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. Conshohocken, Pensilvania: ASTM. 2015.

BANDARU, A.K.; CHAVAN, V.V.; AHMAD, S.; ALAGIRUSAMY, R.; BHATNAGAR, N. Ballistic Impact Response of Kevlar® Reinforced Thermoplastic Composite Armors. **International Journal of Impact Engineering**, Vol. 89, p.1-13. 2016.

BARBETTA, P.A.; REIS, M.M.; BORNIA, A.C. **Estatística para Cursos de Engenharia e Informática**. 3ª ed. São Paulo: Ed. Atlas. 2010.

BEN-DOR, G.; DUBINSKY, A.; ELPERIN, T. Optimization of Two-Component Composite Armor Against Ballistic Impact. **Composite Structures**, Vol. 69, p. 89-94. 2005.

BEN-DOR, G.; DUBINSKY, A.; ELPERIN, T. Improved Florence Model and Optimization of Two-Component Armor Against Single Impact or Two Impacts. **Composites Structures**, Vol. 88, p. 158-165. 2009.

BEZERRA M.A.; SANTELLI, R.E.; OLIVEIRA, E.P.; VILLAR, L.S.; ESCALEIRA, L.A. Response Surface Methodology (RSM) as a Tool for Optimization in Analytical Chemistry. **Talanta**, Vol. 76, p. 965-977. 2008.

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

BOX, G.E.P.; BEHNKEN, D.W. Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables. **Technometrics**, Vol. 2, n. 4, p. 455-475. 1960.

BOX, G.E.P.; WILSON, K.B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, Vol. 13, n. 1, p. 1-45. 1951.

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

BRAGA, F.O.; SIMONASSI, N.T.; CABRAL, A.C.; MONTEIRO, S.N.; ASSIS, F.S. **Tensile and Impact Properties of Two Fiber Configuration for Curaua Reinforced Composites**. In: MEYERS, M.A. *et al.*, (Eds.). Proceedings of the 3rd Pan American Materials Congress. The Minerals, Metals & Materials Series. 2017.

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](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d3665.htm)>. Acesso em: 18 out. 2016.

BRESCIANI, L.M.; MANES, A.; GIGLIO, M. Na Analytical Model for Ballistic Impacts Against Plain-Woven Fabrics with a Polymeric Matrix. **International Journal of Impact Engineering**, Vol. 78, p. 138-149. 2015.

BRYDSON, J.A. **Plastics Materials**. 7<sup>a</sup> ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. 1999.

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

CAREY, M.E. An Analysis of US Army Combat Mortality and Morbidity Data. **Journal of Trauma and Acute Care Surgery**, Vol. 40 (suppl.), p. S515-S528. 1988.

CERAMTEC ETEC GMBH. **Ceramic Materials for Lightweight Polymer Armor Systems**. 2010. Catálogo. Disponível em: <www.etec-ceramics.com>. Acesso em: 24 Out. 2016.

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.

COOPER, G.; GOTTS, P. **Ballistic Protection**. In: MAHONEY, P.F.; RYAN, J.M.; BROOKS, A.J.; SCHWAB, C.W (Eds.). *Ballistic Trauma: A Practical Guide*. 2<sup>a</sup> edição. Londres: Springer-Verlag London Limited. 2005.

COWIE, J. M. G. **Polymers: Chemistry & Physics of Modern Materials**. 2<sup>a</sup> ed. Nova York: Chapman & Hall. 1991.

CRUZ, R.B.; LIMA JR., E.P.; MONTEIRO, S.N.; LOURO, L.H.L. Giant Bamboo Fiber Reinforced Epoxy Composite in Multilayered Ballistic Armor. **Materials Research**, Vol. 18, n. 2, p. 70-75. 2015.

DEMPSEY, P.C.; HANDCOCK, P.J.; REHRER, N.J. Impact of Police Body Armour and Equipment on Mobility. **Applied Ergonomics**, Vol. 44, n. 6, p. 957-961. 2013.

