

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

**FABIO DA COSTA GARCIA FILHO**

**AVALIAÇÃO DO COMPÓSITO DE MATRIZ EPÓXI REFORÇADO  
COM FIBRAS DE PIAÇAVA PARA APLICAÇÃO EM SISTEMA DE  
BLINDAGEM MULTICAMADAS**

**Rio de Janeiro  
2018**

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**FABIO DA COSTA GARCIA FILHO**

**AVALIAÇÃO DO COMPÓSITO DE MATRIZ EPÓXI REFORÇADO COM FIBRAS  
DE PIAÇAVA PARA APLICAÇÃO EM SISTEMA DE BLINDAGEM  
MULTICAMADAS**

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

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Sergio Neves Monteiro

Rio de Janeiro  
2018

©2018

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha  
Rio de Janeiro – RJ CEP: 22.290-270

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

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

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

620.1 Garcia Filho, Fabio da Costa

G216a Avaliação de compósitos de matriz epoxídica reforçados com fibras de piaçava para aplicação em sistema de blindagem multicamadas/ Fabio Da Costa Garcia Filho; orientado por Sergio Neves Monteiro – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2018.

Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018.

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

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

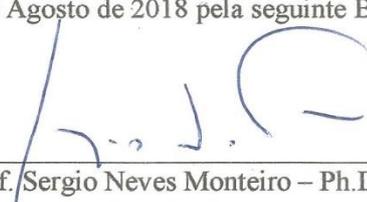
**FABIO DA COSTA GARCIA FILHO**

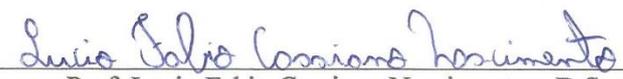
**AVALIAÇÃO DO COMPÓSITO DE MATRIZ EPÓXI REFORÇADO  
COM FIBRAS DE PIAÇAVA PARA APLICAÇÃO EM SISTEMA DE  
BLINDAGEM MULTICAMADAS**

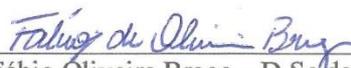
Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências dos Materiais.

Orientador: Sergio Neves Monteiro – Ph.D.do IME

Aprovada em 24 de Agosto de 2018 pela seguinte Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Sergio Neves Monteiro – Ph.D.do IME (Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Lucio Fabio Cassiano Nascimento – D.Sc do IME

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Fábio Oliveira Braga – D.Sc da faculdade SENAI

Rio de Janeiro  
2018

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Sergio Neves Monteiro, por quem tenho uma profunda admiração. A sua paixão pela Engenharia de Materiais me lembrou do por que da minha escolha por esse curso como minha profissão. Tenha certeza que os exemplos, orientação, apoio e amizade me inspiram a buscar, cada dia, o melhor que posso ser.

À minha esposa Mariana Zambelli por todo o apoio e amor. Sem você ao meu lado não teria conseguido. Amo você.

Aos meus pais Fabio e Cláudia Garcia e meu irmão Felipe Figueiredo por todos os ensinamentos, lições de vida, carinho, incentivo e apoio. Tenham certeza que essa conquista também é de vocês.

Aos meus amigos de IME Luana Demosthenes, Michelle Oliveira, Natália Barony e Gabriel Bartholazzi por me perturbarem sempre, pela diversão, pelas parcerias, pelo apoio e amizade.

Aos colegas de laboratório pela amizade e companheirismo, em especial, Fernanda Luz, Fábio Braga, Artur Camposo, Flávio James, Foluke Assis e, novamente, Luana Demosthenes e Michelle Oliveira.

À todos aqueles que mesmo sem saber ajudaram muito ao longo desse processo.

Aos professores da pós-graduação pelos ensinamentos.

À CAPES e CNPq pelo apoio financeiro para a minha formação como Mestre.

*“There is no way around the hard work.*

*Embrace it.”*

ROGER FEDERER

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	8
LISTA DE TABELAS .....	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	14
LISTA DE SÍMBOLOS .....	15
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1 Justificativa Do Trabalho .....	20
1.2 Objetivo do estudo .....	21
1.2.1 Objetivo Geral .....	21
1.2.2 Objetivos Específicos .....	21
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
2.1 Sistemas de Blindagens Balísticas .....	23
2.1.1 Avaliação do desempenho de sistemas de blindagem .....	23
2.1.2 Desenvolvimento dos sistemas de blindagem balística .....	24
2.1.3 Sistemas de Blindagem Multicamadas (SBM) .....	26
2.2 Fibras Naturais Lignocelulósicas (FNL) .....	28
2.2.1 Fibras de Piaçava .....	30
2.3 Compósitos de matriz polimérica reforçados com FNL .....	33
2.3.1 Processamento e cuidados com compósitos poliméricos reforçados com FNL .....	34
2.3.2 Mecanismos de falha em compósitos reforçados com FNL .....	35
2.4 Comportamento dinâmico dos materiais .....	37
2.5 Análises estatísticas .....	40
2.5.1 Análise de variância (ANOVA) .....	40
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>42</b>
3.1 Materiais utilizados .....	42
3.1.1 Fibra de Piaçava .....	42
3.1.2 Resina Epóxi e Endurecedor .....	43
3.1.3 Alumina, Nióbia e Polietileno Glicol .....	45
3.1.4 Placa de Liga de Alumínio .....	46
3.2 Fabricação das Placas compósitas .....	48
3.3 Fabricação dos corpos cerâmicos .....	51
3.3.1 Obtenção do pó cerâmico .....	51
3.3.2 Prensagem .....	53
3.3.3 Sinterização .....	53
3.4 Obtenção do sistema de blindagem multicamadas .....	56
3.5 Ensaio balístico .....	57
3.6 Microscopia eletrônica de varredura .....	60
3.7 Análise Térmica .....	61
3.8 Espectroscopia de infravermelho .....	62
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>63</b>
4.1 Caracterização Das Fibras de piaçava .....	63
4.1.1 Morfologia .....	63

4.1.2	Caracterização dimensional.....	66
4.1.3	Análise térmica.....	67
4.1.4	Espectroscopia de Infravermelho com transformadas de Fourier.....	69
4.2	Compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de piaçava.....	70
4.3	Ensaio balísticos .....	72
4.3.1	Material cerâmico.....	72
4.3.2	Ensaio Balístico de Profundidade de Indentação .....	72
4.3.3	Ensaio Balístico de Velocidade Residual.....	76
4.3.4	Estimativa da Velocidade Limite .....	80
4.3.5	Análise dos modos de falha.....	81
4.3.6	Mecanismo de captura de fragmentos .....	83
4.3.7	Impedância de choque .....	84
4.4	Análise de custo e peso .....	87
4.5	Novas condições investigadas.....	89
4.5.1	Ensaio Balístico de Velocidade Residual.....	92
4.5.2	Ensaio Balístico de Profundidade de Indentação .....	93
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>97</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>99</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>100</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 2.1 – Blindagem utilizada por soldados russos durante a segunda Guerra Mundial (QUORA, 2018). .....	25
FIG. 2.2 – Ilustração esquemática de um SBM.....	26
FIG. 2.3 – Estrutura da parede celular da FNL. Adaptado de KALIA et al, 2011.....	30
FIG. 2.4 – Piaçava como (a) palmeira, (b) fardo de fibras e (c) seção transversal observado no MEV (SATYANARAYANA et al, 2007). .....	31
FIG. 2.5 – Curvas de TG e DTG para fibra de piaçava (D’ALMEIDA et al, 2006). .....	33
FIG. 2.6 – Etapas do mecanismo de delaminação dos compósitos reforçados com fibras (a) antes da ruptura e (b) depois da ruptura. Adaptado de WESTIN et al, 2011.....	36
FIG. 2.7 – Falha por “pull-out” observado em compósito de poliéster reforçado com fibras de piaçava (MONTEIRO et al, 2006). .....	37
FIG. 2.8 – Mecanismos de falhas diversos que podem estar associados a compósitos reforçados por fibras (ANDERSON, 1995). .....	37
FIG. 2.9 – Transmissão de uma onda de choque de um meio de baixa impedância para um meio de alta impedância de choque: (a) representação gráfica e (b) perfil de tensão (MEYERS, 1994). .....	39
FIG. 2.10 - Transmissão de uma onda de choque de um meio de alta impedância para um meio de baixa impedância de choque: (a) representação gráfica e (b) perfil de tensão (MEYERS, 1994). .....	39
FIG. 3.1 – Piaçava (a) como recebida e (b) após ser cortada e pesada. ....	42
FIG. 3.2 – Estufa da marca ELKA utilizada na secagem das fibras. ....	43
FIG. 3.3 – Corpos de prova de tração de epóxi puro: (a) antes e (b) depois do ensaio.....	45
FIG. 3.4 – Placa de liga de alumínio 5052 H34 usada nos SBM. ....	47

FIG. 3.5 – Molde metálico utilizado na prensagem das placas compósitas.....	48
FIG. 3.6 – Procedimento para preparação dos compósitos (a) molde metálico na prensa, (b) molde metálico na prensa com as fibras já acomodadas, (c) preenchimento com resina epóxi e (d) aplicação da carga.....	49
FIG. 3.7 – Placas compósitas resultantes desse processamento (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40% e (e) 50% vol de fibras de piaçava. ....	50
FIG. 3.8 – Etapas do processamento do material cerâmico. ....	51
FIG. 3.9 – Moinho de bolas da marca MARCONI utilizado no processamento dos pós cerâmicos.....	52
FIG. 3.10 – Equipamentos utilizados no processamento cerâmico (a) estufa, (b) almofariz, (c) agitador de peneiras e (d) peneiras. ....	52
FIG. 3.11 – (a) Molde metálico para conformação do pó cerâmico e (b) prensa hidráulica utilizada. ....	53
FIG. 3.12 – Forno INTI utilizado na sinterização dos corpos cerâmicos.....	54
FIG. 3.13 – Corpos cerâmicos resultantes desse procedimento. ....	55
FIG. 3.14 – Adesivo de base poliuretano utilizado na colagem dos componentes do SBM...	56
FIG. 3.15 – SBM pronto.....	56
FIG. 3.16 – Equipamento de queda de peso utilizado para verificar se a plastilina se encontra com densidade adequada antes do ensaio balístico (a) cabine e (b) sistema de acionamento.....	57
FIG. 3.17 – Desenho esquemático que apresenta a configuração adotada para os ensaios balísticos.....	58
FIG. 3.18 – Corpos de prova posicionados antes do (a) ensaio balístico com plastilina e (b) ensaio de velocidade residual. ....	58

FIG. 3.19 – Equipamentos utilizados nos ensaios balísticos (a) munição calibre 7,62 mm e (b) provete equipado com mira laser.....	59
FIG. 3.20 – Sensor laser utilizado para medida da indentação causada à plastilina após o ensaio balístico. ....	59
FIG. 3.21 - O microscópio eletrônico de varredura utilizado foi do modelo Quanta FEG 250, da marca FEI. ....	61
FIG. 4.1 – Análise morfológica transversal das fibras de piaçava feitas com auxílio do MEV. ....	64
FIG. 4.2 – Análise morfológica da superfície da fibra de piaçava: (a) 100x e (b) 3000x.....	65
FIG. 4.3 - Histograma de distribuição do diâmetro das fibras recebidas no lote. ....	66
FIG. 4.4 – Análise térmica: (a) DSC e (b)TGA da fibra de piaçava. ....	68
FIG. 4.5 – Espectro de FTIR da fibra de piaçava.....	70
FIG. 4.6 – Superfície de fratura dos corpos cerâmicos após o ensaio balístico com magnificações de (a)6000x e (b)10000x. ....	72
FIG. 4.7 – Face frontal e posterior dos SBM depois do ensaio balístico: (a) e (b) ERPV10; (c) e (d) ERPV20; (e) e (f) ERPV30; (g) e (h) ERPV40; (i) e (j) ERPV50.....	74
FIG. 4.8 – Gráfico relacionando profundidade de indentação e fração de reforço. ....	75
FIG. 4.9 - Gráfico relacionando energia absorvida e fração de reforço. ....	77
FIG. 4.10 – Aspecto geral dos compósitos após o ensaio de velocidade residual: (a) ERPV10, (b) ERPV20, (c) ERPV30, (d) ERPV40 e (e) ERPV50. ....	79
FIG. 4.11 – Aspecto de falha de separação fibra/matriz; (a) macroscópico e (b) microscópico. ....	82
FIG. 4.12 – Absorção da nuvem de fragmentos pela fibra de piaçava: (a) 300x, (b) 1000x e (c) 2500x. ....	83

FIG. 4.13 – Ilustração gráfica do método de casamento de impedâncias. ....	86
FIG. 4.14 – Configuração do Kevlar <sup>TM</sup> : (a) macroscópico e (b) microscópico (MONTEIRO et al, 2016 b).....	90
FIG. 4.15 - Configuração do Dyneema®: (a) macroscópico e (b) microscópico (GREENHALGH et al, 2013). ....	90
FIG. 4.16 - Configuração da manta de curauá: (a) macroscópico e (b) microscópico (BRAGA, 2018).....	90
FIG. 4.17 – Aspecto macroscópico das placas compósitas após o ensaio balístico de velocidade residual: (a) PCA, (b) PLA, (c) ERPV30 e (d) PLCC. ....	93
FIG. 4.18 – Face frontal e posterior, respectivamente, dos compósitos de arranjo alternativo após o ensaio balístico de profundidade de indentação: (a) e (b) PCA, (c) e (d) PLA, (e) e (f) PLCC. ....	94
FIG. 4.19 - Face frontal e posterior, respectivamente, do compósito ERPV50C após o ensaio balístico de profundidade de indentação .....	95

## LISTA DE TABELAS

TAB. 2.1 – Classificação do nível de proteção de blindagens balísticas. Adaptado de NIJ (2008) .....	23
TAB. 2.2 – Propriedades de algumas FNL e sintéticas. Adaptado de MONTEIRO et al, 2011. ....	29
TAB. 2.3 – Propriedades típicas das fibras de piaçava. Adaptado de AQUINO et al, 2003. ..	32
TAB. 2.4 – Parâmetros estatísticos da Anova .....	41
TAB. 3.1 – Especificações da resina e endurecedor utilizados no desenvolvimento deste trabalho. ....	44
TAB. 3.2 – Resultados de densidade relativa obtidos para resina epóxi. ....	44
TAB. 3.3 – Resultado do ensaio de tração do epóxi puro. ....	45
TAB. 3.4 – Composição química da alumina. Adaptado de TRINDADE, 2012; DA SILVA, 2014. ....	46
TAB. 3.5 - Composição química da nióbia. Adaptado de TRINDADE, 2012; DA SILVA, 2014. ....	46
TAB. 3.6 – Composição química e propriedades da liga 5052 H34. Adaptado de ASM Aerospace Specification Metals Inc., 2015 .....	47
TAB. 3.7 – Análise das propriedades do lote de liga de alumínio (BRAGA, 2015). ....	47
TAB. 3.8 – Composição das placas compósitas produzidas. ....	49
TAB. 3.9 – Espessura, densidade e densificação do corpos cerâmicos produzidos. ....	55
TAB. 4.1 – Faixa de distribuição de diâmetro de diversas FNLs (MONTEIRO, 2011b).....	67
TAB. 4.2 – Condições investigadas na presente dissertação. ....	71
TAB. 4.3 – Espessura e densidade geométrica dos compósitos produzidos.....	71

TAB. 4.4 – Resultados de profundidade de indentação .....	73
TAB. 4.5 – Análise de Variância dos resultados obtidos após o teste de P-BFS.....	75
TAB. 4.6 – Teste de Tukey para a profundidade de indentação medida. ....	76
TAB. 4.7 – Energia absorvia após o ensaio de velocidade residual.....	76
TAB. 4.8 – Análise da variância para os resultados de velocidade residual.....	77
TAB. 4.9 – Teste de Tukey para absorção de energia após o ensaio de velocidade residual. .	78
TAB. 4.10 – Velocidade limite das condições estudadas e de outros compósitos reforçados com FNLs encontrados na literatura. ....	81
TAB. 4.11 - Composição química dos fragmentos depositados na superfície da fibra de piaçava analisado por EDS.....	84
TAB. 4.12 – Parâmetros empregados para o cálculo de impedância de choque.....	85
TAB. 4.13 – Densidade, módulo de elasticidade e velocidade da onda elástica para os compósitos estudados. ....	85
TAB. 4.14 – Resultados dos cálculos do modelo de casamento de impedâncias. ....	86
TAB. 4.15 – Custos e peso dos componentes do SBMs. ....	88
TAB. 4.16 – Comparativo entre custos totais de um SBM usando Kevlar <sup>TM</sup> e usando compósitos reforçados com fibras de piaçava. ....	88
TAB. 4.17 – Condições de arranjos alternativos estudados. ....	91
TAB. 4.18 - Energia absorvia após o ensaio de velocidade residual das condições de arranjo alternativo.....	92
TAB. 4.19 – Resultados de profundidade de indentação para os compósitos de arranjo alternativo.....	95
TAB. 4.20 – Configuração do compósito ERPV50C.....	95

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	- American Society for Testing of Materials
CAEx	- Centro de Avaliações do Exército
DTG	- Termogravimetria Derivativa
EDS	- Espectroscopia por Dispersão de Energia dos elétrons
IME	- Instituto Militar de Engenharia
MEV	- Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	- Norma Brasileira
NIJ	- National Institute of Justice
FNLs	- Fibras Naturais Lignicelulósicas
ISO	- International Organization for Standardization
PEG	- Polietileno Glicol
SBM	- Sistema de Blindagem Multicamada
TG	- Termogravimetria
PEUAPM	- Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular
UFRJ	- Universidade Federal do Rio de Janeiro

## LISTA DE SÍMBOLOS

$S$	- Constante do Material
$\rho$	- Densidade do Material
$\rho_c$	- Densidade do compósito
$\rho_m$	- Densidade da matriz
$\rho_f$	- Densidade da fibra
$E_L$	- Energia absorvida
$V_m$	- Fração volumétrica da matriz
$V_f$	- Fração volumétrica das fibras
$V$	- Volume específico
$E$	- Módulo de elasticidade
$E_m$	- Módulo de elasticidade da matriz
$E_f$	- Módulo de elasticidade da fibra
$E_c$	- Módulo de elasticidade do compósito
$L$	- Comprimento da fibra
$d$	- Diâmetro da fibra
$\beta$	- Módulo de Weibull
$R^2$	- Ajuste da curva de Weibull
$P$	- Pressão
$\sigma$	- Tensão
$\sigma$	- Tensão de limite de escoamento
$\sigma$	- Tensão de ruptura
$\varepsilon$	- Deformação
$(\Delta L/L_0)$	- Ductilidade do material
$U_s$	- Velocidade da onda de choque
$C_o$	- Velocidade da onda elástica
$V_{50}$	- Velocidade limite - 50% de probabilidade de perfuração
$V_L$	- Velocidade limite
$V_S$	- Velocidade de choque
$V_r$	- Velocidade residual
$U_p$	- Velocidade de partícula
$C$	- Velocidade do som no material

$m$	- Massa
$m_m$	- Massa de epóxi
$m_f$	- Massa de piaçava
$m_{ed}$	- Massa de endurecedor
$t$	- Tempo
$T$	- Temperatura
$Z$	- Impedância de Choque
ERP V10	- Compósito reforçado com 10% de Piaçava
ERP V20	- Compósito reforçado com 20% de Piaçava
ERP V30	- Compósito reforçado com 30% de Piaçava
ERP V40	- Compósito reforçado com 40% de Piaçava
ERP V50	- Compósito reforçado com 50% de Piaçava
ERP V50C	- Compósito reforçado com 50% de Piaçava em três camadas ortogonais
$H_0$	- Hipótese nula
$H_1$	- Hipótese alternativa
PCA	- Compósito reforçado com 30% de piaçava; arranjo curto e aleatório.
PLA	- Compósito reforçado com 30% de piaçava; arranjo longo e aleatório.
PLCC	- Compósito reforçado com 30% de piaçava; arranjo três camadas ortogonais.

## RESUMO

No atual cenário social, em que conflitos armados são cada vez mais recorrentes, a segurança urbana fica comprometida. Grupos de pesquisa tentam amenizar esse problema com o desenvolvimento de sistemas de blindagem cada vez mais eficientes. Entre os possíveis sistemas de proteção balística destacam-se os chamados sistemas de blindagem multicamadas (SBM), que fazem uso de diferentes classes de materiais em uma mesma configuração com o objetivo de promover uma proteção eficiente aliada com leveza. Usualmente um SBM é formado por três camadas: uma cerâmica frontal, um compósito e um metal dúctil. A função da cerâmica é dissipar energia cinética do impacto através de sua fragmentação dinâmica. A segunda camada deverá conter os fragmentos resultantes do impacto do projétil com a primeira camada. Finalmente, a camada metálica absorve a energia residual através da deformação plástica do metal. A presente dissertação avalia SBMs que utilizam como camada intermediária compósitos de matriz epóxi reforçados com 10%, 20%, 30%, 40% e 50% em volume de fibras de piaçava, além disso, diferentes configurações para a dispersão das fibras na matriz são propostas e comparadas. Os resultados dos ensaios balísticos foram comparados com diferentes materiais usualmente empregados na fabricação de coletes de proteção balística, bem como com outros compósitos reforçados com fibras. O nível de proteção desejado é o III, conforme critérios da norma NIJ 0101.04. Os SBMs avaliados mostraram igualmente eficientes em termos de eficiência balística. Através da análise da superfície de fratura do material foi possível verificar os mecanismos envolvidos na dissipação de energia do impacto balístico.

## ABSTRACT

In the current social scenario, where armed conflicts are increasingly recurrent, urban security is compromised. Research groups try to deal with such liability by developing more efficient armoring systems. Among the possible ballistic protection systems are the so-called multilayer armor systems (MAS), which make use of different classes of materials in the same configuration in order to promote efficient protection combined with lightness. Usually a MAS is formed by three layers: a frontal ceramic, a composite and a ductile metal. The function of the ceramic is to dissipate kinetic energy from impact through its dynamic fragmentation. The second layer should contain the fragments resulting from the impact of the projectile with the first layer. Finally, the metal layer absorbs the residual energy through the plastic deformation of the metal. The present dissertation evaluates MAS that use as intermediate layer epoxy matrix composites reinforced with 10%, 20%, 30%, 40% and 50% by volume of piassava fibers, in addition, different configurations for the dispersion of the fibers in the matrix are proposed and compared. The results of ballistic tests were compared with different materials commonly used in the manufacture of ballistic protection vests as well as with other fiber reinforced composites. The desired level of protection is III according to the criteria of NIJ 0101.04. The SBMs evaluated were equally efficient in terms of ballistic efficiency. Through the analysis of the fracture surface of the material it was possible to verify the mechanisms involved in the energy dissipation of the ballistic impact.

# 1 INTRODUÇÃO

Blindagem balística pode ser definida como equipamento ou item que seja capaz de promover proteção contra quaisquer ameaças balísticas específicas dentro da sua área coberta, podendo ser concebido ou adicionado a qualquer indivíduo, veículo ou edificação (NIJ 0101.04, 2000; ABRABLIN, 2018). Até meados do século XX, a composição das blindagens balísticas consistia basicamente de uma única camada de liga metálica, em geral aço. O desenvolvimento nos processos tecnológicos impactou diretamente em armamentos mais potentes e com um alto poder destrutivo associado. Com isso, a utilização de blindagens contando com apenas uma camada de aço torna-se inviável para certas aplicações, incluindo blindagem pessoal (coletes). Uma vez que para promover proteção contra armamentos e munições de alta energia, tal blindagem deverá apresentar uma espessura relativamente grande, o que acaba aumentando o peso da blindagem e consequentemente diminuindo a mobilidade (BÜRGER et al, 2012). Como alternativa, o desenvolvimento de estruturas de proteção contando com materiais leves e com maior desempenho para utilização em blindagem balística é de suma importância, uma vez que tais ameaças colocam em risco vidas humanas (SERJOUËI et al, 2015). Embora o desejo de melhorar a proteção balística continue a impulsionar o desenvolvimento de novos materiais e “*designs*”, o custo de produção é considerado um forte fator limitante. Assim, um colete balístico além de mobilidade (leveza), resistência à penetração e alta absorção de energia do impacto, deverá ainda apresentar relativo baixo custo de fabricação (BORVIK et al, 1999; LEE et al, 2003).

Neste contexto, destacam-se os chamados Sistemas de Blindagens Multicamadas (SBMs ou do inglês *Multilayered Armor System - MAS*) que além de prover uma proteção leve e efetiva, funcionam não apenas absorvendo a energia do projétil, mas também impedindo a penetração de fragmentos provenientes do impacto balístico (MONTEIRO et al., 2014). Geralmente, SBMs são sistemas híbridos de duas ou três camadas, isto é, fazem uso de diferentes classes de materiais em uma única configuração para produzir a proteção balística mais eficiente. A primeira camada (frontal) usualmente é de material cerâmico, que é um material duro e frágil, com elevada resistência à compressão. Tal material tem como principal objetivo dissipar a maior parte da energia do impacto balístico através de fragmentação dinâmica (LOURO et al, 1989), além de promover a erosão, deformação e fragmentação da

ponta do projétil (DA SILVA et al, 2014; MEDVEDOVSKI, 2010). Para segunda camada (intermediária), são utilizados normalmente materiais de fibras sintéticas de alto desempenho, tais como Kevlar®, Twaron®, Dyneema® e Spectra®, que são materiais leves e que tem como principal papel absorver a energia restante proveniente dos fragmentos do projétil e da cerâmica (WANG, 2014; MONTEIRO et al, 2015). A terceira camada (posterior) pode ou não ser incorporada aos SBMs. Quando existir, deve ser composta por um metal dúctil e leve. Em geral, é utilizada uma liga de alumínio que vai se deformar plasticamente para absorver a energia residual do projétil, reduzindo desta forma o trauma causado no usuário.

As fibras sintéticas de alto desempenho usualmente utilizadas como camada intermediária dos SBMs, apresentam como contraponto o fato de possuírem um alto custo de produção, de serem não renováveis e terem uma vida útil relativamente curta. Com isso, a utilização de compósitos reforçados com fibras naturais lignocelulósicas (FNL) aparece como alternativa para utilização em SBMs. Por apresentarem características únicas como baixo peso específico, baixo custo de produção, biodegradabilidade, natureza não tóxica e por terem propriedades mecânicas comparáveis a outros tipos de fibras sintéticas utilizadas como reforço (MARGEM, 2013; MONTEIRO et al, 2009; NABI SAHED et al, 1999). Monteiro e coautores (2014) mostraram em seus estudos que o fato da camada intermediária ser composta por um material de elevada resistência à tração não é tão importante para absorção do trauma em SBMs. Além disso, é de grande importância a capacidade da fibra de capturar fragmentos por incrustação mecânica, através de mecanismos de forças de Van der Waals e atração eletrostática. Desta forma, FNLs podem apresentar boa eficiência balística e tal assunto tem sido amplamente pesquisado nos últimos anos (NASCIMENTO et al, 2018; LUZ et al, 2018; BRAGA et al, 2018, ASSIS et al, 2018).

Este trabalho busca avaliar SBMs compostos por três camadas: Cerâmica de alumina ( $Al_2O_3$ ) com adição de nióbia ( $Nb_2O_5$ ), compósitos de epóxi reforçado com fibras longas, alinhadas e unidirecionais de piaçava, e camada metálica de liga de alumínio (H34 5052).

## 1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O desenvolvimento desta dissertação de mestrado é inserido no contexto de uma linha de pesquisa já consolidada dentro da Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais (SE-4) do

Instituto Militar de Engenharia (IME), que através de diversas teses e dissertações têm como objetivo principal o estudo e aprimoramento de Sistemas de Blindagens Multicamadas. Para tal, nesses sistemas há a utilização de compósitos de matriz polimérica reforçados com Fibras Naturais Lignocelulósicas como alternativa aos materiais sintéticos que são convencionalmente utilizados, tais como Kevlar® (aramida), Spectra® ou Dyneema® (polietileno de ultra-alto peso molecular - PEUAPM). O assunto tratado nesta dissertação é de interesse para o Exército Brasileiro e dá continuidade a estudos anteriores de diferentes fibras naturais: juta, ramie, bambu, palf, coco, entre outros. Estes resultados servirão como banco de dados e diretrizes para o desenvolvimento de novas pesquisas com novas fibras, visando a melhoria dos SBMs, tornando-os mais seguros, mais baratos e dentre outras vantagens.

## 1.2 OBJETIVO DO ESTUDO

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta dissertação é avaliar o desempenho de SBMs que utilizem como segunda camada (camada intermediária) compósitos poliméricos de epóxi reforçado com fibras de piaçava com cinco composições distintas: 10%, 20%, 30%, 40% e 50% em volume. O trabalho visa propor a utilização deste tipo de material como alternativa a materiais que são usualmente empregados em sistemas de blindagem.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Verificar se a eficiência balística para os materiais testados como camada intermediária da blindagem multicamadas utilizando a metodologia de perfuração e impressão de face posterior descrita na norma internacional NIJ 0101.04 (2000), para verificar se a blindagem resiste ao critério de 44 mm;
2. Verificar qual fração volumétrica de fibra (10%, 20%, 30%, 40% ou 50%) que leva a maior eficiência balística (maior absorção de trauma);

3. Comparar o desempenho balístico individual dos compósitos de epóxi reforçados com fibras de piaçava com outros trabalhos que também utilizaram FNLs como reforço de compósitos de matriz polimérica para utilização em blindagem balística tais como epóxi-malva (NASCIMENTO et al, 2017), poliéster-juta (ASSIS et al, 2018), poliéster-sisal (BRAGA et al, 2018), poliéster-curauá (MONTEIRO et al, 2017), epóxi-sisal (ROHEN et al, 2015) e epóxi-juta (LUZ et al, 2015);

4. Associar o desempenho balístico com a impedância de choque dos compósitos utilizados como camada intermediária;

5. Fazer uma análise de custos e peso dos sistemas de blindagem produzidos nesse trabalho e comparar com sistemas de blindagem comercialmente utilizados;

6. Verificar os mecanismos de absorção de energia dos materiais submetidos ao impacto balístico.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SISTEMAS DE BLINDAGENS BALÍSTICAS

#### 2.1.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE BLINDAGEM

O desempenho de uma determinada proteção balística segue o padrão internacionalmente reconhecido do órgão norte americano *National Institute of Justice* (NIJ). Tal instituto especifica normas e padrões de ensaio, e com isso é capaz de classificar o nível de proteção oferecido por determinada blindagem. Esta classificação é função do calibre e velocidade do projétil à qual a blindagem é submetida. A TAB. 2.1 apresenta tal classificação.

**TAB. 2.1 – Classificação do nível de proteção de blindagens balísticas. Adaptado de NIJ (2008)**

Nível de proteção	Calibre	Massa do projétil (g)	Velocidade Mínima do Projétil (m/s)
I	.22 LR	2,6	310
	.38 SPL	10,2	239
II-A	9 mm	8	320
	357 Mag	10,2	369
II	9 mm	8	343
	357 Mag	10,2	410
III-A	9 mm	8	411
	.44 Mag	15,6	411
III	7.62 x 51	9,7	823
IV	.30 - 06	10,8	853

Há outras normas e padrões para avaliações de sistemas de blindagem balística. Um exemplo é a norma Brasileira ABNT NBR 15000 que aponta diretrizes para ensaios balísticos no Brasil. Por outro lado, a norma internacional NIJ 0101.04 (2000) é a mais difundida e, portanto a que fora seguida no desenvolvimento dessa dissertação para avaliar a eficiência de SBMs com classificação nível III.

Outras metodologias de avaliação da eficiência de um sistema de blindagem se baseiam na energia cinética do projétil no momento do impacto. Wang et al (2014) mostraram que a velocidade do projétil é de vital importância para a determinação da energia cinética e,

portanto deve ser considerada como variável primária e independente obtida nos ensaios de sistemas balísticos. A chamada velocidade limite ( $V_L$ ) é considerada com um dos fatores fundamentais na avaliação de sistemas de blindagem, e pode ser definida como a máxima velocidade para a qual o projétil é retido pelo sistema de blindagem. Uma das maneiras mais usuais para a determinação do  $V_L$  é através do chamado  $V_{50}$ , que é a velocidade em que a probabilidade da blindagem ser perfurada pelo projétil é de 50%. Mas em situações de disparos alta energia, a determinação de  $V_L$  através de  $V_{50}$  pode se tornar tecnicamente inviável isso porque para é necessário diminuir a quantidade de pólvora da munição de modo que o disparo apresente uma menor velocidade. No entanto, essa diminuição na quantidade de propelente pode resultar no confinamento da munição dentro do cano do dispositivo de disparo. Deste modo, Morye et al (2000) utilizaram um modelo analítico que seria capaz de estimar a velocidade limite com base na energia cinética absorvida pela blindagem ( $E_A$ ), apresentada na equação 2.1.

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

Onde  $V_0$  e  $V_R$  são as velocidades inicial e residual do projétil, respectivamente. E  $m$  a massa do projétil. Na situação em que  $V_R$  for igual a zero teríamos que o sistema de blindagem fora capaz de absorver totalmente a energia cinética do projétil, ou seja, o projétil seria barrado pelo sistema. Tomando essa condição de contorno em consideração, a velocidade limite pode ser estimada pela equação 2.2.

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

### 2.1.2 DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS DE BLINDAGEM BALÍSTICA

Meyers (1994) afirma que a blindagem corporal destina-se a proteger os indivíduos, principalmente, contra fragmentos e projéteis de armas. Até meados do século XX as blindagens eram compostas basicamente de uma camada de material metálico, em geral aço. É possível ver um exemplo disso nas proteções balísticas utilizadas por soldados Russos durante a Segunda Guerra Mundial, como mostrado nas FIG.s 2.1(a) e 2.1(b). Tais proteções eram fabricadas em chapas de aço 36SGN, com 2 mm de espessura, pesando mais de 3,5 kg

por placa, mas que em termos de performance mal se comparariam com uma proteção nível II de hoje em dia (QUORA, 2018).



**Figura 2.1 – Blindagem utilizada por soldados russos na segunda Guerra Mundial (QUORA, 2018).**

O avanço das tecnologias de fabricação de armamentos e munições, aliado ao cenário atual de guerra moderna e guerrilha urbana, que se espalha por diversas cidades ao redor do mundo, faz com que seja de extrema importância o estudo e desenvolvimento de tecnologia de fabricação de blindagens modernas que possam assegurar proteção adequada aos usuários (SANTOS et al, 2006). Entre os requisitos que devem ser levados em conta para o desenvolvimento de proteções balísticas eficientes destacam-se propriedades como: leveza, de modo que o usuário tenha sua mobilidade pouco impactada; resistência à penetração, de modo que o projétil não seja capaz de perfurar a proteção; e alta absorção de energia, a fim de evitar que o usuário sofra as consequências de um trauma. Tais propriedades devem se equilibrar a fim de se obter a proteção mais eficiente possível, mas por outro lado, o custo de fabricação também deve ser levado em consideração, já que é fator limitante em qualquer sistema de produção (BORVIK et al, 1999; LEE et al, 2003).

Difícilmente um único material seria capaz de cumprir todos os pré-requisitos da fabricação de blindagens eficientes. Uma forma de solucionar essa situação foi à introdução de novas combinações de materiais leves e com melhor desempenho balístico, tais como compósitos de fibras e materiais cerâmicos (BÜRGER et al, 2012). Durante a última década, diversos estudos foram feitos focando no desenvolvimento de sistemas de blindagens leves que utilizam materiais como cerâmicas avançadas e compósitos reforçados com fibras, e seu desempenho balístico para uso individual, em veículos e aplicações estruturais (ABRATE, 1998; MEDVEDOVSKI, 2006; TASDEMIRCI et al, 2012).

### 2.1.3 SISTEMAS DE BLINDAGEM MULTICAMADAS (SBM)

Os sistemas de blindagem mais eficientes, do ponto de vista de relação desempenho por unidade de massa, são os Sistemas de Blindagem Multicamadas (SBMs), ilustrado na FIG. 2.2. Os SBMs são compostos, de forma geral, por camadas de diferentes materiais em que cada material tem uma função específica na proteção contra impactos balísticos. Os SBMs para munições de alta energia de impacto, normalmente, são constituídos por uma placa frontal de cerâmica ou por um compósito cerâmica/metal, uma camada intermediária de fibras poliméricas ou compósitos reforçados com fibras elevada resistência à tração, tais como, Kevlar®, Twaron®, Spectra®, e Dyneema®. Além disso, pode ser utilizado como uma camada posterior de metais leves, por exemplo, chapas finas de alumínio (MEDVEDOVSKI, 2010).

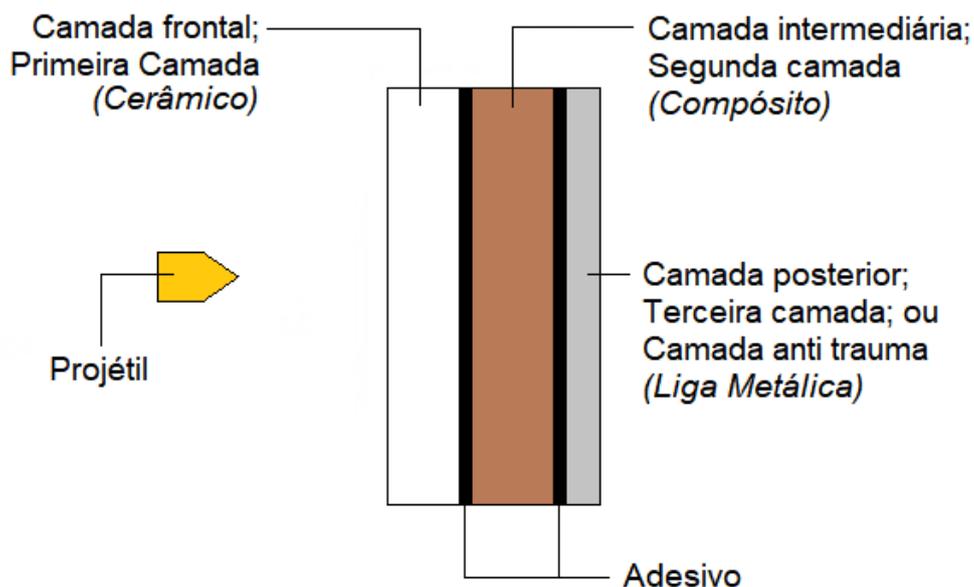


Figura 2.2 – Ilustração esquemática de um SBM.