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.; BLEZKI, A.K.; FINK, H.; SAIN, M. Progress Report on Natural Fiber Reinforced Composites. **Macromolecular Materials Engineering**, Vol. 299, n.1, p. 9-26. 2014.
- FAWAZ, Z.; BEHDINAN, K.; XU, Y. Optimum Design of Two-Component Composite Armour Against High-Speed Impact. **Composite Structures**, Vol. 73, p. 253-262. 2006.
- FERREIRA, S.L.C.; BRUNS, R.E.; FERREIRA, H.S.; MATOS, G.D.; DAVID, J.M.; BRANDÃO, G.C.; SILVA, E.G.P.; PORTUGAL, L.A.; REIS, P.S.; SOUZA, A.S.; SANTOS, W.N.L. Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. **Analytica Chimica Acta**, Vol. 597, p. 179-186. 2007.
- FLORENCE, A.L. **Interaction of Projectiles and Composite Armor: Part 2**. Menlo Park, California: Stanford Research Institute. 1969.
- GARCIA, F.G.; SOARES, B.G.; PITA, V.J.R.R.; SÁNCHEZ, R.; RIEUMONT, J. Mechanical Properties of Epoxy Networks based on DGEBA and Aliphatic Amines. **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 106, p. 2047-2055. 2007.
- GILIOLI, A.; MANES, A.; GIGLIO, M.; WIERZBICKI, T. Predicting ballistic impact failure of aluminum 6061-T6 with the rate-independent Bao-Wierzbicki fracture model. **International Journal of Impact Engineering**, Vol. 76, p. 207-220. 2015.
- GÜVEN, O.; MONTEIRO, S.N.; MOURA, E.A.B.; DRELICH, J.W. Re-emerging Field of Lignocellulosic Fiber – Polymer Composites and Ionizing Radiation Technology in their Formulation. **Polymer Reviews (Online)**. 2016.
- 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.
- GRUJICIC, M.; BELL, W.C.; PANDURANGAN, B. Design and Material selection guidelines and Strategies for Transparent Armor Systems. **Materials and Design**, Vol. 34, p. 808-819. 2012.

- HANI, A.R.A.; ROSLAN A.; MARIATTI, J.; MAZIAH, M. Body Armor Technology: A Review of Materials, Construction Techniques and Enhancement of Ballistic Energy Absorption. **Advanced Materials Research**, Vol. 488-489, p. 806-812, 2012.
- HAZELL, P.J.; ROBERSON, C.J.; MOUTINHO, M. The Design of Mosaic Armour: The Influence of Tile Size on Ballistic Performance. **Materials and Design**, Vol. 29, p. 1497-1503. 2008.
- HEGLUNG, N.C.; WILLEMS, P.A.; PENTA, M.; CAVAGNA, G.A. Energy saving gait mechanics with head-supported loads. **Nature**, Vol. 375, p.52-4. 1995.
- HETHERINGTON, J.G. The Optimization of Two Component Composite Armours. **International Journal of Impact Engineering**, Vol. 12, n. 3, p. 409-414. 1992.
- HOLEWIJN, M.; LOTENS, W. The Influence of Backpack Design on Physical Performance. **Ergonomics**, vol. 35, n. 2, p. 149-157. 1992.
- JESUS, P.R.R. **Efeitos da Adição do Fluoreto de Lítio na Densificação da Alumina Aditivada com 4% em Peso de Nióbia**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2016.
- JIUSTI, J.; KAMMER, E.H.; NECKEL, L.; LÓH, N.J.; TRINDADE, W.; SILVA, A.O.; MONTEDO, O.R.K.; DE NONI JR., A. Ballistic Performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Mosaic Armors with Gap-Filling Materials. **Ceramics International**, Vol. 43, p. 3697-2704. 2017.
- 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.