A cerâmica avançada é um dos componentes principais desses sistemas de blindagem, e tem como função destruir a frente do projétil e absorver grande parte da energia proveniente do impacto. Os mecanismos de proteção balística desempenhados pela cerâmica e pelo metal são muito diferentes, pois enquanto uma blindagem metálica absorve a energia do projétil através da deformação plástica, a cerâmica dissipa a energia cinética do projétil através da fratura e fragmentação. As características inerentes às cerâmicas, como elevada resistência a compressão dinâmica e baixa densidade, fazem com que tais materiais sejam amplamente

aplicados em sistemas de proteção balística (LOURO et al, 1988). Diferentes materiais cerâmicos são comumente usados para proteção balística, dentre eles estão o óxido de alumínio ou alumina ( $Al_2O_3$ ), o carbeto de silício (SiC), o carbeto de boro ( $B_4C$ ), assim como certos nitretos e boretos. Apesar de a alumina possuir uma densidade da ordem de  $3,95 \text{ g/cm}^3$  que, se comparada com as demais cerâmicas, é considerada alta, esta é comumente utilizada em blindagens balísticas devido a boa relação custo/benefício. Isto significa que a alumina apresenta menor custo e propriedades físicas relativamente elevadas, além de possuir uma produção bem consolidada (MEDVEDOVSKI, 2010).

As fibras mais amplamente utilizadas como camada intermediária dos SBMs incluem as fibras de vidro (D'ALMEIDA et al., 2004), carbono (ULVEN et al., 2003), aramida (MONTEIRO et al., 2015; MOBASSERI et al., 2013) e o PEUAPM (ALVES et al., 2004). Jacobs et al (2001) afirmam que utilização dessas fibras sintéticas de alta resistência revolucionaram os projetos de blindagens leves, podendo ser aplicadas em equipamentos como capacetes, coletes e mantas, além de poderem ser incorporadas em veículos. Na utilização como camada intermediária do SBM, tais materiais são incorporados como um painel laminado de compósito ou por camadas de tecido de alto desempenho balístico, sendo que em qualquer uma das duas configurações serão mais leves que o material cerâmico. Esta camada tem como principal objetivo absorver mais uma parcela da energia proveniente do impacto balístico e absorver a nuvem de fragmentos gerados pelo projétil e pela cerâmica fraturada (CHEESEMAN et al, 2003; WANG et al., 2014).

Camadas posteriores do SBMs podem ser adicionadas e, quando existir, deve ser composta por um metal dúctil e leve, em geral, uma liga de alumínio aeronáutico. O material desta camada tem a função de se deformar plasticamente para absorver a energia residual do projétil, reduzindo desta forma o trauma causado no usuário.

Monteiro et al (2015) revelou que o Kevlar® seguindo a cerâmica frontal em SBM é capaz de dissipar cerca de 36% da energia de impacto do projétil da munição calibre 7,62 mm. Por outro lado, quando avaliado individualmente, com esta mesma munição, a dissipação de energia passa a ser menos de 2% da energia de impacto. Este comportamento é devido ao mecanismo de absorção de energia cinética da nuvem de fragmentos após impacto do projétil com a cerâmica. Diferente do mecanismo de ruptura do Kevlar® no ensaio individual, a captura dos fragmentos por incrustação mecânica está associada a forças de Van der Waals e atração eletrostática, que não dependem da resistência à tração da fibra, mas sim da capacidade de captura desses fragmentos. Tais resultados justificam a investigação da

utilização de fibras naturais como reforço em compósitos de base polimérica para aplicação em SBM como está sendo desenvolvido nesta dissertação.

## 2.2 FIBRAS NATURAIS LIGNOCELULÓSICAS (FNL)

Nas últimas décadas tem havido uma tendência crescente da substituição de materiais de origem sintética, oriundos de fontes de recursos não renováveis por aqueles chamados *green materials* ou materiais verdes. Estes são materiais renováveis, biodegradáveis, que tem sua concepção intimamente ligada com questões ambientais e de sustentabilidade. É neste contexto que se encontram as fibras naturais, que, devido as suas propriedades, vêm sendo amplamente empregadas como carga ou reforço em compósitos de matriz polimérica, para as mais variadas aplicações (KALIA, et al., 2011; MONTEIRO et al., 2009; SATYANARAYANA et al. 2009).

As fibras naturais podem ser classificadas com base em sua origem, podendo ser provenientes de animais, minerais ou vegetais (BLEDZKI et al, 1999). As fibras naturais de origem vegetal são também conhecidas com Fibras Naturais Lignocelulosicas (FNLs). Esta nomenclatura indica a predominância de lignina e celulose na composição dessas fibras (MONTEIRO et al, 2011).

As FNLs são altamente heterogêneas no que diz respeito às suas propriedades e tal característica pode ser considerada um fator limitante ao uso. Essa variação que ocorre depende da composição química, diâmetro, fração cristalina da celulose, de qual parte da planta a fibra foi extraída (raiz, caule, folha, semente, fruto, entre outros), além do estágio de crescimento e das condições de cultivo (FRANCK, 2005; THAKUR et al, 2014). Por outro lado, em termos gerais, apresentam baixa densidade, elevada flexibilidade quanto ao processamento, alta rigidez específica, facilidade de modificação de superfície, além de possuírem um custo muito baixo em comparação com fibras sintéticas. Esses são alguns dos fatores que influenciam no aumento do uso de FNLs em aplicações de engenharia (JOSEPH et al, 1996; FARUK et al 2012). A TAB. 2.2 compara algumas propriedades de FNLs com fibras sintéticas.

**TAB. 2.2 – Propriedades de algumas FNL e sintéticas. Adaptado de MONTEIRO et al, 2011.**

Fibra	Densidade $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Resistência à tração $\sigma$ (MPa)	Módulo de Young E (GPa)	Máx. $\sigma/\rho$ (MPa.cm <sup>3</sup> /g)
Bambu	1,03 – 1,21	106 – 204	-	493
Banana	0,67 – 1,50	700 – 800	27 – 32	1194
Coco	1,15 – 1,52	95 – 220	4 – 6	191
Cânhamo	1,07	389 – 690	35	649
Curauá	0,57 – 0,92	117 – 3000	27 – 80	2193
Juta	1,30 – 1,45	393 – 800	13 – 27	615
Linho	1,30 – 1,50	344 – 1035	26 – 28	496
Rami	1,5	400 – 1620	61 – 128	1080
Sisal	1,26 – 1,50	287 – 913	9 – 28	725
Vidro do tipo 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

Como citado anteriormente, as FNLs apresentam majoritariamente na sua composição lignina e celulose, outros elementos como hemicelulose, pectinas e ceras também são encontrados. A celulose é um polímero glucano hidrófilo que consiste de uma cadeia linear que contém grupos hidroxilo alcoólicos, compostos de carbono, hidrogênio e oxigênio. Estes grupos hidroxilo formam ligações de hidrogênio intramoleculares e com outras macromoléculas de celulose, e também com os grupos hidroxilo provenientes do ar. Tal fenômeno justifica o caráter hidrofílico das FNLs. O grau de polimerização da celulose varia entre as FNLs e, conseqüentemente tem influência direta nas propriedades mecânicas das fibras (MOHANTY et al, 2000). Por outro lado, a lignina é um polímero com alto teor de carbono e baixo teor de hidrogênio, que possui importante função estrutural em plantas, fornecendo a sustentação da parede celular. A lignina preenche os espaços deixados entre a celulose e a hemicelulose, agindo como um ligante (MOHANTY et al, 2000). Por fim, a hemicelulose tem como função criar uma rede de sustentação das microfibrilas de celulose, além de ser responsável pela absorção de umidade, degradação térmica e biodegradação das fibras (SAHED et al, 1999; KALIA et al, 2011). John et al (2008) afirma que as FNLs podem ser consideradas compósitos naturais, em que fibrilas de celulose ficam aderidas em uma matriz composta de lignina e hemicelulose.

Monteiro et al (2009) mostrou que a superfície das FNLs na verdade é extremamente complexa com detalhes micro morfológicos que vão variar dependendo do tipo de fibra a ser analisado. Desta forma, a estrutura da parede celular da fibra é heterogênea e dividida em diversas partes como apresentado na FIG. 2.3.

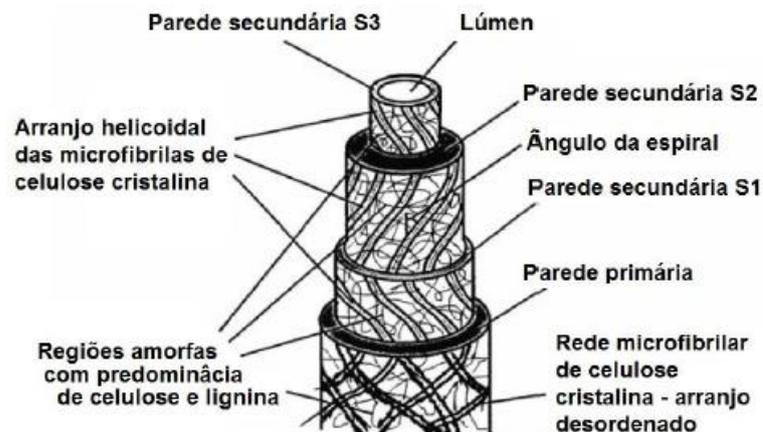


Figura 2.3 – Estrutura da parede celular da FNL. Adaptado de KALIA et al, 2011.

A estrutura celular é pode ser dividida em 3 seções:

- (i) Parede celular primária que é constituída de membrana fina depositada sobre a segunda camada durante o crescimento celular, contém uma rede aberta e irregular de microfibrilas de celulose.
- (ii) Parede celular secundária que é composta por três camadas, sendo que é a camada intermediária a mais importante nas propriedades mecânicas da fibra (THAKUR et al, 2014). Tal camada apresenta microfibrilas celulares enroladas helicoidalmente e o ângulo formado entre a microfibrila e o eixo da fibra, é chamado de ângulo microfibrilar, que é um importante parâmetro de caracterização das FNLs. Quanto menor esse ângulo, maior a resistência mecânica da fibra (KALIA et al, 2011).
- (iii) Região central, chamada lúmen, que é a responsável pela nutrição da planta, bem como pela baixa massa específica aparente das FNLs (PICANÇO, 2005).

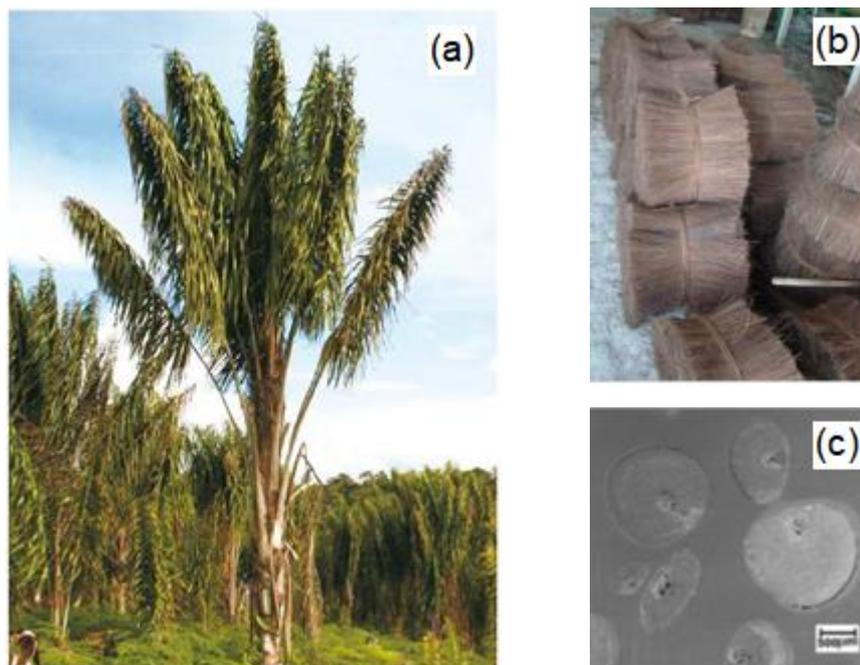
### 2.2.1 FIBRAS DE PIAÇAVA

A Piaçava, de nomenclatura botânica *Attalea Funifera*, é uma fibra rígida extraída das folhas de uma palmeira (FIG 2.4 (a)) que ocorre naturalmente na floresta tropical do Atlântico brasileiro. A faixa de incidência natural da palmeira de piaçava é localizada próxima da zona costeira e tem sua maior concentração no estado da Bahia, que é responsável pela produção de 96,2% do total dessa fibra no país. Isso se deve ao fato do crescimento dessa palmeira ser

favorecido em regiões com temperatura médias da ordem de 24<sup>0</sup>C e umidade relativa acima de 80% (SATYANARAYANA, 2007).

As fibras de até 4 m de comprimento e com uma largura média de 1,1 mm são colhidas uma vez por ano, de preferência entre março e setembro, com o objetivo de obter fibras mais longas e flexíveis de melhor valor comercial, além de preservar a longevidade das plantas. Caso contrário, o resultado seria o de fibras de menor qualidade (NASCIMENTO, 2012). A colheita é realizada utilizando facas longas, de modo que os talos são perfurados e as fibras separadas mecanicamente. Posteriormente, elas são limpas, escovadas, separadas com base no comprimento e amarradas em fardos com pesos variáveis, apresentado na FIG. 2.4 (b). Cada palmeira pode produzir 8-10 kg de fibras por ano, sendo produtiva por cerca de 20 anos.

A FIG. 2.4 (c) apresenta as secções transversais típicas das fibras de piaçava, onde se pode ver a variabilidade usual de forma e tamanho comuns a todas as fibras celulósicas que ocorrem naturalmente.



**FIG. 2.4 – Piaçava como (a) palmeira, (b) fardo de fibras e (c) seção transversal observado no MEV (SATYANARAYANA et al, 2007).**

A produção de fibras de piaçava está decrescendo constantemente ao longo dos últimos anos, a produção que era de 96.173 toneladas no ano de 2004, no ano de 2012 teve produção de aproximadamente 60 toneladas, ou seja, uma queda de cerca de 40% na produção ao longo desses anos. A maior parte desta produção é destinada para exportação para diversos locais,

como EUA, Europa e até mesmo para alguns países da América do Sul. A principal aplicação dessas fibras é para produção de vassouras industriais e domésticas, cordas, cestas, tapetes e telhados. Por outro lado, estima-se que cerca de 20% da produção de fibras seja desconsiderada pelas indústrias de transformação. Essas fibras descartadas, que não atendem aos requisitos para os usos citados acima, são, no entanto, intactas e suficientemente longas para serem usadas como reforço em compósitos de fibras (ELZUBAIR et al, 2007; MONTEIRO et al, 2008).

O conhecimento acerca das propriedades e características físico-químicas inerentes à fibra de piaçava é essencial para previsão do comportamento desse material quando utilizado como reforço em compósitos de matriz polimérica. A TAB. 2.3 apresenta algumas propriedades típicas da fibra de piaçava (AQUINO, 2003).

**TAB. 2.3 – Propriedades típicas das fibras de piaçava. Adaptado de AQUINO et al, 2003.**

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,1 – 1,45
Resistência à tração (MPa)	108,5 – 147,3
Limite de Escoamento (MPa)	69,8 – 81,7
Módulo de Young (GPa)	5,5 – 6,3
$\sigma/\rho$ max (MPa.cm <sup>3</sup> /g)	133,93

É possível notar que em termos de resistência a tração e módulo de Young, os valores alcançados pela fibra de piaçava são bem menores do que de outras fibras naturais lignocelulósicas usuais como as apresentadas na TAB. 2.2, sendo comparável apenas à fibra de coco.

A composição química dessas fibras revelou que são formadas na sua maior parte por celulose (31,6%) e lignina (48,4%). Tal composição é similar à da fibra de coco, mas com maior teor de lignina do que outras FNLs. Esta pode ser responsável pela resistência à água e rigidez à flexão inerente a fibra.

Em trabalho realizado por d’Almeida et al (2006), as propriedades térmicas das fibras de piaçava foram estudadas através das técnicas de TG/DTG. A FIG. 2.5 apresenta essas curvas. É possível notar na curva de TG que, apesar de uma pequena perda de massa entre 75<sup>o</sup>C e 85<sup>o</sup>C, o início da degradação térmica das fibras não ocorre até 225<sup>o</sup>C, revelando uma grande estabilidade térmica. A perda de massa associada a mais baixa temperatura é de 5,18% e pode ser atribuída à umidade absorvida pela fibra. Por outro lado na curva de DTG, nota-se claramente a presença de dois picos em altas temperaturas, nas temperaturas de 276<sup>o</sup>C e

347<sup>0</sup>C, respectivamente. Esses picos podem ser relacionados a degradação de componentes da fibra de piaçava como: hemicelulose, celulose e lignina (RAMIAH, 1970; RAVEENDRAN, 1996).

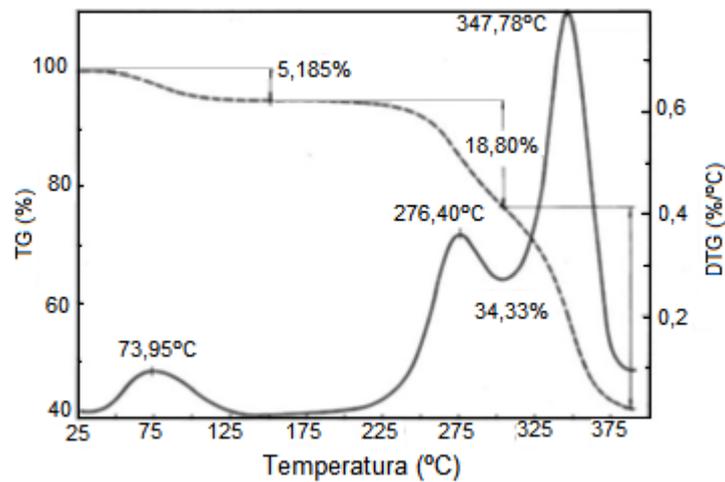


FIG. 2.5 – Curvas de TG e DTG para fibra de piaçava (D’ALMEIDA et al, 2006).

Com base nas características apresentadas pelas fibras de piaçava, diversos pesquisadores sugerem a utilização dessa fibra como reforço de compósitos de matriz polimérica (NASCIMENTO et al, 2012; MONTEIRO et al, 2011; SATYANARAYANA et al, 2007; D’ALMEIDA et al, 2006).

### 2.3 COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORÇADOS COM FNL

Como discutido anteriormente, as FNLs vêm consolidando sua importância, frente as fibras sintéticas em aplicações de engenharia. As principais aplicações vêm da utilização das FNLs como carga ou reforço de compósitos de matriz polimérica. Um material compósito pode ser definido como aquele material que possui mais de uma fase, de modo que as propriedades das fases são combinadas para se obter a relação mais vantajosa para o fim ao qual o compósito se destina (CALLISTER et al, 2012).

### 2.3.1 PROCESSAMENTO E CUIDADOS COM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FNL

Nesses materiais, a matriz polimérica pode ser de polímero termorrígido ou termoplástico, sendo que cada classe de polímeros apresentam vantagens e limitações quando comparadas. Em comum, ambas exercem papel de destaque no desempenho do compósito quando empregadas. Os polímeros termorrígidos são complexos e exigem a adição de alguns componentes em sua preparação, tais como, agentes de cura, endurecedores, catalisadores e agentes de fluxo. No caso de termorrígidos como epóxi e poliéster, os grupos reativos auxiliam o desenvolvimento da interface matriz/fibra (NABI SAHED et al, 1999). Entre as técnicas de processamento destacam-se a moldagem a frio, laminação contínua e enrolamento filantar.

Por outro lado, o processamento de polímeros termoplásticos envolve a extrusão de componentes na temperatura de fusão e operações subsequentes de moldagem por injeção e termoformagem. Esses processamentos, além de permitirem a moldagem de peças complexas, são considerados técnicas de baixo custo (FARUK et al, 2012). No entanto, o processamento de tal tipo de polímero é assistido com temperatura e essa é considerada uma limitação na aplicação desses polímeros como matriz em compósitos reforçados com FNLs. Isso porque a maioria das FNLs passam a experimentar degradação térmica entre 200 – 250 °C. Esta degradação pode gerar produtos voláteis, o que poderia levar ao surgimento de poros na matriz afetando assim as propriedades mecânicas do compósito como um todo, conseqüentemente a temperatura de processamento fica limitada a essa faixa (NABI SAHED et al, 1999). Ainda assim é possível encontrar compósitos de matriz termoplástica reforçados com FNL. Elzubair et al (2012) em seu trabalho, foi capaz de produzir, com sucesso, compósitos com matriz de polietileno reciclado de alta densidade reforçados com fibras de piaçava em proporções de 5%, 10%, 15% e 20% em peso. A fibra de piaçava se manteve estável termicamente durante processamento a mais de 200°C e ainda agregou um aumento de resistência ao material.

Outra questão importante que deve sempre ser levada em conta diz respeito à diferença na natureza das FNL e da matriz polimérica. Enquanto a matriz polimérica apresenta carácter hidrofóbico, as FNLs são de carácter hidrofílico e essa disparidade impacta diretamente na

adesão interfacial matriz/fibra (KU, et al 2011). Algumas medidas podem ser tomadas a fim de se minimizar os efeitos dessa heterogeneidade tais como:

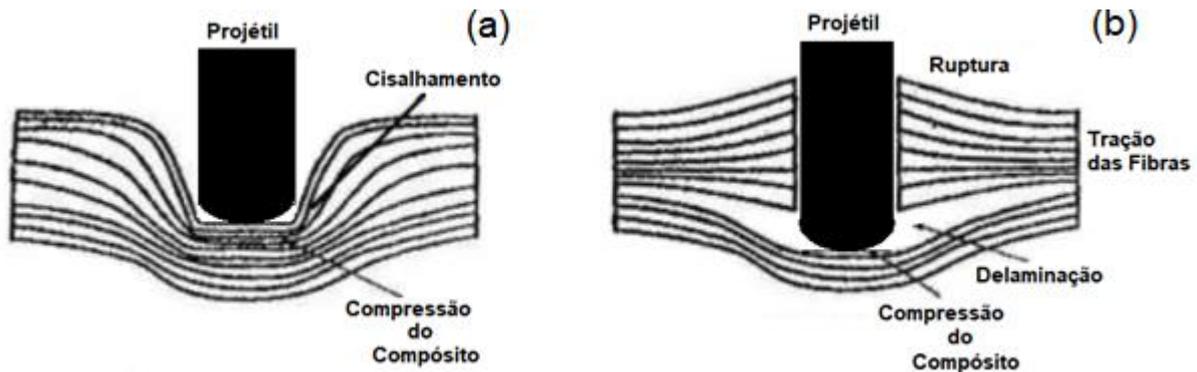
- (i) Tratamentos de superfície da fibra, tais como acoplamento e utilização de agentes de compatibilização, que alteram a natureza das fibras de polar para apolar (MATTOSO et al, 1996).
- (ii) Técnicas de branqueamento, enxerto de monômero, acetilação que melhorariam a adesão interfacial no compósito (NABI SAHED et al, 1999).

Por outro lado, essa fraca adesão matriz/fibra torna-se de interesse quando compósitos poliméricos são utilizados como camada intermediária em SBM, uma vez que esse mecanismo de fratura contribui consideravelmente na absorção de energia cinética do evento balístico (BOLZAN et al 2016; DA CRUZ et al 2015; MONTEIRO et al 2015). A delaminação fibra/matriz se dá através da separação de fases formando novas superfícies livres, isso porque a adesão na interface é menor do que a energia resultante do impacto balístico (LUZ, 2014).

### 2.3.2 MECANISMOS DE FALHA EM COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FNL

Nos materiais compósitos reforçados com fibras a tenacidade à fratura do material tem relação direta com as propriedades da matriz e da fibra, entre as características importantes destacam-se: propriedades da fibra, diâmetro da fibra, arranjo geométrico das fibras, tipo de matriz, as propriedades da matriz, a adesão da interface matriz/fibra e a fração volumétrica de fibras utilizada no compósito são os parâmetros que irão influenciar na capacidade de absorção de energia pelo compósito. Nesses compósitos a propagação das trincas é dificultada pela mudança do estado de tensões na ponta da trinca devido às diversas interfaces existentes no interior do material. Considerando o estado de tensões triaxial (ETT) existentes na ponta de um trinca que se propaga, teríamos que o fenômeno de clivagem seria favorecido como mecanismo de fratura. Mas quando o material em que a trinca no ETT possui diversas interfaces, tais interfaces serão responsáveis por inibir ou dividir tal trinca em trincas secundárias, sendo desviadas para outras direções (ALMOND et al, 1969). Esse comportamento dá origem ao fenômeno de delaminação entre as camadas, que é um mecanismo de absorção de energia de impacto ocorrendo quando a adesão entre as camadas é

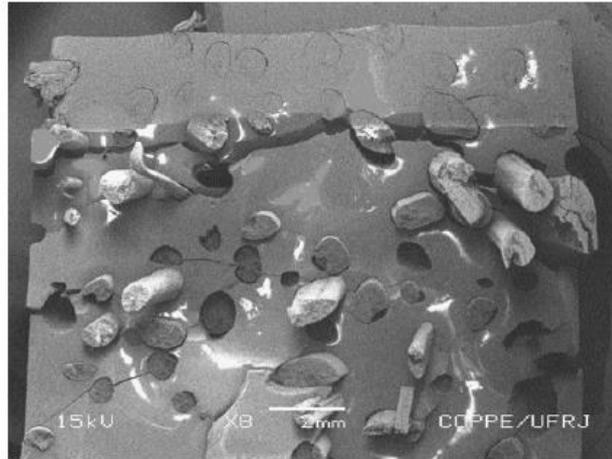
menor que os esforços do impacto, a formação de novas superfícies livres, devido à separação das camadas, será responsável por absorver a energia de impacto (LUZ, 2014). A delaminação entre as camadas juntamente com deformação elástica do compósito, cisalhamento das camadas e a tensão de fratura das fibras são os principais mecanismos de absorção de energia de um evento balístico em compósitos reforçados com FNLs (MORYE et al, 2000). A FIG. 2.6 (a) e 2.6 (b) ilustra as duas etapas do mecanismo de delaminação em um evento balístico.



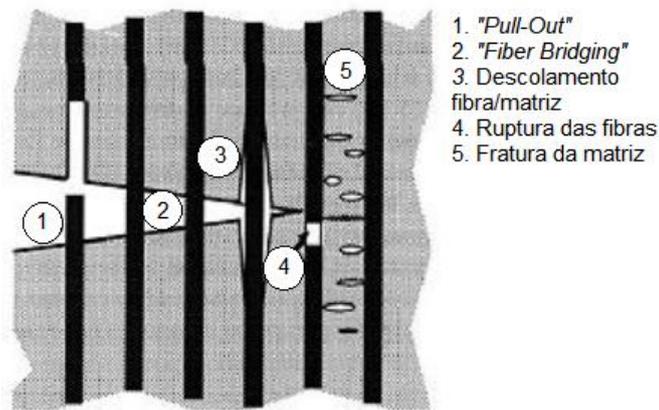
**FIG. 2.6 – Etapas do mecanismo de delaminação dos compósitos reforçados com fibras (a) antes da ruptura e (b) depois da ruptura. Adaptado de WESTIN et al, 2011.**

Na FIG. 2.6 (a), na primeira etapa do processo de delaminação, temos o dano submetido ao compósito no momento do impacto balístico, nesse primeiro estágio a resistência ao cisalhamento das fibras aumenta, que por sua vez induz a deformação por compressão do compósito e tração das fibras até sua ruptura (BHATNAGAR et al, 2006). É importante notar que isso ocorre sem a ruptura da primeira camada de fibra. Na FIG. 2.6 (b), temos a segunda etapa do processo de delaminação, a primeira camada de fibra é rompida pelo projétil e consequentemente as camadas seguintes são separadas levando à delaminação.

Outro mecanismo de falha diz respeito à baixa adesão da interface matriz/fibra, neste mecanismo há o descolamento parcial ou completo da fibra da matriz. Esse fenômeno é chamado de “*Pull-Out*”. A FIG. 2.7 apresenta esse tipo de falha, observado por Monteiro et al (2006) para o compósito de poliéster reforçado com fibras de piaçava. Os mecanismos de falha que podem ser observados em compósitos reforçados por fibras são: os já citados “*Pull-Out*” e delaminação, além de outros mecanismos como “*Fiber Bridging*”, descolamento fibra/matriz, ruptura das fibras e fratura da matriz. A FIG. 2.8 ilustra alguns desses mecanismos de falha.



**FIG. 2.7 – Falha por “pull-out” observado em compósito de poliéster reforçado com fibras de piaçava (MONTEIRO et al, 2006).**



**FIG. 2.8 – Mecanismos de falhas diversos que podem estar associados a compósitos reforçados por fibras (ANDERSON, 1995).**

## 2.4 COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS MATERIAIS

Um fenômeno dinâmico se dá quando materiais são submetidos a uma mudança repentina no carregamento que estão sujeitos. Essa súbita alteração na taxa de carregamento faz com que a resposta dos materiais seja bem diferente dos fenômenos que ocorrem em condições estáticas ou quasi-estáticas. Desta forma, estudo e compreensão da resposta dinâmica dos materiais é de suma importância quando se considera aplicações balísticas (MEYERS, 1994).

A interação entre materiais que se movem em alta velocidade com aqueles que se encontram em repouso resultam em ondas que podem ser descritas matematicamente através das equações de conservação, chamadas de relações de conservação de Rankine-Hugoniot.

$$\text{Conservação de massa:} \quad \rho_0 U_s = \rho (U_s - U_p) \quad \text{EQ. 2.3}$$

$$\text{Conservação de momento:} \quad (P - P_0) = \rho_0 U_s U_p \quad \text{EQ. 2.4}$$

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

Onde:  $\rho_0$  é a densidade do material antes da passagem da onda;  $\rho$  é a densidade do material durante a passagem da onda;  $U_s$  é a velocidade de propagação da onda de choque;  $U_p$  é a velocidade da partícula;  $P$  é a pressão durante a passagem da onda;  $P_0$  é a pressão antes da passagem da onda;  $E$  é a energia interna do material durante a passagem da onda;  $E_0$  é a energia interna do material após a passagem da onda;  $V$  é o volume do material durante a passagem da onda; e  $V_0$  é o volume do material antes da passagem da onda.

Esse sistema não possui solução uma vez que existem mais incógnitas do que equações. Desta forma é necessário que alguma condição de contorno seja incluída nesse sistema de para que seja possível determinar todos os parâmetros como função de um deles. Essa condição de contorno é a Equação de estado do material, que é uma relação empírica.

$$\text{Equação de estado do material:} \quad U_s = C_0 + S_1 U_p + S_2 U_{p^2} + S_3 U_{p^3} + \dots + S_n U_{p^n} \quad \text{EQ. 2.6}$$

Onde:  $C_0$  é a velocidade do som no material; e  $S_1$  é um parâmetro empírico. Para a maioria dos materiais  $S_2$  e demais termos  $S$  de ordem superior são iguais a zero. Desta forma, a equação é simplificada e passa a relacionar apenas  $U_s$ ,  $C_0$ ,  $S_1$  e  $U_p$ . Essa relação linear entre a velocidade de propagação da onda de choque e a velocidade das partículas descreve razoavelmente bem, a resposta ao choque. E  $C_0$  pode ser determinado pela equação:

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{EQ. 2.7}$$

Onde:  $E$  é o módulo de elasticidade do material e;  $\rho$  a sua densidade. Desta forma é possível calcular  $P-U_s$ ,  $P-U_p$ ,  $P-\rho$ ,  $P-V/V_0$ ,  $E-U_s$  entre outras relações.

Todo o desenvolvimento apresentado até agora considera apenas um único material interagindo com a onda de choque. No entanto, quando consideramos SBMs existem várias camadas e desta forma há uma melhor atenuação da energia da onda de choque através de múltiplas interfaces de reflexão e transmissão (HUI et al, 2011). Ou seja, quando a onda de choque se propaga de um material A para um material B ocorrem mudanças na pressão, na velocidade da onda, na densidade, entre outras. O método para verificar a passagem da onda

de um material A para um material B é chamado casamento de impedâncias. Neste método as equações de conservação passam a ter as seguintes formas:

$$P_2 = \rho_{02}(C_2 + S_2 U_{p2}) U_{p2} \quad \text{EQ. 2.8}$$

$$P_1 = \rho_{01} C_1 (V - U_{p2}) + \rho_{01} S_1 (V - U_{p2})^2 \quad \text{EQ. 2.9}$$

Traçando as curvas referentes às EQ. 2.8 e EQ. 2.9 é possível obter uma solução gráfica para as pressões geradas nas interfaces de cada um dos materiais. Duas possibilidades são relatadas para esse método:

- (i) Material A (baixa impedância de choque) e Material B (alta impedância de choque) – Neste caso, a onda de choque reflete na interface e retorna como uma onda compressiva. Tal situação é ilustrada nas FIG.s 2.9 (a) e(b).

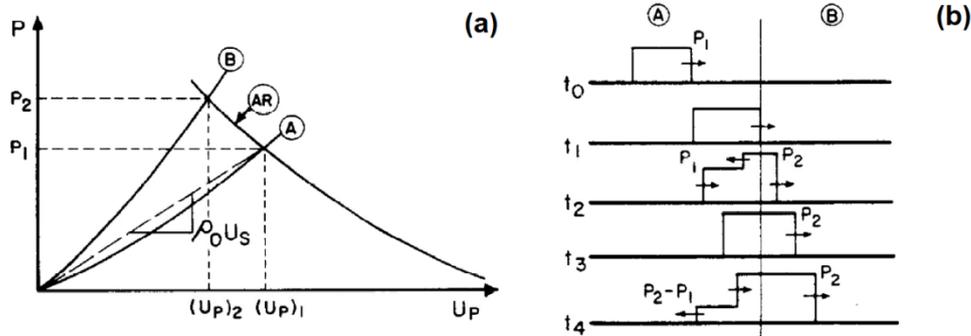


FIG. 2.9 – Transmissão de uma onda de choque de um meio de baixa impedância para um meio de alta impedância de choque: (a) representação gráfica e (b) perfil de tensão (MEYERS, 1994).

- (ii) Material A (alta impedância de choque) e Material B (baixa impedância de choque) – Neste caso, a onda de choque vai refletir na interface e retornar como uma onda trativa. As FIG.s 2.10 (a) e (b) apresentam esse caso.

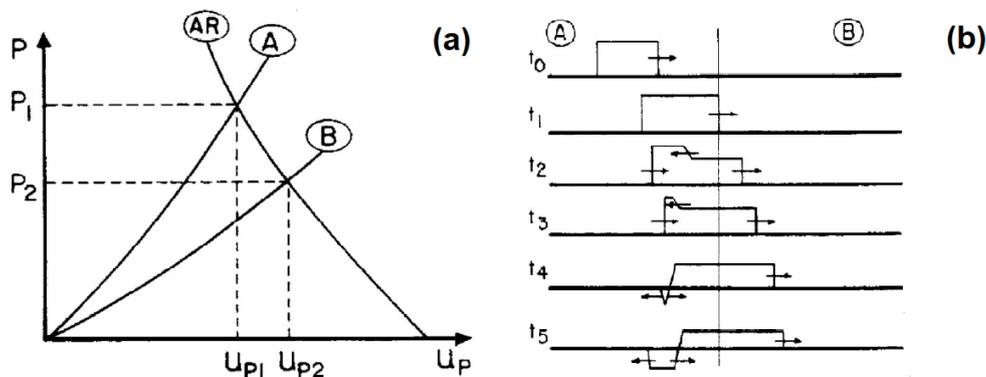


FIG. 2.10 - Transmissão de uma onda de choque de um meio de alta impedância para um meio de baixa impedância de choque: (a) representação gráfica e (b) perfil de tensão (MEYERS, 1994).

## 2.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A análise estatística dos resultados obtidos em um determinado estudo é uma ferramenta importantíssima na validação desses dados, assim como para a adequada extrapolação dos resultados obtidos neste estudo (NORMANDO et al, 2010). A realização de testes estatísticos dá ao pesquisador condições de fazer inferência. Por exemplo, com base nos resultados da amostra, o teste estabelece se, na população analisada, a média de um evento “A” é diferente da média de um evento “B”, isso considerando um determinado nível de significância.

### 2.5.1 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

A análise de variância (ANOVA) compara médias de diferentes populações para verificar se essas populações possuem médias iguais ou não. Essa técnica permite que vários grupos sejam comparados de uma só vez. A análise de variância deve ser utilizada quando se quer decidir se as diferenças amostrais observadas são causadas por diferenças significativas nas populações observadas ou são decorrentes da mera variabilidade amostral (VIEIRA, 1999). Nascimento (2017) utilizou esse tipo de análise em seu trabalho, considerando o tipo ou a fração volumétrica de fibra ou tecido de malva em cada amostra como tratamentos, a fim de verificar se existiam diferenças significativas entre as médias dos resultados obtidos para as propriedades medidas em ensaios mecânicos e balísticos. Neste método estatístico, quando o valor de  $F_{\text{calculado}}$  for superior ao valor  $TAB.do$ , também chamado de  $F_{\text{crítico}}$ , tem-se que a hipótese  $H_0$  não é válida, ou seja, que as médias dos resultados obtidos não são iguais. Em tal método, o nível de significância é determinado pelo usuário, mas uma significância de 5% ou confiança de 95% é considerada como satisfatório.

A TAB. 2.4 apresentam os parâmetros estatísticos utilizados na análise de variância. Onde  $k$  é o número de tratamentos empregados;  $r$  é o número de repetições de cada tratamento;  $n = kr$ ; e  $T$  é o total de cada tratamento.

**TAB. 2.4 – Parâmetros estatísticos da Anova**

Causas de variação	Graus de liberdade (GL)	Soma de quadrados (SQ)	Quadrado médio (QM)	F calculado	F crítico
Tratamentos	k - 1	SQTr	QMTr	QMTr/QMR	Valor TAB.do
Resíduo	k(r-1)	SQR	QMR		
Total	kr-1	SQT			

As equações 2.10 - 2.14 mostram como são calculados esses parâmetros estatísticos.

$$\text{Soma de quadrado total:} \quad SQT = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \quad \text{EQ. 2.10}$$

$$\text{Soma de quadrados de tratamentos:} \quad SQTr = \frac{\sum T^2}{r} - \frac{(\sum y)^2}{n} \quad \text{EQ. 2.11}$$

$$\text{Soma de quadrados de resíduo:} \quad SQR = SQT - SQTr \quad \text{EQ. 2.12}$$

$$\text{Quadrado médio de tratamento:} \quad QMTr = \frac{SQTr}{k-1} \quad \text{EQ. 2.13}$$

$$\text{Quadrado médio de resíduo:} \quad QMR = \frac{SQR}{n-k} \quad \text{EQ. 2.14}$$

Após o ensaio da Anova, o teste da diferença mínima significativa, teste de Tukey. O objetivo deste teste é avaliar quantitativamente dois a dois cada um dos tratamentos e a partir dos resultados obtidos rejeita-se ou não a hipótese de igualdade. A equação 2.15 mostra como se calcula *d.m.s.* (diferença mínima significativa).

$$d. m. s. = q \sqrt{\frac{QMR}{r}} \quad \text{EQ. 2.15}$$

Onde *q* é valor TAB.do que é função do grau de liberdade do resíduo e do tratamento.