- KEDZIERSKI, P.; MORKA, A.; SLAWINSKI, G.; NIEZGODA, T. Optimization of Two Component Armour. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*, Vol. 63, n. 1, p. 173-179. 2015.
- KNAPIK, J.; REYNOLDS, K.L.; HARMAN, E. Soldier Load Carriage: Historical, Physiological, Biomechanical and Medical Aspects. ***Military Medicine***, Vol. 169, p. 45-56. 2004.
- KIM, Y.; YOO, J.; LEE, M. Optimal Design of Spaced Plates Under Hypervelocity Impact. ***Journal of Mechanical Science and Technology***, Vol. 26, p. 1567-1575, 2012.
- LEE, H. NEVILLE, K. ***Handbook of Epoxy Resins***. 1<sup>a</sup> ed. Nova York: McGraw-Hill. 1967.
- LEGG, S.J. Comparison of different modes of load carriage. ***Ergonomics***, Vol. 28; p. 809-17. 1985
- LIU, P.; ZHU, D.; YAO, Y.; WANG, J.; BUI, T.Q. Numerical Simulation of Ballistic Impact Behavior of Bio-Inspired Scale-Like Protection System. ***Materials and Design***, Vol. 99, p. 201-210. 2016.
- LOVERRO, K.L.; BROWN, T.N.; COYNE, M.E.; SCHIFFMAN, J.M. Use of Body Armor Protection with Fighting Load Impacts Soldier Performance and Kinematics. ***Applied Ergonomics***, Vol. 46, p. 168-175. 2015.
- LUZ, F.S.; LIMA JR.; E.P.; LOURO, L.H.L.; MONTEIRO, S.N. Ballistic Test of Multilayered Armor with Intermediate Epoxy Composite Reinforced with Jute Fabric. ***Materials Research***, Vol. 18, n. 2, p. 170-177. 2015.
- MALOIJ, G.M.O; HEGLUND, N.C.; PRAGER, L.M; CAVAGNA, G.A.; TAYLOR, C.R. Energetic cost of carrying loads: have African women discovered an economic way? ***Nature***, Vol. 319, p. 668-669. 1986.

MANO, E. B. **Introdução aos Polímeros**. 1<sup>a</sup> ed. São Paulo: Edgard Blücher. 1985.

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.

MEDVEDOVSKI, E. Ballistic Performance of Armour Ceramics: Influence of Design and Structure. Part 2. **Ceramics International**, Vol. 36, p. 2117-2127. 2010a.

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

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<sup>o</sup> 1/2, p. 19-26. 2002.

MONTEIRO, S.N.; AQUINO, R.C.M.P.; LOPES, F.P.D. Performance of Curaua Fibers in Pullout Tests. **Journal of Materials Science**, Vol. 43, p. 489-493. 2008.

- 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.; 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.; CALADO, V.; MARGEM, F.M. RODRIGUEZ, R.J.S. Thermogravimetric Stability Behavior of Less Common Lignocelulosic Fibers – A Review. **Journal of Materials Research and Technology**, Vol. 1, n. 3, p.189-199. 2012.
- 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.; 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.; SILVA, L.C.; LIMA JR., E.P. Natural Curaua Fiber-Reinforced Composites in Multilayered Ballistic Armor. **Metallurgical and Materials Transactions A**. Vol. 46, n. 10, p. 4567-4577. 2015.
- MONTEIRO, S.N.; MILANEZI, T.L.; LOURO, L.H.L.; LIMA JR., E.P.; BRAGA, F.O.; GOMES, A.V.; DRELICH, J.W. Novel Ballistic Ramie Fabric Composite Competing with Kevlar™ Fabric in Multilayered Armor. **Materials and Design**, Vol. 96, p. 263-269. 2016.
- MONTEIRO, S.N.; CANDIDO, V.S.; BRAGA, F.O.; BOLZAN, L.T.; WEBER, R.P.; DRELICH, J.W. Sugarcane Bagasse Waste in Composites for Multilayered Armor. **European Polymer Journal**, Vol. 78, p. 173-185. 2016a

MONTEIRO, S.N.; LOURO, L.H.L.; GOMES, A.V.; CHAGAS, C.F.M.; CALDEIRA, A.B.; LIMA JR., E.P. How Effective is a Convex Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Ceramic Armor? **Ceramics International**, Vol. 42, n. 6, p. 7844-7847. 2016b.

MONTEIRO, S.N.; BRAGA, F.O.; LIMA JR., E.P.; LOURO, L.H.L. DRELICH, J.W. Promising Curaua Fiber Reinforced Polyester Composite for High Impact Ballistic Multilayered Armor. **Polymer Engineering and Science** (Online). 2016c.

MOURA, M.F.S.F.; MORAIS, A.B.; MAGALHÃES, A.G. **Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico**. 2<sup>a</sup> ed. Porto: Publindústria Edições Técnicas. 2011.

NAIK, N.K.; SHRIRAO, P. Composites Structures under Ballistic Impact. **Composite Structures**, Vol. 66, p. 579-590. 2004.

NASCIMENTO, L.F.C.; HOLANDA, L.I.F.; LOURO, L.H.L.; MONTEIRO, S.N.; GOMES, A.V.; LIMA JR., E.P. Natural Mallow Fiber-Reinforced Epoxy Composite for Ballistic Armor Against Class III-A Ammunition. **Metallurgical and Materials Transactions A**, Vol. 48, n. 10, p. 4425-4431. 2017.

NIJ - NATIONAL INSTITUTE OF JUSTICE. **Standards - 0101.06**. Ballistic Resistance of Body Armor. U.S. Department of Justice/Office of Justice Programs. Washington: NIJ. 2008.

NUNES, L.M.; PACIORNIK, S.; D'ALMEIDA, J.R.M. Evaluation of the Damaged Area of Glassa-Fiber-Reinforced Epoxy-Matrix Composite Materials Submitted to Ballistic Impacts. **Composites Science and Technology**, Vol. 64, p. 945-954. 2004.

O'CONNOR, P.D.T.; KLEYNER, A. **Practical Reliability Engineering**. 5<sup>a</sup> ed. Chinchester: John Wiley & Sons. 2012.

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.

- ONG, C.W.; BOEY, C.W.; HIXSON, R.S.; SINIBALDI, J.O. Advanced Layered Personnel Armor. **International Journal of Impact Engineering**, Vol. 38, p. 369-383. 2011.
- OSSWALD, T.A.; MENGES, G. **Materials Science of Polymers for Engineers**. 3<sup>a</sup> ed. Munich: Hanser Publishers, 2012.
- PARK, H.; BRANSON, D.; KIM, S.; WARREN, A.; JACOBSON, B.; PETROVA, A.; PEKSOZ, S.; KAMENIDIS, P. Effect of Armor and Carrying Load on Body Balance and Leg Muscle Function. **Gait & Posture**, Vol. 39, p. 430-435. 2014.
- PICKERING, K.L.; EFENDY, A.; LE, T.M. A Review of Recent Developments in Natural Fibre Composites and their Mechanical Performance. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. Vol. 83, p. 98-112. 2016.
- POLYMER DATABASE. **Bisphenol-A Diglycidyl Ether Epoxy Resin**. Disponível em: <<http://polymerdatabase.com/polymers/bisphenol-adiglycidyletherepoxyresin.html>>. Acesso em: 11 out. 2016.
- RAHBEK, D.B.; SIMONS, J.W.; JOHNSEN B.B.; KOBAYASHI, T.; SHOCKEY, D.A. Effect of Composite Covering on Ballistic Fracture Damage Development in Ceramic Plates. **International Journal of Impact Engineering**, Vol. 99, p. 58-68. 2016.
- RATNA, D. **Handbook of Thermoset Resins**. 1<sup>a</sup> ed. Shawbury: Smithers Rapra. 2009.
- RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A.F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. 3<sup>a</sup> ed. Campinas: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor. 2014.
- ROHEN, L.A.; MARGEM, F.M.; MONTEIRO, S.N.; VIEIRA, S.N.; ARAÚJO, B.M.; LIMA, E.S. Ballistic Efficiency of an Individual Epoxy Composite Reinforced with Sisal Fibers in Multilayered Armor. **Materials Research**, Vol. 18, n. 2, p. 55-62. 2015.

- SANTOS, J.L. **Comportamento Balístico de Componente Cerâmico à Base de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-LiF}$  em Blindagem Multicamada**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2016.
- 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.
- SERJOUEI, A.; CHI, R.; ZHANG, Z.; SRIDHAR, I. Experimental Validation of BLV Modelo n Bi-Layer Ceramic Metal Armor. **International Journal of Impact Engineering**, Vol. 77, p.30-41. 2015.
- SHI, J.; GROW, D. Effect of Double Constraints on the Optimization of Two-Component Armor Systems. **Composites Structures**, Vol. 79, p. 445-453. 2007.
- 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.
- SILVA, I.L.A. **Propriedades e Estrutura de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Contínuas de Juta**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. 2014a.
- 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: **67<sup>th</sup> ABM International Congress**. Rio de Janeiro, 2012.
- SINGH, T.J.; SAMANTA, S. Characterization of Kevlar Fiber and Its Composites: A Review. **Materials Today: Proceedings**, Vol. 2, p. 1381-1387. 2015.
- SPINACÉ, M.A.; LAMBERT, C.S.; FERMOSELLI, K.K.G.; DE PAOLI, M.A. Characterization of lignocellulosic curaua fibers. **Carbohydrate Polymers**, Vol. 77, p. 47-53. 2009.