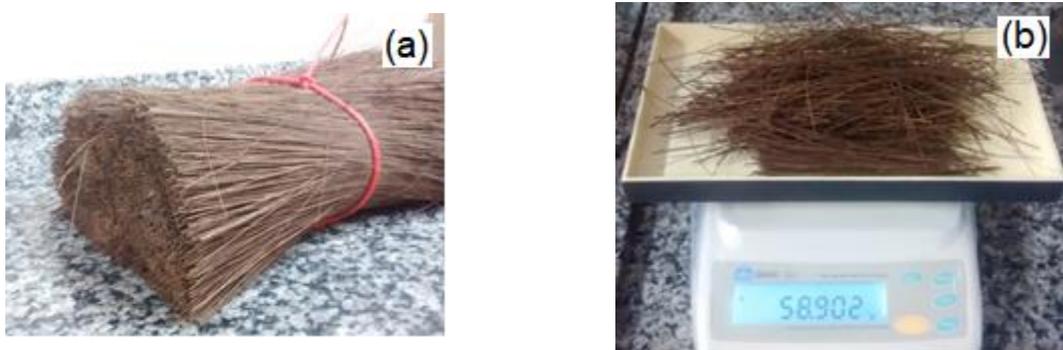
O capítulo referente a Materiais e Métodos é apresentado a seguir. Tal seção tem como objetivo descrever as técnicas experimentais bem como os materiais empregados nesta dissertação.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

##### 3.1.1 Fibra de Piaçava

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas fibras de Piaçava que foram cedidas pela fábrica de Vassouras Rossi Ltda., localizada na cidade de Petrópolis/RJ. As fibras foram recebidas já organizadas e amarradas em um fardo com aproximadamente 4 kg como ilustrado na FIG. 3.1 (a) As fibras foram então separadas em quantidades adequadas, cortadas nas dimensões da matriz (aproximadamente 12 cm) e então pesadas em balança digital GEHAKA, modelo BK300, como mostrado na FIG. 3.1 (b).



**FIG. 3.1 – Piaçava (a) como recebida e (b) após ser cortada e pesada.**

O diâmetro das fibras de piaçava foi medido, a fim de se obter um histograma com a distribuição do diâmetro das fibras de piaçava do lote recebido. A análise consistiu na medida 100 fibras selecionadas ao acaso utilizando microscópio estereoscópico modelo SZX51, da marca OLYMPUS, pertencente ao Laboratório de Hidrogênio (LabH2/COPPE/UFRJ) .

É importante ressaltar que antes de serem empregadas na preparação dos compósitos, as fibras foram colocadas em estufa, da marca ELKA (FIG.3.2) por pelo menos 24h, a 60°C, a fim de retirar a umidade inerente à própria fibra.



**FIG. 3.2 – Estufa da marca ELKA utilizada na secagem das fibras.**

### 3.1.2 RESINA EPÓXI E ENDURECEDOR

Para a confecção das placas de compósito epóxi-piaçava foi utilizada a resina epóxi comercial do tipo éter diglicídico do bisfenol A, também conhecido como DGEBA, que fora endurecido com trietileno tetramina (TETA), fornecidos pela empresa Epoxy Fiber, utilizando-se a proporção estequiométrica de 13 partes de endurecedor para 100 partes de resina, pois esta proporção equivale à abertura dos anéis epóxi por ligação com as moléculas amina (D'ALMEIDA, 1996). A mistura do epóxi com o endurecedor foi feita ainda com a resina fria, de forma a retardar a sua cura durante o preparo da placa. A TAB. 3.1 apresenta as especificações tanto da resina quanto do endurecedor que foram fornecidas pelo distribuidor.

A avaliação do Epóxi utilizado como matriz dos compósitos reforçados com FNLs se deu de duas maneiras. A primeira consistiu no cálculo da densidade desse material para que o valor encontrado pudesse ser utilizado nos cálculos de fração volumétrica de fibra e matriz dos compósitos a serem fabricados. A segunda serviu como confirmação que o epóxi utilizado consistia do DGEBA/TETA, isso porque o fornecedor desse material para os trabalhos anteriores foi trocado por um novo fornecedor, e mesmo que as especificações desse novo fornecedor afirmasse que se tratava do epóxi DGEBA/TETA, achou-se por bem realizar um ensaio de tração de corpos de prova de epóxi puro e comparar com os resultados obtidos com o material de trabalhos anteriores.

**TAB. 3.1 – Especificações da resina e endurecedor utilizados no desenvolvimento deste trabalho.**

RESINA MC150/5	
Denominação química	DGEBA
Estado físico	líquido
Viscosidade a 25°C	500 - 700 mPa.s
Peso específico a 25°C	1,03 g/cm <sup>3</sup>
ENDURECEDOR FD129	
Denominação química	TETA
Estado físico	líquido
Viscosidade a 25°C	20 – 30 cPs
Peso específico a 25°C	0,975 – 0,98 g/cm <sup>3</sup>
%TETA	Acima de 96

O cálculo da densidade relativa consistiu na aplicação do procedimento apresentado a seguir, segundo a norma brasileira NBR 11936 (1977):

- Produção 5 amostras cúbicas de epóxi puro com 1 cm;
- Medida da massa das amostras secas, ou seja, sem estar imersas em nenhum líquido;
- Medida da massa das amostras molhadas, isto é, com as amostras imersas em um líquido, no caso foi utilizado álcool etílico 95 %vol ou °GL (como a densidade do álcool etílico puro é de 0,789 g/cm<sup>3</sup>, pela regra das misturas a solução utilizada possuía massa específica de aproximadamente 0,799 g/cm<sup>3</sup>);
- Aplicação da seguinte fórmula:  $\rho_r = \frac{P_s}{P_s - P_m} \times \rho_{líquido}$ , onde P<sub>s</sub> é o peso seco, P<sub>m</sub> é o peso molhado e  $\rho_r$  é a densidade relativa.

A TAB. 3.2 resume os resultados obtidos. Resultados similares de densidade do epóxi foram relatados por Callister (2005) onde se mostrou que esse tipo de termorrígido apresenta densidade na faixa de 1,11 até 1,40 g/cm<sup>3</sup>, confirmando que os resultados encontrados são coerentes.

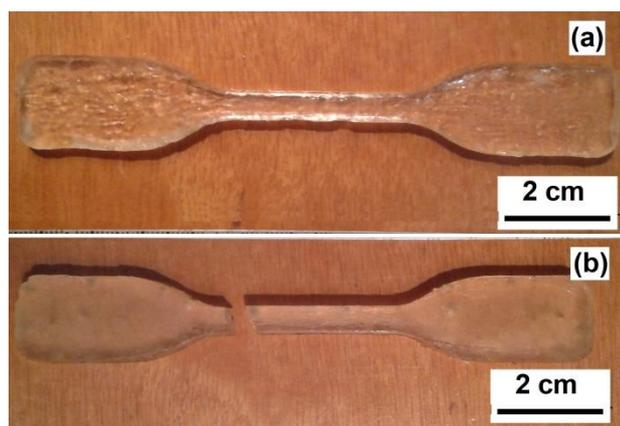
**TAB. 3.2 – Resultados de densidade relativa obtidos para resina epóxi.**

P <sub>s</sub> (g)	P <sub>m</sub> (g)	Média P <sub>s</sub> (g)	Média P <sub>m</sub> (g)	$\rho_{líquido}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_r$ (g/cm <sup>3</sup> )
1,113	0,301	1,1148	0,31438	0,799	1,1128
1,128	0,316				
1,094	0,295	Desvio padrão P <sub>s</sub> (g)	Desvio padrão P <sub>m</sub> (g)		
1,152	0,334	0,0263	0,0164		
1,087	0,326				

Para o ensaio de tração, foram produzidos apenas 4 corpos de prova segundo previsto na norma ASTM D638, apresentados na FIG.3.3 (a) e (b) antes e após o ensaio respectivamente. A TAB. 3.3 apresenta o resultado dessa investigação.

**TAB. 3.3 – Resultado do ensaio de tração do epóxi puro.**

Propriedade	Média	Desvio Padrão
$\sigma_T$	33,4 MPa	3,0513 MPa
$(\Delta L/L_0)$	8,45 %	2,4382 %



**FIG. 3.3 – Corpos de prova de tração de epóxi puro: (a) antes e (b) depois do ensaio.**

Os valores encontrados são estatisticamente os mesmos de outros trabalhos desenvolvidos utilizando resina epóxi DGEBA/TETA oriundos do antigo fornecedor, tal resultado juntamente com a especificação do fornecedor nos permite garantir que se trata do mesmo tipo de resina e, conseqüentemente, as comparações com outros trabalhos poderá ser realizada sem a preocupação com a influência da matriz nos resultados.

### 3.1.3 ALUMINA, NIÓBIA E POLIETILENO GLICOL

A cerâmica utilizada para o desenvolvimento desse trabalho é de Alumina ( $Al_2O_3$ ) com adição de Nióbia ( $Nb_2O_5$ ), que foram obtidas pelas empresas Treibacher Schleifmittel Brasil Ltda. e Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, respectivamente. As TAB.s 3.4 e 3.5 resumem as composições químicas de ambos os pós, como fornecido pelos fabricantes.

**TAB. 3.4 – Composição química da alumina. Adaptado de TRINDADE, 2012; DA SILVA, 2014.**

Elemento	Concentração (%)	Especificação (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,4	Min. 99,1
SiO <sub>2</sub>	0,04	Máx. 0,06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	Máx. 0,06
Na <sub>2</sub> O	0,11	Máx. 0,15
MgO	0,03	---
Umidade a 300 <sup>0</sup> C	0,2	Máx. 0,5
Outros	0,18	---

**TAB. 3.5 - Composição química da nióbia. Adaptado de TRINDADE, 2012; DA SILVA, 2014.**

Elemento	Concentração
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	99,5 %
Perda ao fogo	0,1 %
Ta	745 ppm
Ti	240 ppm
Fe	136 ppm
Si	66 ppm

Foi ainda utilizado o Polietileno Glicol (PEG) fornecido pela empresa VETEC, como ligante orgânico a fim de possibilitar o manuseio das amostras cerâmicas quando ainda como dos corpos verdes, ou seja, antes da sinterização.

### 3.1.4 PLACA DE LIGA DE ALUMÍNIO

Foram utilizadas placas de liga de alumínio 5052 H34 devido à suas boas propriedades mecânicas e disponibilidade no mercado. Tais placas foram adquiridas junto à empresa Metalak Comércio Indústria Metais Ltda., nas dimensões 120 x 150 x 4,76 mm (FIG. 3.4). Algumas das características mecânicas dessa liga, bem como composição química foram fornecidas pelo fabricante e estão resumidas na TAB. 3.6.

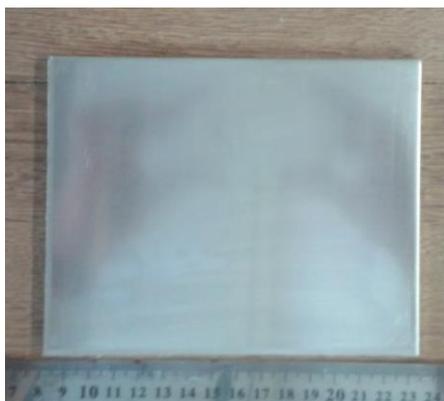


FIG. 3.4 – Placa de liga de alumínio 5052 H34 usada nos SBM.

TAB. 3.6 – Composição química e propriedades da liga 5052 H34. Adaptado de ASM Aerospace Specification Metals Inc., 2015

Propriedade	Valor	Especificação*
$\sigma_T$	249 MPa	Min. 235 Máx. 285
$\sigma_e$	205MPa	Min. 180
$(\Delta L/L_0)$	10 %	Min. 10
Elemento	Concentração (%)	Especificação*
Mg	2,25	Min. 2,20 Máx. 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

Braga (2015) em seu trabalho avaliou se havia alguma disparidade entre as propriedades indicadas pelo fabricante e o medido para o lote. Através de medidas de densidade, espessura, ensaios de tração, de dureza Rockwell B e do uso da estatística de Weibull, ele foi capaz de concluir que as placas eram homogêneas entre si no que diz respeito a propriedades mecânicas. Os resultados encontrados nessa investigação são apresentados na TAB. 3.7.

TAB. 3.7 – Análise das propriedades do lote de liga de alumínio (BRAGA, 2015).

Propriedade	Média	Desvio Padrão	$\beta$	$\theta$	$R^2$
$\sigma_T$	233,7 MPa	4,1 MPa	57,10	236,00	0,9230
$(\Delta L/L_0)$	18,6%	1,9%	10,27	19,36	0,9242
HRB	29	-	-	-	-
$\rho$	2,66 g/cm <sup>3</sup>	0,02 g/cm <sup>3</sup>	184,8	2,67	0,9001
Espessura	5,15 mm	0,05 mm	126,3	5,17	0,9557

Onde o parâmetro  $R^2$  indica a qualidade do ajuste da reta de Weibull aos dados coletados. Valores próximos da unidade (acima de 0,90) mostram uma boa qualidade do

ajuste linear, indicando que os dados estão distribuídos conforme uma função de Weibull de parâmetros  $\beta$  e  $\theta$ . O parâmetro  $\beta$  é chamado de módulo de Weibull (parâmetro de forma) e representa uma medida da confiabilidade das medidas, pois, quanto maior seu valor, mais estreita é a distribuição. O parâmetro  $\theta$  é conhecido como unidade característica (parâmetro de escala), por sua vez, indica o valor aproximadamente central da distribuição, o quantil 0,632.

### 3.2 FABRICAÇÃO DAS PLACAS COMPÓSITAS

Para a fabricação das placas de compósitos foi realizada a prensagem uniaxial de fibras de piaçava e resina epóxi, em quantidades adequadas dentro de um molde metálico. O molde metálico utilizado possui dimensões internas de 12 cm x 15 cm e como as placas produzidas apresentaram espessura final de 1 cm, conseqüentemente o volume final da placa confeccionada foi de 180 cm<sup>3</sup>. O molde metálico utilizado para a prensagem das placas do compósito é apresentada na FIG. 3.5.



**FIG. 3.5 – Molde metálico utilizado na prensagem das placas compósitas.**

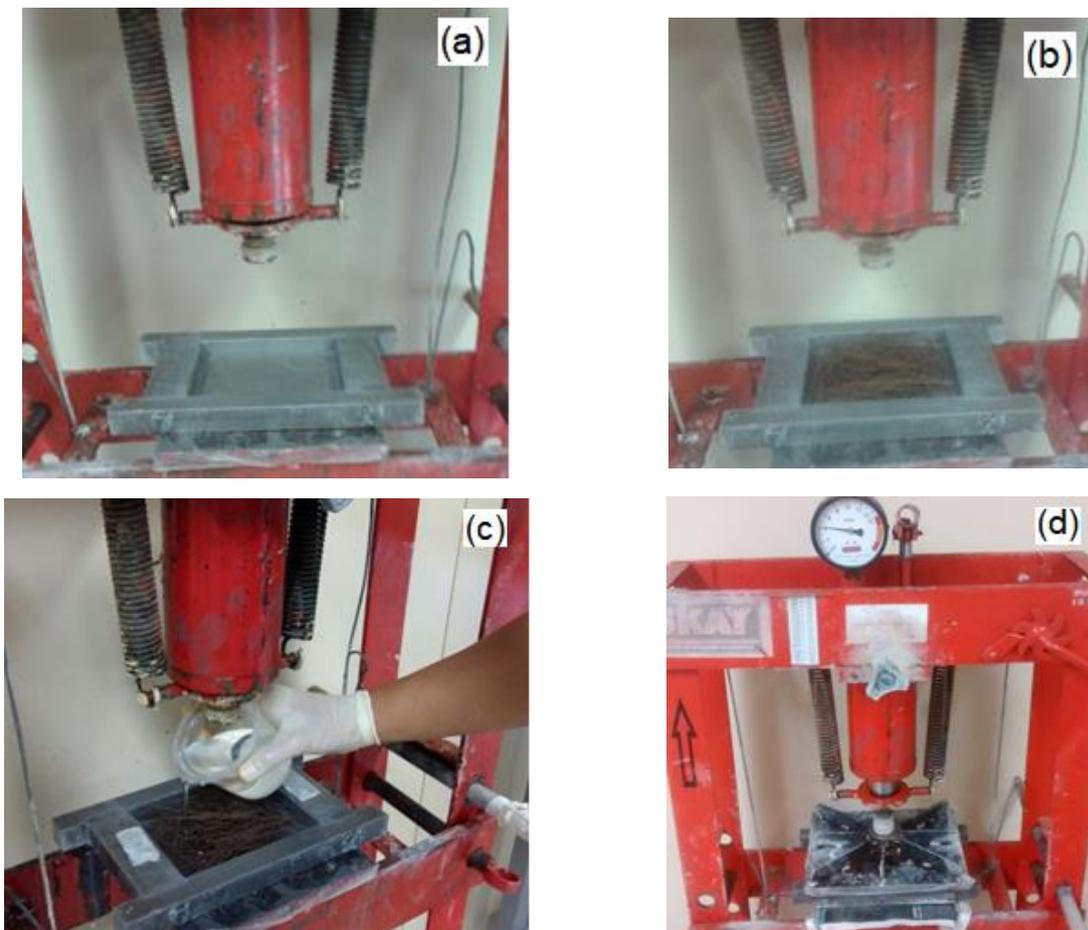
Como diferentes composições foram produzidas, a TAB. 3.8 apresenta os valores envolvidos na confecção das placas compósitas. A densidade da resina epóxi medida foi de 1,1128 g/cm<sup>3</sup>, conforme apresentado na seção 3.1.2. De acordo com a literatura (MONTEIRO, 2008; ELZUBAIR, 2007), a massa específica da fibra de piaçava considerada para nos cálculos de porcentagem de volumes foi de 1,1 g/cm<sup>3</sup>. É importante destacar também

que apesar de uma quantidade específica de epóxi compor cada compósito, é necessário utilizar uma quantidade maior, pois parte desse material se perde durante o processamento.