- STRASSBURGER, E. Ballistic testing of transparent armour ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**, Vol. 29, p. 267-273. 2009.
- STEMPIEN, Z. Effect of Velocity of the Structure-Dependent Tension Wave Propagation on Ballistic Performance of Aramid Woven Fabrics. **Fibres & Textiles in Eastern Europe**, Vol. 19, n. 4 (87), p. 74-80. 2011.
- TABIEI, A.; NILAKANTAN, G. Ballistic Impact of Dry Woven Fabric Composites: A Review. **Applied Mechanics Reviews**, Vol. 61, p. 1-13. 2008.
- TASDERMIRCI, A.; TUNUSOGLU, G.; 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.; 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.
- TRINDADE, W.; PRADO DA SILVA, M.H.; GOMES, A.V.; CAMPOS, J.B.; LOURO, L.H.L. Processing and Properties of Niobia-doped Alumina Sintered at 1400°C. **Materials Science Forum**, Vol. 798-799, p. 665-670. 2014.

- TRINDADE, W.; PRADO DA SILVA, M.H.; GOMES, A.V.; CHAGAS, C.F.M.; LOURO, L.H.L.; CAMPOS, J.B. Comparative Study of Solid-phase Assisted Sintering of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-doped alumina. **Materials Science Forum**, Vol. 798-799, p. 691-695. 2014a.
- 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.
- VIEIRA, S. **Análise de Variância (Anova)**. 1<sup>a</sup> ed. São Paulo: Ed. Atlas. 2006.
- 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.
- YADAV, S.; RAVICHANDRAN, G. Penetration Resistance of Laminated Ceramic/Polymer Structures. **International Journal of Impact Engineering**, Vol. 28, p. 557–574. 2003.
- YONG, M.; IANUCCI, L.; FALZON, B.G. Efficient Modelling and Optimization of Hybrid Plates Subject to Ballistic Impact. **International Journal of Impact Engineering**, Vol. 37, p. 605-624. 2010.

## 8 APÊNDICES

8.1 APÊNDICE 1 – VALORES MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE E CALCULADOS PARA A SEÇÃO 4.1

Laminado de 8 mm – 16 camadas –  $\rho_{sup} = 8,64 \text{ kg/m}^2$

Número	$V_i$ (m/s)	$E_i$ (kJ)	$V_r$ (m/s)	$E_r$ (kJ)	$E_{abs}$ (kJ)	% $E_{abs}$	$V_L$ (m/s)
1	869,845	3,67	845,720	3,47	0,20	5	203
2	853,552	3,53	829,830	3,34	0,19	5	200
3	861,796	3,60	832,624	3,36	0,24	7	222
4	867,505	3,65	840,217	3,42	0,23	6	216
5	858,141	3,57	830,284	3,34	0,23	6	217
6	850,856	3,51	829,020	3,33	0,18	5	192
7	858,170	3,57	831,208	3,35	0,22	6	213
8	854,918	3,54	821,368	3,27	0,27	8	237
9	867,649	3,65	836,119	3,39	0,26	7	232
10	865,006	3,63	837,235	3,40	0,23	6	217
11	871,387	3,68	857,414	3,57	0,12	3	155
<b>Média</b>	<b>861,7</b>	<b>3,60</b>	<b>835,5</b>	<b>3,39</b>	<b>0,22</b>	<b>6</b>	<b>210</b>
<b>Desv.Pad.</b>	<b>7,0</b>	<b>0,06</b>	<b>9,7</b>	<b>0,08</b>	<b>0,04</b>	<b>1</b>	<b>22</b>