**TAB. 3.8 – Composição das placas compósitas produzidas.**

Amostra	Volume de Fibra ( $V_f$ )	Massa de fibra ( $m_f$ )	Volume de Matriz ( $V_m$ )	Massa de matriz ( $m_m$ )	Massa de epóxi usada
ERPV10	10%	19,64 g	90%	178,32 g	200,00 g
ERPV20	20%	39,27 g	80%	158,51 g	180,00 g
ERPV30	30%	58,91 g	70%	138,69 g	160,00 g
ERPV40	40%	78,54 g	60%	118,88 g	1400,00 g
ERPV50	50%	98,18 g	50%	99,07 g	120,00 g

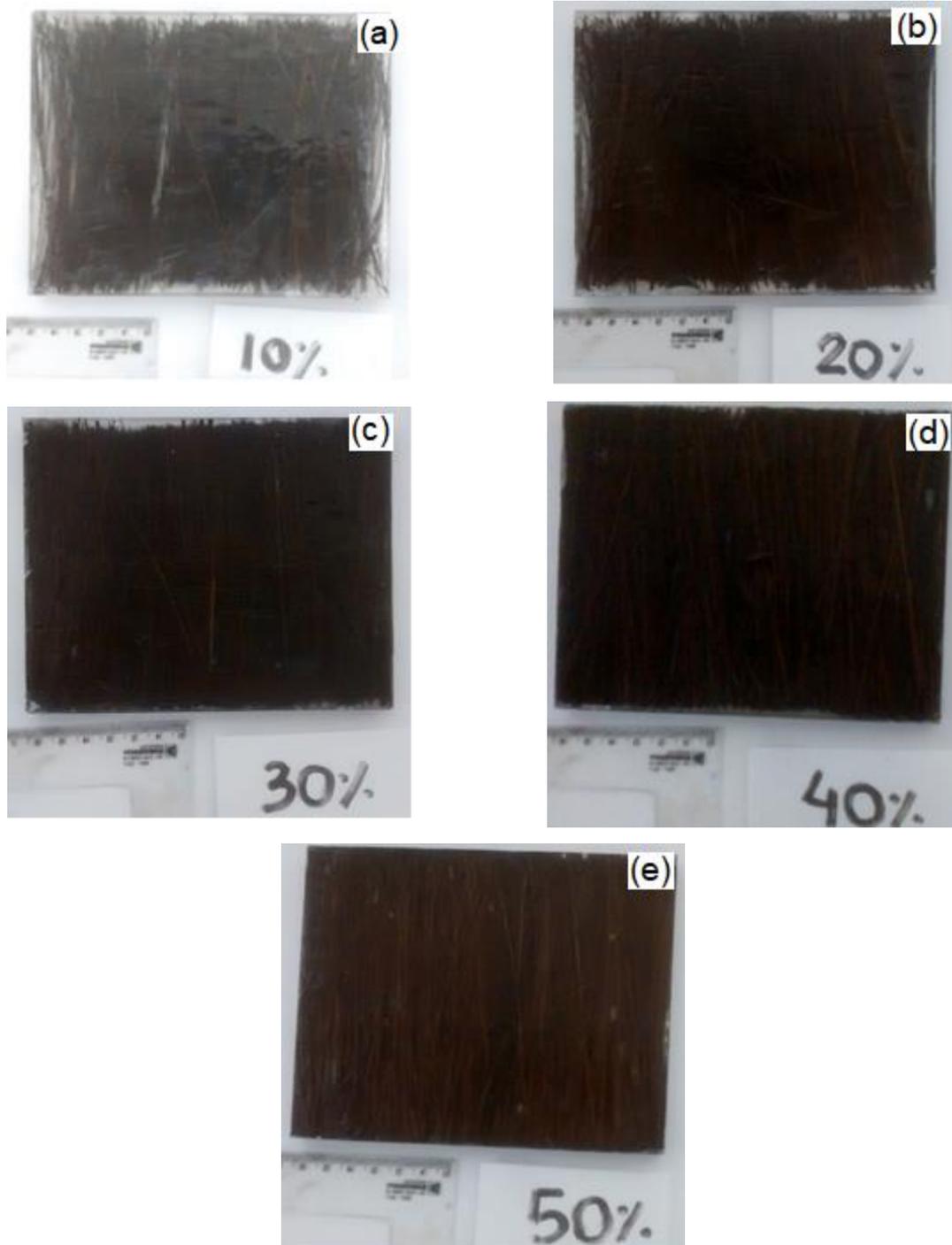
A sequência apresentada nas FIG.s 3.6 (a) – (d) ilustra as etapas para o preparo da placa de compósito. Alguns cuidados devem ser tomados nesse procedimento, um dos principais diz respeito à aplicação de um material (graxa de silicone e filme de PVC) que facilite o desmolde e preserve o molde metálico.



**FIG. 3.6 – Procedimento para preparação dos compósitos (a) molde metálico na prensa, (b) molde metálico na prensa com as fibras já acomodadas, (c) preenchimento com resina epóxi e (d) aplicação da carga.**

Após o acondicionamento da resina e fibras em quantidades adequadas no interior do molde metálico, é aplicada uma pressão de 3 MPa, utilizando a prensa manual SKAY modelo de 15 Ton, para promover a cura à temperatura ambiente por um período de 24 horas.

Posteriormente, foi feita a desmoldagem das placas compósitas prontas que estão apresentadas nas FIG.s 3.7 (a) – (e).



**FIG. 3.7 – Placas compósitas resultantes desse processamento (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40% e (e) 50%vol de fibras de piaçava.**

### 3.3 FABRICAÇÃO DOS CORPOS CERÂMICOS

Para a confecção das pastilhas cerâmicas foi fundamental seguir algumas etapas; primeiro foi necessário misturar o pó de alumina com o ligante e aditivo de sinterização em um moinho de bolas. Posteriormente essa mistura foi colocada na estufa para secagem e então o pó foi macerado, peneirado e submetido à prensagem uniaxial, originando corpos de provas verdes. Por fim, foram levados ao forno para que fossem sinterizados. Um diagrama resumindo as etapas seguidas para a produção dos corpos cerâmicos é apresentada na FIG.3.8.

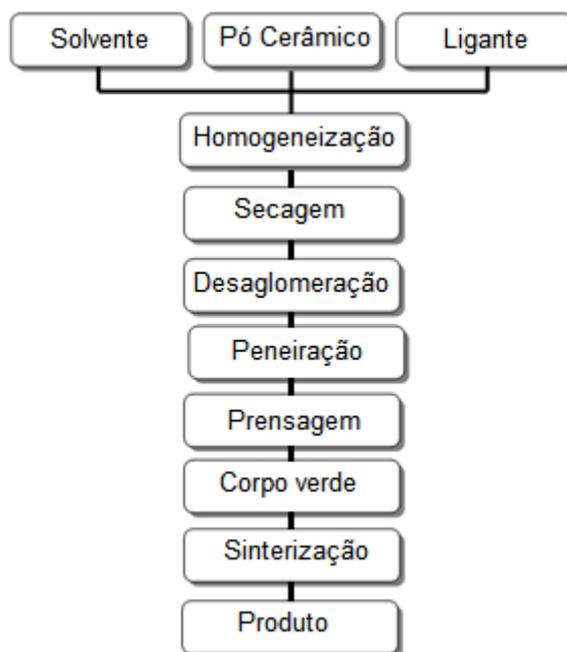


FIG. 3.8 – Etapas do processamento do material cerâmico.

#### 3.3.1 OBTENÇÃO DO PÓ CERÂMICO

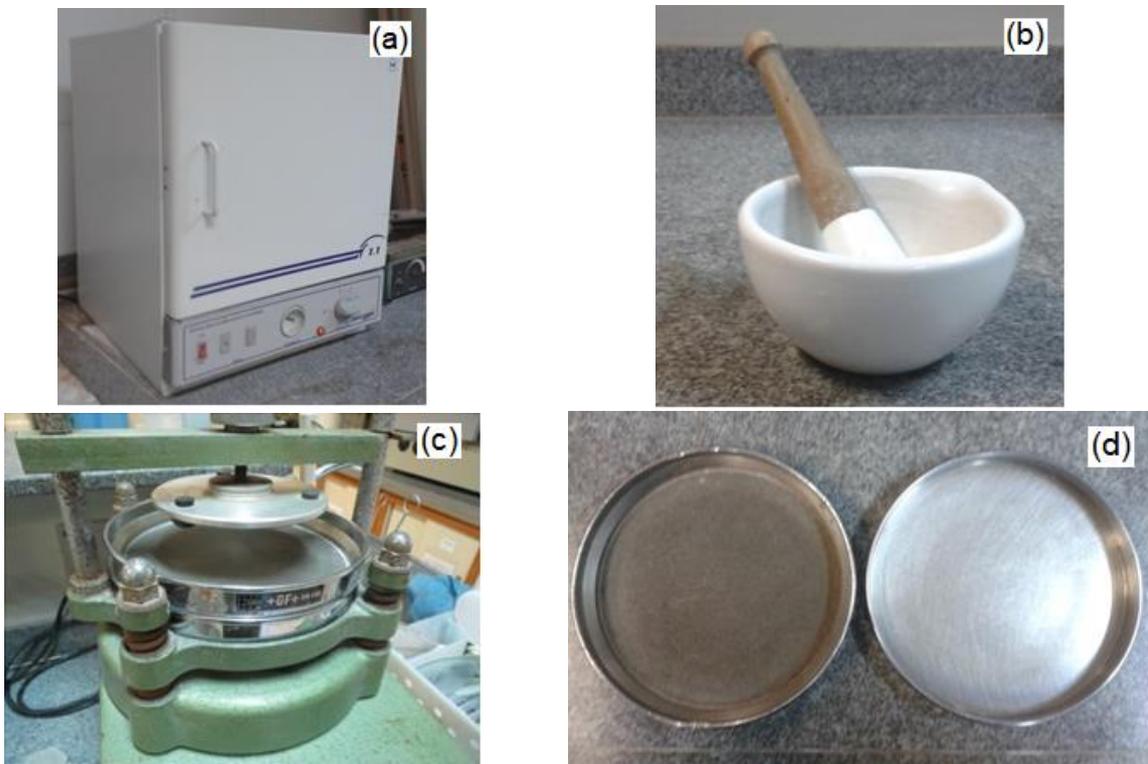
Para a fabricação dos corpos cerâmicos foi preparada uma mistura do pó de alumina, do aditivo de sinterização (nióbia) e do ligante (polietileno glicol – PEG) em um moinho de bolas de alumina, modelo MA 500 (FIG. 3.9) da marca MARCONI, por 8 horas. As proporções dessa mistura foram de 94,53% em peso de alumina, 3,94% em peso de nióbia e 1,53% em peso de PEG. Gomes (2004) mostrou que após a etapa de evaporação do ligante orgânico a proporção de nióbia passa a ser de 4% em peso e que a presença desse aditivo nessa concentração é capaz de alterar a processabilidade da alumina diminuindo a temperatura

de sinterização e melhorando a densificação, por exemplo. Madhu et al (2005) mostrou que a dopagem da alumina com  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  na proporção de 4% em peso é capaz de modificar o mecanismo de fratura da alumina, passando de transgranular para intergranular, através da precipitação do composto  $\text{AlNbO}_4$  nos contornos, o que para os resultados balísticos representam uma maior absorção de energia.



**FIG. 3.9 – Moinho de bolas da marca MARCONI utilizado no processamento dos pós cerâmicos.**

As FIG.s 3.10 (a) – (d) apresentam uma série de equipamentos utilizados no processamento dos materiais cerâmicos.

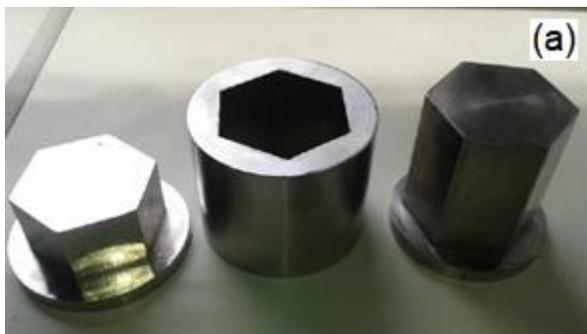


**FIG. 3.10 – Equipamentos utilizados no processamento cerâmico (a) estufa, (b) almofariz, (c) agitador de peneiras e (d) peneiras.**

Após a moagem, essa mistura foi colocada em estufa, da marca ODONTOBRAS (FIG. 3.10 (a)), para a secagem à temperatura de 100°C, por 48 horas. Em seguida, foi realizada a desaglomeração do pó em um almofariz (FIG. 3.10 (b)) e, então, peneirado com auxílio de um agitador de peneiras marca +GF+ tipo PSA (FIG. 3.10 (c)) em uma peneira de abertura 0,355mm (FIG. 3.10 (d)). O material passante é reservado para a etapa subsequente de processamento, enquanto que o material retido volta novamente para a etapa de desaglomeração.

### 3.3.2 PRENSAGEM

Após ser peneirada, a etapa subsequente é a prensagem do pó cerâmico a fim de se obter o corpo “verde” já no formato final desejado e com uma mínima resistência ao manuseio. Para tal, 100g do material é colocado em um molde metálico hexagonal (FIG. 3.11 (a)) e então prensado com uma pressão de 30 MPa (12 Ton) em uma prensa NOWAK hidráulica semiautomática (FIG. 3.11 (b)) com capacidade para 30 toneladas.



**FIG. 3.11 – (a) Molde metálico para conformação do pó cerâmico e (b) prensa hidráulica utilizada.**

### 3.3.3 SINTERIZAÇÃO

Os corpos cerâmicos a “verdes” foram sinterizados utilizando o forno INTI, modelo FE 1700 (FIG. 3.12). A programação de sinterização utilizada foi a mesma de outros trabalhos e

amplamente discutido por outros autores (TRINDADE *et al.*, 2013; LUZ, 2014; BRAGA, 2015; BOLZAN, 2016).



**FIG. 3.12 – Forno INTI utilizado na sinterização dos corpos cerâmicos.**

- (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, com taxa de 5°C/min;
- (6) Patamar de sinterização a 1400°C por 3h, e resfriamento no forno;
- (7) Resfriamento de 1400°C até 1000°C, com taxa de 5°C/min;
- (8) Resfriamento de 1000°C até 700°C, com taxa de 3°C/min;
- (9) Resfriamento de 700°C até temperatura ambiente, na inércia do forno.

As três primeiras etapas desse processamento devem ser realizadas com uma taxa lenta, pois é durante essa parte da sinterização em que ocorre a eliminação do PEG (ligante orgânico), e a partir desse ponto a composição do material passa a ser 96% de Alumina e 4% de Nióbia. As últimas três etapas são referentes ao resfriamento e são muito importantes de modo a evitar o aparecimento de trincas que possam vir a fragilizar o corpo cerâmico.

Os corpos cerâmicos resultantes deste processamento estão ilustrados nas FIGs 3.13. É importante ressaltar que os corpos cerâmicos produzidos utilizando os mesmos materiais e mesmos fornecedores, como citado anteriormente, já foi amplamente discutido em trabalhos anteriores (CHAGAS, 2014; GOMES, 2004; DA SILVA, 2014; TRINDADE, 2012).



**FIG. 3.13 – Corpos cerâmicos resultantes desse procedimento.**

Para os corpos cerâmicos resultantes do processamento foram medidos os valores de espessura do corpo cerâmico, calculados os valores de densidade geométrica e a densificação do corpo cerâmico como uma forma de controle da qualidade. Os resultados obtidos foram então comparados com outros trabalhos para verificar se o processamento foi eficiente e os corpos de prova produzidos estariam aptos para serem utilizados como camada frontal do SBM. A TAB. 3.9 resume os resultados obtidos. É importante ressaltar que para o cálculo de densificação média, foi utilizado a mesma metodologia empregada em outros trabalhos (BRAGA, 2015; CHAGAS, 2014; GOMES, 2004). Onde a densificação média é calculada a partir da relação entre a densidade média do sinterizado e a densidade teórica da cerâmica ( $4,02304 \text{ g/cm}^3$ ), obtida pela regra das misturas.

**TAB. 3.9 – Espessura, densidade e densificação do corpos cerâmicos produzidos.**

Propriedade	Média	Desvio Padrão
Espessura	10,59 mm	0,15 mm
Densidade	3,436 g/cm <sup>3</sup>	0,048 g/cm <sup>3</sup>
Densificação	85,42 %	1,21 %

Os resultados encontrados para densidade e densificação são estatisticamente iguais aos verificados por Braga (2015) e Gomes (2004), que obtiveram os valores de  $3,33 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$  e  $3,41 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$  para densidade e  $82,72 \pm 1,68\%$  e  $84,83 \pm 1,75\%$  para densificação média, respectivamente.

### 3.4 OBTENÇÃO DO SISTEMA DE BLINDAGEM MULTICAMADAS

A junção dos componentes utilizados para formar o SBM é feita através da união da placa de alumínio com a placa compósita e, posteriormente a esse sistema é adicionado os corpos cerâmicos. A união é feita utilizando um adesivo de poliuretano de cura rápida da marca GOLDEN GLASS (FIG. 3.14), em uma camada extremamente fina de modo a evitar qualquer interferência nos testes balísticos. A FIG. 3.15 (a) apresenta a ilustração esquemática do SBM produzido, enquanto as FIG. 3.15 (b) e (c) apresentam as vistas frontal e superior, respectivamente.



FIG. 3.14 – Adesivo de base poliuretano utilizado na colagem dos componentes do SBM.

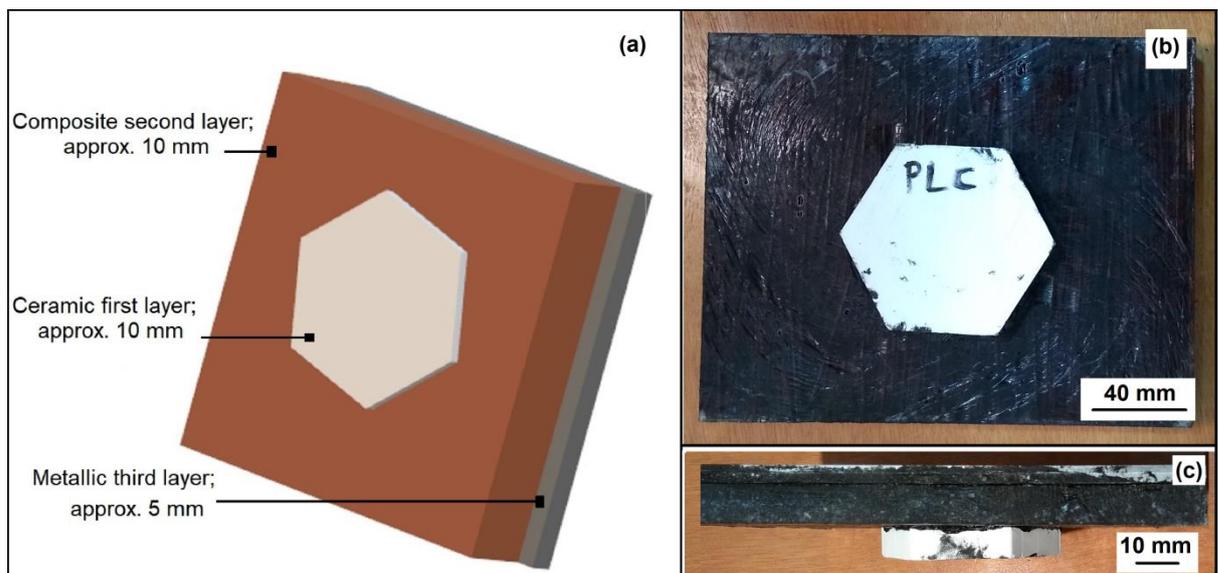


FIG. 3.15 – SBM pronto.

### 3.5 ENSAIO BALÍSTICO

Os ensaios balísticos têm como objetivo verificar a habilidade do material absorver energia cinética durante um evento dinâmico. Basicamente, duas modalidades desse tipo de ensaio podem ser avaliadas:

- (a) O ensaio do SBM como um todo para avaliar o nível de proteção balística alcançada. Em que o sistema fica a frente de um bloco de massa plástica (plastilina) que simula a densidade do corpo humano, com o objetivo de proteger tal bloco. Após o disparo uma indentação (marca) é deixada na plastilina, a profundidade de deformação provocada é analisada, a fim de se determinar a qualidade da proteção.
- (b) O ensaio da placa compósita individual, a fim de avaliar a quantidade de energia cinética absorvida apenas pelo compósito epóxi-piaçava, através da análise de velocidade residual do projétil.

Ambos os ensaios, bem como os materiais utilizados para sua realização são descritos pela norma NIJ 0101.04 (2000) que é a norma seguida pelo CAEx em ensaios balísticos.