Laminado de 25 mm – 48 camadas –  $\rho_{sup} = 27,0 \text{ kg/m}^2$

Número	$V_i$ (m/s)	$E_i$ (kJ)	$V_r$ (m/s)	$E_r$ (kJ)	$E_{abs}$ (kJ)	% $E_{abs}$	$V_L$ (m/s)
1	858,143	3,57	755,673	2,77	0,80	22	407
2	862,738	3,61	740,999	2,66	0,95	26	442
3	864,925	3,63	743,909	2,68	0,94	26	441
4	867,129	3,65	754,462	2,76	0,89	24	427
5	851,842	3,52	725,106	2,55	0,97	28	447
6	864,582	3,63	700,600	2,38	1,24	34	507
7	853,934	3,54	659,434	2,11	1,43	40	543
8	857,452	3,57	727,348	2,57	1,00	28	454
9	851,008	3,51	742,088	2,67	0,84	24	417
10	867,052	3,65	739,751	2,65	0,99	27	452
11	857,384	3,57	770,502	2,88	0,69	19	376

<b>Média</b>	<b>859,7</b>	<b>3,58</b>	<b>732,7</b>	<b>2,61</b>	<b>0,98</b>	<b>27</b>	<b>447</b>
<b>Desv.Pad.</b>	<b>5,9</b>	<b>0,05</b>	<b>30,4</b>	<b>0,21</b>	<b>0,20</b>	<b>6</b>	<b>46</b>

Laminado de 37,5 mm – 72 camadas –  $\rho_{sup} = 40,5 \text{ kg/m}^2$

<b>Número</b>	<b>V<sub>i</sub> (m/s)</b>	<b>E<sub>i</sub> (kJ)</b>	<b>V<sub>r</sub> (m/s)</b>	<b>E<sub>r</sub> (kJ)</b>	<b>E<sub>abs</sub> (kJ)</b>	<b>%E<sub>abs</sub></b>	<b>V<sub>L</sub> (m/s)</b>
1	848,192	3,49	377,0	0,69	2,80	80	760
2	852,932	3,53	306,8	0,46	3,07	87	796
3	840,699	3,43	221,2	0,24	3,19	93	811
4	831,596	3,35	161,6	0,13	3,23	96	816
5	840,822	3,43	526,3	1,34	2,09	61	656
6	847,643	3,48	571,0	1,58	1,90	55	626
7	844,103	3,46	454,9	1,00	2,45	71	711
8	846,289	3,47	0,0	0,00	3,47	100	846
9	846,672	3,48	397,2	0,77	2,71	78	748
10	837,036	3,40	396,4	0,76	2,64	78	737
11	845,773	3,47	0,0	0,00	3,47	100	846
<b>Média</b>	<b>843,8</b>	<b>3,45</b>	<b>310,2</b>	<b>0,63</b>	<b>2,82</b>	<b>82</b>	<b>759</b>
<b>Desv.Pad.</b>	<b>5,9</b>	<b>0,05</b>	<b>194,3</b>	<b>0,53</b>	<b>0,53</b>	<b>15</b>	<b>73</b>

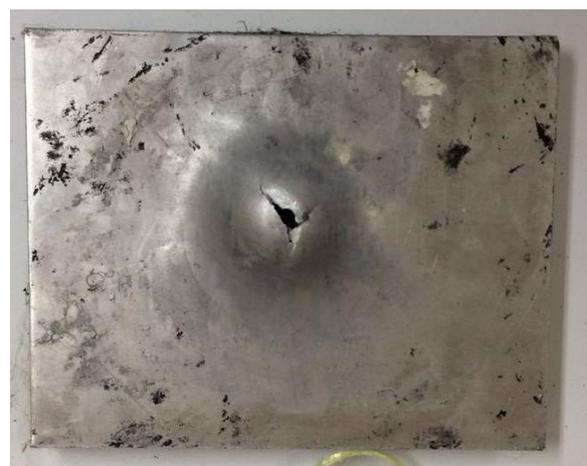
Laminado de 50 mm – 96 camadas –  $\rho_{sup} = 54 \text{ kg/m}^2$