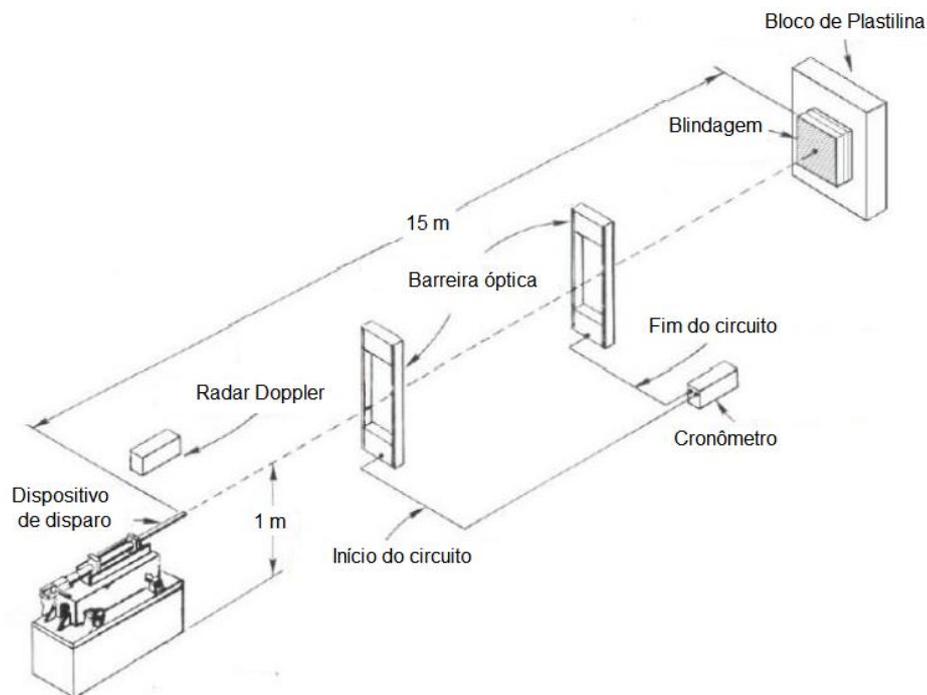
Para garantir que a densidade da plastilina esteja de acordo com a especificada pela norma NIJ 0101.04, a plastilina deve deixada em uma câmara quente por 4h aproximadamente. Posteriormente, a plastilina tem sua consistência verificada através do procedimento especificado na norma NIJ 0101.04, em que cinco esferas de aço são liberadas de uma altura de aproximadamente 2 metros e a profundidade de indentação é medida, esse ensaio é chamado de “*Drop Weight Test*”. As FIG.s 3.16 (a) e 3.16 (b) mostram o equipamento modelo B801 Drop Tester da marca HIGH PRESSURE INSTRUMENTATION (HPI) utilizado para essa etapa de verificação.



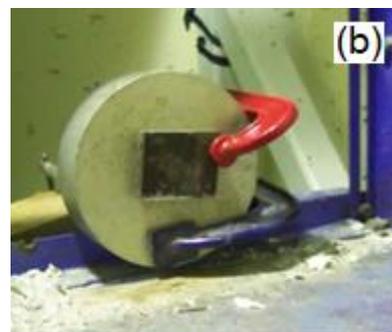
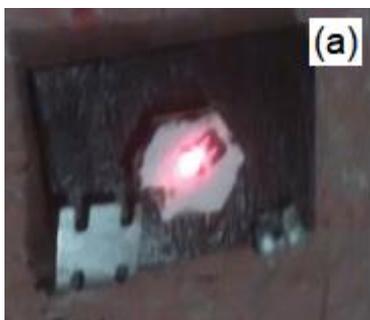
**FIG. 3.16 – Equipamento de queda de peso utilizado para verificar se a plastilina se encontra com densidade adequada antes do ensaio balístico (a) cabine e (b) sistema de acionamento.**

Se os valores encontrados estiverem no intervalo de  $20 \pm 3$  mm a plastilina encontra-se na consistência ideal e o ensaio pode continuar, caso contrário a plastilina deve voltar a ser aquecida até que atinja consistência adequada.

A FIG. 3.17 apresenta esquematicamente a configuração adotada para os ensaios balísticos. O aparato experimental contou com um sistema de radar Doppler, modelo SL-520P, do fabricante Weibel (Fixed-Head Doppler Radar Systems) e os disparos foram efetuados por um provete de velocidade produzido pela HPI. As FIGs 3.18 (a) e 3.18 (b) mostram os corpos de prova posicionados antes do ensaio balístico para as duas situações, eficiência balística e velocidade residual, respectivamente.



**FIG. 3.17 – Desenho esquemático que apresenta a configuração adotada para os ensaios balísticos.**



**FIG. 3.18 – Corpos de prova posicionados antes do (a) ensaio balístico com plastilina e (b) ensaio de velocidade residual.**

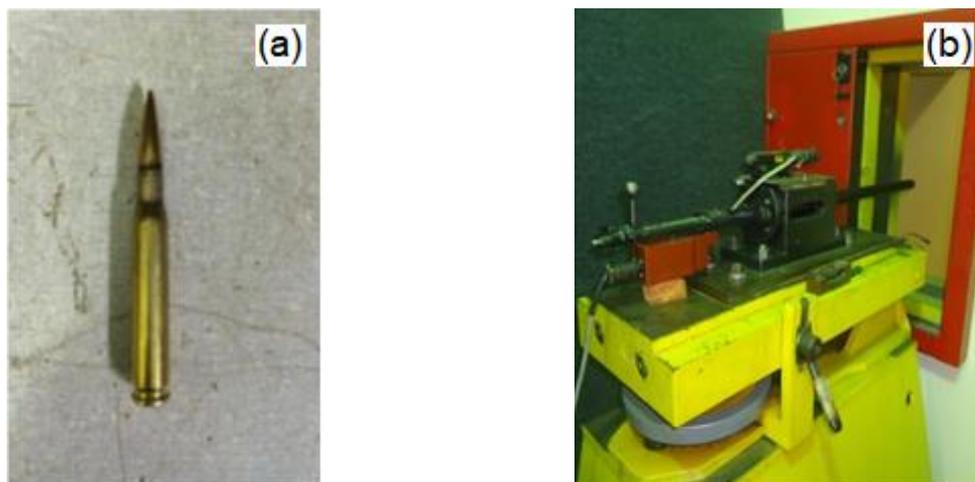
Para a realização dos testes balísticos foram utilizadas as seguintes condições:

(a) Munição: calibre 7,62 mm M1 (FIG. 3.19 (a)), conforme é fornecida comercialmente ao Exército; com projétil de massa de 9,7 gramas;

(b) Dispositivo: provete calibre 7,62 mm (FIG. 3.19 (b)) equipado com mira laser e um dispositivo de fixação do alvo.

(c) Distância do alvo: 15 metros, conforme previsto na norma ABNT NBR 15000 para as munições 7,62 mm;

(d) Ângulo de incidência no alvo: 90°.



**FIG. 3.19 – Equipamentos utilizados nos ensaios balísticos (a) munição calibre 7,62 mm e (b) provete equipado com mira laser.**

Para a avaliação do desempenho balístico, a norma NIJ 0101.04 prevê que uma proteção balística é eficiente se a medida da maior profundidade da deformação na massa de plastilina, após o impacto, for igual ou inferior a 44 mm, uma vez que caso a profundidade de deformação for superior a 44 mm tal disparo seria considerado letal para a vítima. Para a medição da deformação provocada à plastilina foi utilizado um sensor laser de precisão de 0,01 mm como apresentado na FIG. 3.20.



**FIG. 3.20 – Sensor laser utilizado para medida da indentação causada à plastilina após o ensaio balístico.**

O ensaio de velocidade residual permite estimar o limite balístico ou velocidade crítica ( $V_L$ ) que o material suporta. A estimativa da velocidade crítica foi feita através da energia absorvida pelo material, conforme apresentado anteriormente na Equação 2.2.

Todos os dados coletados passaram por uma análise de probabilidade estatística, a fim de correlacionar desempenho balístico, energia absorvida e o tipo de compósito empregado como segunda camada no SBM.

### 3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Através da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) pode-se tirar informações a respeito da morfologia dos materiais, da interação do compósito epóxi-piaçava com os fragmentos de cerâmicos da camada frontal do SBM e dos mecanismos envolvidos na absorção de energia pelos compósitos após os ensaios balísticos. Nesta técnica a área a ser analisada é irradiada por um fino feixe de elétrons, que é varrido através da superfície para formar uma imagem da topografia. O modo de operação foi o de elétrons secundários e diversos aumentos foram empregados nessa investigação.

O microscópio eletrônico de varredura utilizado foi do modelo Quanta FEG 250, da FEI (FIG. 3.21). Tal microscópio está equipado com um detector de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) que permitiu a caracterização qualitativa dos elementos presentes na amostra. Todas as amostras foram metalizadas com platina ou ouro em equipamento da marca LEICA, modelo EM ACE600, a fim de tornar a superfície da amostra condutora e melhorar o sinal gerado pelo microscópio e a qualidade da imagem. Todos esses equipamentos estão disponíveis no Laboratório de Microscopia Eletrônica do IME.



**FIG. 3.21 - O microscópio eletrônico de varredura utilizado foi do modelo Quanta FEG 250, da marca FEL.**

### 3.7 ANÁLISE TÉRMICA

A estabilidade térmica das fibras foi avaliada através de duas técnicas de análise térmica:

- (a) Análise Termogravimétrica (TGA) – em que a estabilidade térmica das fibras é avaliada com base em informações quantitativas sobre a decomposição de uma amostra em função da temperatura. Foi utilizado o equipamento modelo TGAQ500, pertencente ao Laboratório de Multiusuário do PEMM/UFRJ. Os parâmetros foram: temperatura máxima de 500°C; taxa de aquecimento de 10°C/min; e fluxo de 60 ml/min de nitrogênio.
- (b) Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) – em que se avalia a existência de picos de natureza endotérmica ou exotérmica, e tais picos são relacionados à fenômenos como transições de fase ou reações diversas que provoquem variações de calor. Para esta análise foi utilizado o equipamento DSC404F1 da Netzsch, pertencente ao IME, com as seguintes condições: temperatura máxima de 200°C; taxa de aquecimento de 3°C/min; em atmosfera de nitrogênio e oxigênio.

### 3.8 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO

A análise de espectroscopia de infravermelho com transformadas de Fourier (FTIR) foi utilizada para determinação de características estruturais das fibras de piaçava, no que se refere a grupos funcionais e de ligações presentes na amostra. Esta análise foi realizada em um equipamento modelo IR Prestige 21-FTIR da marca Shimadzu, pertencente à seção de química do IME. A amostra foi preparada da seguinte forma: as fibras de piaçava foram maceradas e misturadas com partículas de KBr, que são apropriadas para análise de FTIR. Então, tal composto foi prensado a fim de se obter um filme em condições apropriadas para o ensaio.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

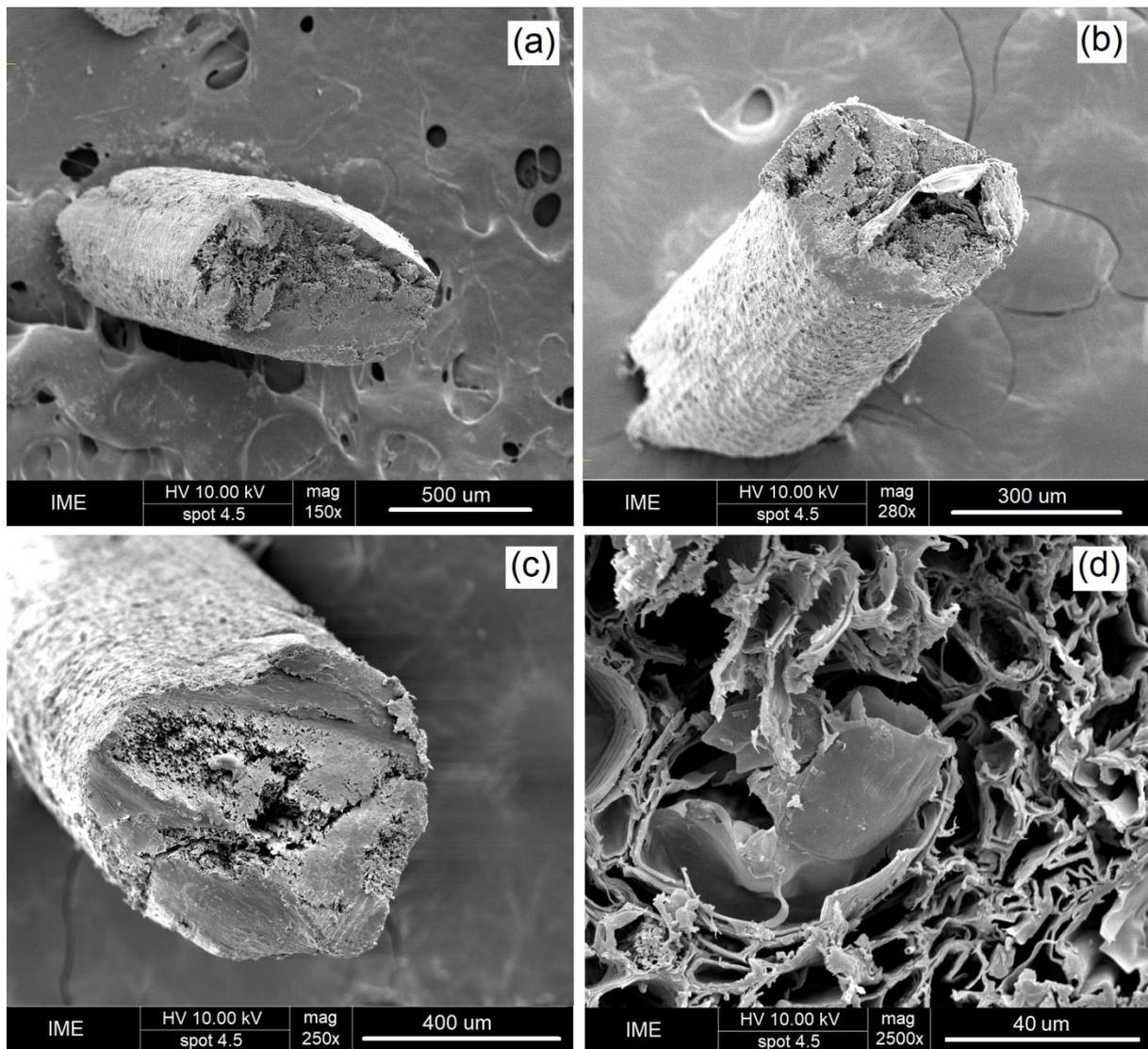
### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE PIAÇAVA

Antes de se iniciar a produção das placas compósitas para utilização em SBM, foram realizadas algumas análises a respeito das características das fibras de piaçava. Os resultados dessas investigações são apresentados ao longo dessa seção.

#### 4.1.1 MORFOLOGIA

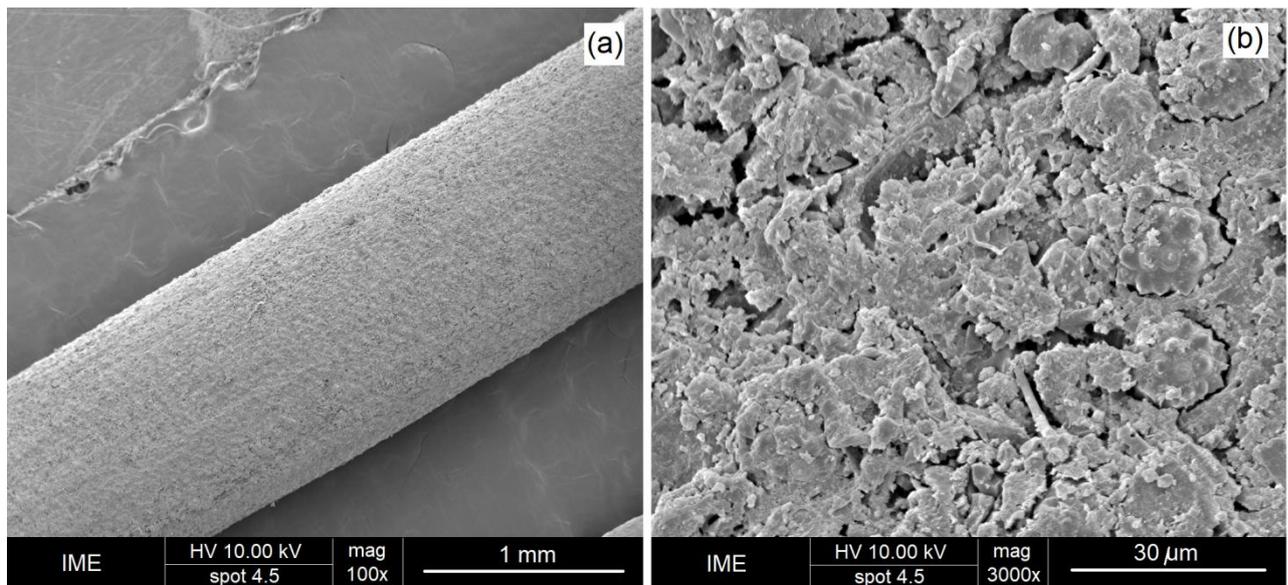
Foi realizada a análise morfológica das fibras de piaçava com o auxílio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). As FIG.s 4.1 (a) – (d) apresentam diversas seções transversais das fibras de piaçava em diferentes magnificações.

Nas FIG.s 4.1 (a) – (c) é possível verificar diferenças tanto no tamanho quanto na forma dessas fibras, embora apresentem a tendência de terem seção quase circular. Nestas micrografias é possível ainda notar uma característica rugosa, com a presença de vazios na superfície transversal. Esses vazios podem ser associados aos canais de lúmen, que como discutido na seção 2.2., são responsáveis pelo transporte de água e nutrientes ao longo da fibra. A FIG. 4.1 (d) destaca com maiores detalhes determinadas regiões da seção transversal da fibra de piaçava. A maior magnificação empregada nestas micrografias permite verificar a existência de diversas lacunas organizadas segundo uma distribuição celular. Mais ainda, é possível notar que tais células apresentam tamanhos e formas diferentes.



**FIG. 4.1 – Análise morfológica transversal das fibras de piaçava feitas com auxílio do MEV.**

As FIG.s 4.2 (a) – (b) apresentam as micrografias da superfície longitudinal de uma fibra de piaçava.