<b>Número</b>	<b>V<sub>i</sub> (m/s)</b>	<b>E<sub>i</sub> (kJ)</b>	<b>V<sub>r</sub> (m/s)</b>	<b>E<sub>r</sub> (kJ)</b>	<b>E<sub>abs</sub> (kJ)</b>	<b>%E<sub>abs</sub></b>	<b>V<sub>L</sub> (m/s)</b>
1	856,190	3,56	0,0	0	3,56	100	856
2	861,712	3,60	0,0	0	3,60	100	862
3	855,375	3,55	0,0	0	3,55	100	855
<b>Média</b>	<b>857,8</b>	<b>3,57</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>3,57</b>	<b>100,0</b>	<b>858</b>
<b>Desv.Pad.</b>	<b>3,4</b>	<b>0,03</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,03</b>	<b>0,0</b>	<b>3</b>

V<sub>i</sub> = velocidade de impacto; E<sub>i</sub> = energia de impacto; V<sub>r</sub> = velocidade residual; E<sub>r</sub> = energia residual; E<sub>abs</sub> = energia absorvida; %E<sub>abs</sub> = percentual da energia total absorvida; V<sub>L</sub> = velocidade limite.

## 8.2 APÊNDICE 2 – ASPECTO GERAL DOS SBMs APÓS O ENSAIO BALÍSTICO

Designação	Configuração	$t$ (mm)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )	Custo (US\$/m <sup>2</sup> )	Trauma (mm)	Índice (mm/kg/m <sup>2</sup> )
1-1	Π0	20,0	50,5	1.139	37	2,2
1-2					37	



Designação	Configuração	$t$ (mm)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )	Custo (US\$/m <sup>2</sup> )	Trauma (mm)	Índice (mm/kg/m <sup>2</sup> )
2-1	1̄0	24,0	64,6	1.605	20	3,8
2-2					14	



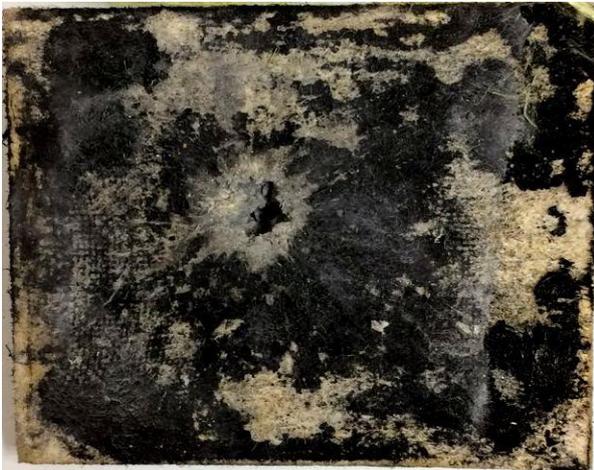
Designação	Configuração	$t$ (mm)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )	Custo (US\$/m <sup>2</sup> )	Trauma (mm)	Índice (mm/kg/m <sup>2</sup> )
3-1	T10	30,0	61,2	1.182	29	3,0
3-2					21	



Designação	Configuração	$t$ (mm)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )	Custo (US\$/m <sup>2</sup> )	Trauma (mm)	Índice (mm/kg/m <sup>2</sup> )
4-1	110	34,0	75,3	1.648	21	3,7
4-2					16	



Designação	Configuração	$t$ (mm)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )	Custo (US\$/m <sup>2</sup> )	Trauma (mm)	Índice (mm/kg/m <sup>2</sup> )
5-1	T0I	23,0	50,4	1.112	53	1,7
5-2					42	



Designação	Configuração	$t$ (mm)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )	Custo (US\$/m <sup>2</sup> )	Trauma (mm)	Índice (mm/kg/m <sup>2</sup> )
6-1	10I	27,0	64,5	1.578	22	2,6
6-2					22	



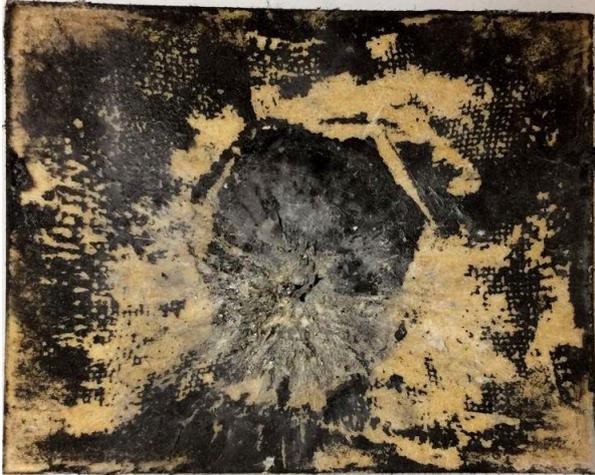
Designação	Configuração	$t$ (mm)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )	Custo (US\$/m <sup>2</sup> )	Trauma (mm)	Índice (mm/kg/m <sup>2</sup> )
7-1	T01	27,0	61,2	1.209	20	3,2
7-2					25	



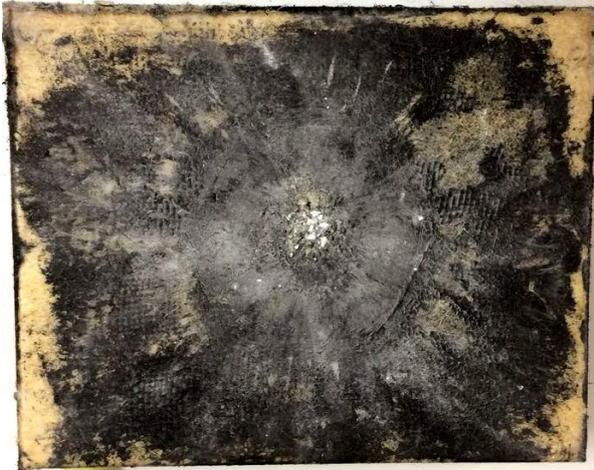
Designação	Configuração	$t$ (mm)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )	Custo (US\$/m <sup>2</sup> )	Trauma (mm)	Índice (mm/kg/m <sup>2</sup> )
8-1	101	31,0	75,3	1.675	9	3,6
8-2					21	



Designação	Configuração	$t$ (mm)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )	Custo (US\$/m <sup>2</sup> )	Trauma (mm)	Índice (mm/kg/m <sup>2</sup> )
9-1	0II	20,0	52,1	1.324	51	1,7
9-2					57	



Designação	Configuração	$t$ (mm)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )	Custo (US\$/m <sup>2</sup> )	Trauma (mm)	Índice (mm/kg/m <sup>2</sup> )
10-1	01I	30,0	62,8	1.367	24	2,5
10-2					35	



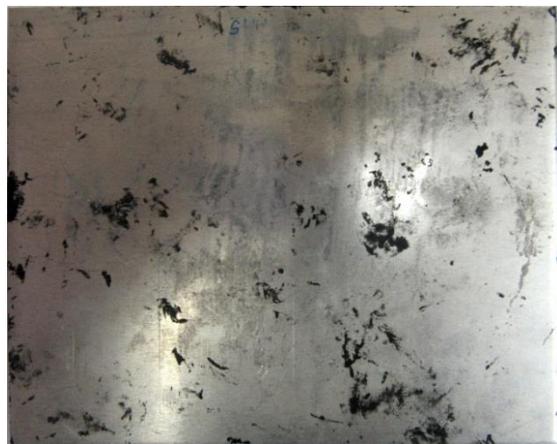
Designação	Configuração	$t$ (mm)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )	Custo (US\$/m <sup>2</sup> )	Trauma (mm)	Índice (mm/kg/m <sup>2</sup> )
11-1	0Ī1	24,0	62,9	1.421	17	3,8
11-2					25	



Designação	Configuração	$t$ (mm)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )	Custo (US\$/m <sup>2</sup> )	Trauma (mm)	Índice (mm/kg/m <sup>2</sup> )
12-1	011	34,0	73,6	1.464	14	2,9
12-2					26	



Designação	Configuração	$t$ (mm)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )	Custo (US\$/m <sup>2</sup> )	Trauma (mm)	Índice (mm/kg/m <sup>2</sup> )
13-1					28	
13-2	000	27,0	62,9	1.394	28	2,9
13-3					27	



Designação	Configuração	$t$ (mm)	$D_{sup}$ (kg/m <sup>2</sup> )	Custo (US\$/m <sup>2</sup> )	Trauma (mm)	Índice (mm/kg/m <sup>2</sup> )
13-4					22	
13-5	000	27,0	62,9	1.394	20	2,9
13-6					19	