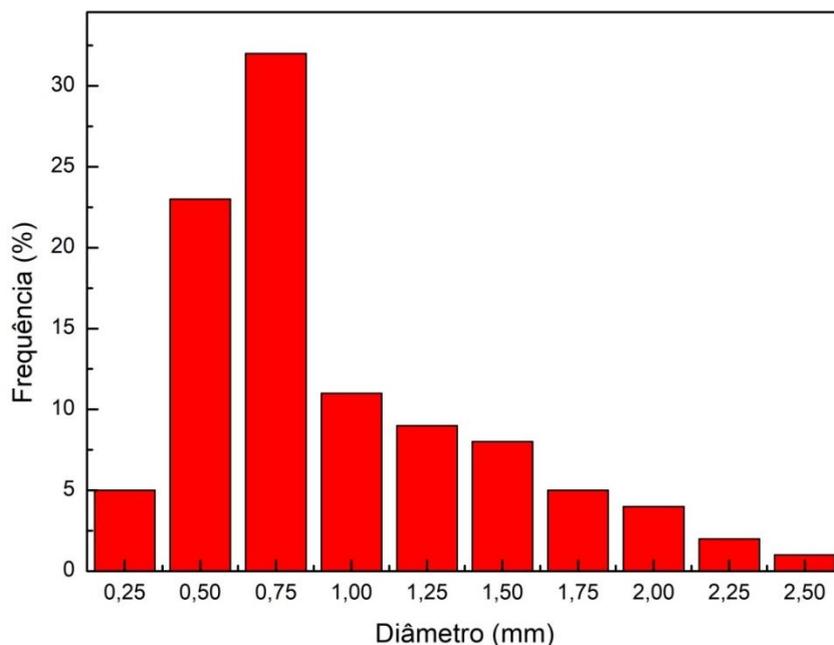
**FIG. 4.2 – Análise morfológica da superfície da fibra de piaçava: (a) 100x e (b) 3000x.**

Na FIG. 4.2 (a) é possível verificar o formato aproximadamente cilíndrico da fibra, exibindo uma superfície áspera e com diversas saliências que são características da fibra de piaçava. Na FIG. 4.2 (b), que apresenta uma maior magnificação da superfície, nota-se com clareza a existência de protruções, que se prendem nas saliências da superfície da fibra. Tais protruções podem ser associadas à característica áspera desta fibra. Nascimento et al (2012) realizaram um estudo para verificar a influência de um tratamento de superfície da fibra de piaçava em meio alcalino nas propriedades mecânicas de compósitos reforçados com fibras de piaçava. Tal tratamento resultou na remoção de todas as protruções da superfície da fibra. No entanto isto não resultou em nenhuma diferença significativa nas propriedades mecânicas do compósito.

A morfologia dessa fibra também é relatada em diversos outros trabalhos, que corroboram com os resultados obtidos e apresentados nesta dissertação (NASCIMENTO et al, 2012; MONTEIRO et al, 2008; ELZUBAIR et al, 2007; D'ALMEIDA et al, 2006; AQUINO et al, 2003).

#### 4.1.2 CARACTERIZAÇÃO DIMENSIONAL

Conforme apresentado nas FIG.s 4.1 (a) – (d), fica clara a existência de fibras de piaçava de diversos diâmetros. E então foi realizada a análise de distribuição do diâmetro das fibras de piaçava do lote recebido, conforme procedimento descrito na seção 3.1.1. A FIG. 4.3 apresenta o histograma de distribuição do diâmetro das fibras recebidas no lote.



**FIG. 4.3 - Histograma de distribuição do diâmetro das fibras recebidas no lote.**

Como apresentado no histograma de distribuição de diâmetro da fibra de piaçava, FIG. 4.3, é possível notar que a faixa de distribuição é bastante extensa. Verifica-se, por exemplo, a existência de algumas fibras com diâmetro de 0,25 mm enquanto outras com diâmetro de 2,5 mm, ou seja, com o diâmetro 10 vezes maior. Essa variação no diâmetro pode ser considerada um desafio, uma vez que, tal heterogeneidade de tamanhos poderá impactar diretamente nas propriedades mecânicas apresentadas pelas fibras. Monteiro et al (2011 b) mediram distribuição de diâmetros de diversas FNLs, inclusive a fibra de piaçava, e relacionaram com suas propriedades mecânicas. A TAB. 4.1 resume a faixa de distribuição das FNLs relatadas por Monteiro et al (2011 b). Pode-se notar, nesta TAB., que a heterogeneidade de tamanhos, citada anteriormente para a fibra de piaçava, também pode ser observada para todas essas FNLs. No entanto, comparando a fibra de piaçava com outras FNLs nota-se que a faixa de distribuição de diâmetro, em geral, é bem mais estreita. A faixa de distribuição relatado por

Monteiro et al (2011 b) estão de acordo com os valores encontrados nesta dissertação. Monteiro et al (2011 b) ainda mostram que as FNLs tendem a apresentar uma variação de propriedades mecânicas inversamente proporcionais ao seu diâmetro, fazendo com que quanto mais fina a fibra, melhores as propriedades mecânicas exibidas. No entanto para o desenvolvimento deste trabalho os compósitos foram reforçados com as fibras de piaçava escolhidas ao acaso, sem qualquer tipo de seleção por conta do seu diâmetro

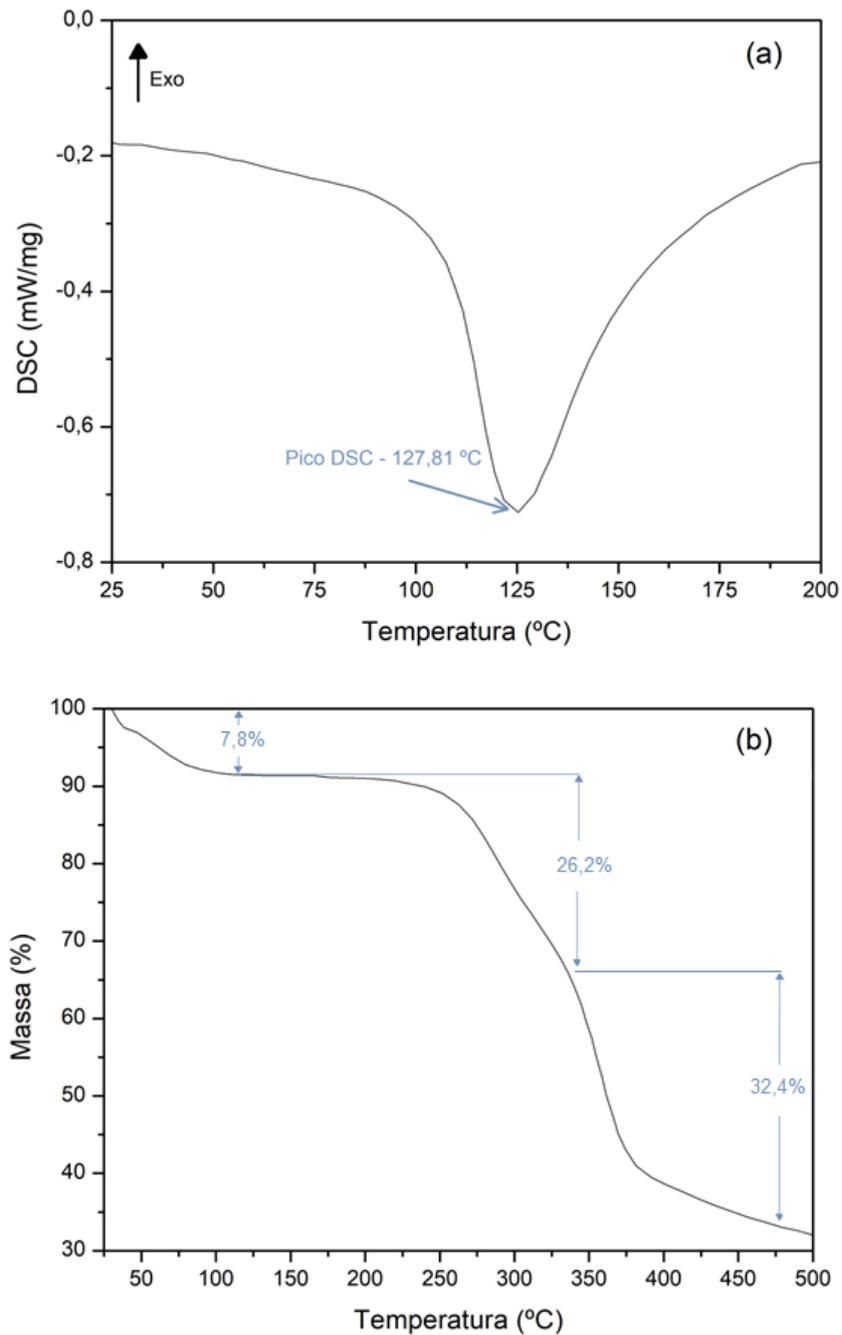
**TAB. 4.1 – Faixa de distribuição de diâmetro de diversas FNLs (MONTEIRO, 2011b).**

<b>FNLs</b>	<b>Faixa de distribuição (mm)</b>
Sisal	0,04 – 0,4
Ramie	0,002 – 0,04
Curauá	0,03 – 0,13
Juta	0,04 – 0,18
Bamboo	0,3 – 0,9
Coco	0,05 – 0,6
Buriti	0,3 – 0,8
Piaçava	0,2 – 2,45
	0,25 – 2,5 *PD

\*PD – Presente dissertação

#### 4.1.3 ANÁLISE TÉRMICA

As análises térmicas de termogravimetria (TGA) e calorimetria diferencial de varredura (DSC) foram realizadas a fim de verificar o comportamento térmico da fibra de piaçava, seguindo procedimento apresentado na seção 3.7. A FIG. 4.4 (a) e (b) apresentam os resultados destas investigações.



**FIG. 4.4 – Análise térmica: (a) DSC e (b) TGA da fibra de piaçava.**

A curva de DSC, FIG. 4.4 (a), divulga a existência de um pico endotérmico à aproximadamente 128°C. Um pico endotérmico em temperatura próxima a essa foi relatado por Carashi et al (2000) para o ensaio de DSC da fibra de curauá. Esse pico pode ser associado à quebra de ligações inter- e intramoleculares. Para a curva de TG, FIG. 4.4 (b), três faixas de perda de massa são relatadas com uma perda de massa de 7.8%, 26.2% e 32.4%, respectivamente. A primeira perda de massa, que ocorre para temperaturas relativamente

baixas, isto é, entre a temperatura ambiente e 150°C pode ser atribuída a presença de umidade absorvida ou combinada e voláteis inerentes à fibra. Na faixa de 225 – 325°C observa-se uma perda de massa de 26.2%, nesta faixa de temperatura inicia-se a degradação da fibra de piaçava, sendo associado à degradação da hemicelulose e celulose. Por fim, a perda de massa de 32.4% observada a partir de 350°C até 500°C, que é a temperatura máxima do ensaio, pode estar relacionada à degradação da lignina. Tomczak et al (2007) realizaram um estudo a respeito das propriedades das fibras de coco, que conforme discutido anteriormente é a FNL mais próxima da piaçava em relação as propriedades e composição. Neste estudo, foi relatado um comportamento térmico muito similar ao apresentado aqui, com perdas de massa de 5.4%, 19.6% e 40.1% em faixas de temperatura próximas às encontradas para a fibra de piaçava. Os resultados encontrados também são próximos aos apresentados na investigação de D’Almeida et al (2006) para a própria fibra de piaçava, relatando perdas de 5.185%, 18.8% e 34.33% nas temperaturas pico de 73.95°C, 276.4°C e 347.78°C, respectivamente.

#### 4.1.4 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADAS DE FOURIER

A investigação da fibra de piaçava pela técnica de espectroscopia de infravermelho com transformadas de Fourier (FTIR) é essencial para revelar as bandas de absorção de componentes moleculares específicos, a fim de compreender a interação que ocorre entre a fibra de piaçava e matriz polimérica. A FIG. 4.5 apresenta o gráfico obtido de FTIR para a fibra de piaçava.

Deste gráfico resultado pode ser verificado um primeiro pico por volta 3335.54  $\text{cm}^{-1}$ , que é característico da vibração axial de grupos hidroxilas (O-H) da celulose. Khan et al (1993) discute que essa vibração de grupos O-H pode ser associada com água absorvida, além de álcoois encontrados em celulose, hemicelulose e lignina. O segundo pico em 2912.83  $\text{cm}^{-1}$  é referente à vibração de  $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$ , que uma característica de estrutura molecular orgânica de qualquer fibra natural. Da Silva et al (2016) afirmam que os picos por volta de 3400  $\text{cm}^{-1}$  pode ser associado à facilidade de desorção de água das FNLs. Por outro lado, a banda por volta de 2900  $\text{cm}^{-1}$  pode representar a facilidade de reação dos componentes das FNLs (celulose, hemicelulose e lignina), em particular, à celulose em interagir com materiais

poliméricos durante a fabricação de compósitos. A banda em  $1686\text{ cm}^{-1}$  é ligada ao alongamento de C=O e em  $1587.48\text{ cm}^{-1}$  tem-se as ligações C-O e C-C. D’Almeida et al (2011) também fizeram uma investigação a cerca da influência do tratamento de superfície (tratamento usando NaOH) nas propriedades das fibras de piaçava. Para verificar a eficiência desses tratamentos, foram realizadas análises de FTIR antes e depois do tratamento, e foram verificadas bandas em posições próximas às encontradas aqui.

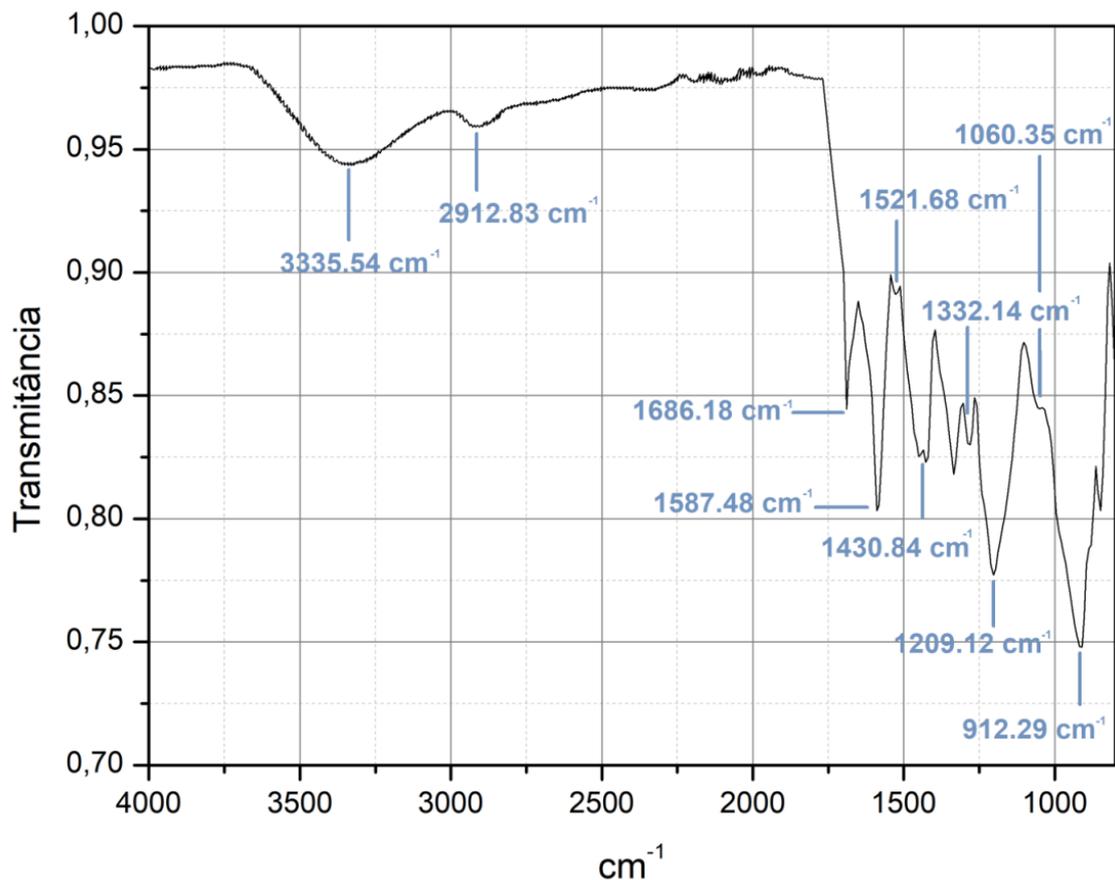


FIG. 4.5 – Espectro de FTIR da fibra de piaçava

## 4.2 COMPÓSITOS DE MATRIZ EPÓXI REFORÇADOS COM FIBRAS DE PIAÇAVA

Compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de piaçava foram produzidas em diversas condições que já foram especificadas na seção 3.2. No entanto, a TAB. 4.2 destaca quais foram essas condições, bem como apresenta a nomenclatura de cada uma delas que será utilizada a partir desse ponto.

**TAB. 4.2 – Condições investigadas na presente dissertação.**

<b>Nomenclatura</b>	<b>Material</b>	<b>Arranjo/Configuração</b>
ERP10	Compósito de epóxi reforçado com 10% vol de fibras de piaçava	Fibras longas e alinhadas em uma direção
ERP20	Compósito de epóxi reforçado com 20% vol de fibras de piaçava	Fibras longas e alinhadas em uma direção
ERP30	Compósito de epóxi reforçado com 30% vol de fibras de piaçava	Fibras longas e alinhadas em uma direção
ERP40	Compósito de epóxi reforçado com 40% vol de fibras de piaçava	Fibras longas e alinhadas em uma direção
ERP50	Compósito de epóxi reforçado com 50% vol de fibras de piaçava	Fibras longas e alinhadas em uma direção

A inspeção visual realizada nos compósitos produzidos revelaram materiais homogêneos sem grande presença de bolhas de ar referentes a erros de processamento, conforme apresentado na FIG. 3.6. Tal feito pode ter sido alcançado por conta do modo de aplicação de carga durante o processamento na prensa hidráulica, a aplicação de carga foi feita de maneira gradual e muito lentamente de modo que o ar preso entre as fibras, dentro do material, tenha tempo suficiente para se soltar. Como forma de controle, foi medida a espessura e densidade geométrica dos compósitos produzidos, e as suas médias e desvios padrão são apresentados na TAB. 4.3.

**TAB. 4.3 – Espessura e densidade geométrica dos compósitos produzidos.**

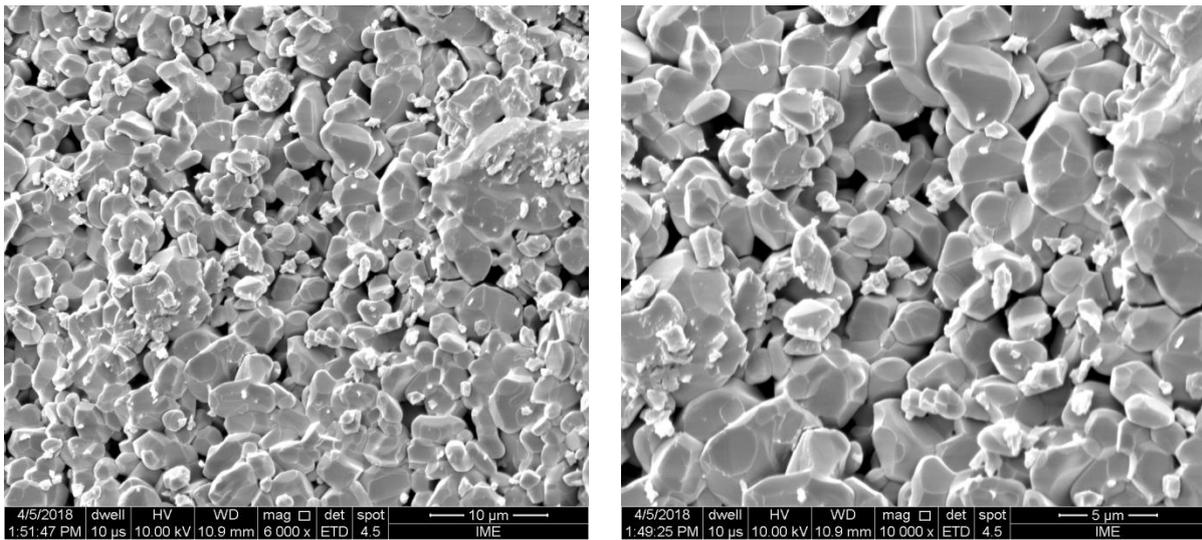
<b>Compósito</b>	<b>Espessura Média (mm)</b>	<b>Desvio padrão (mm)</b>	<b>Densidade geométrica média (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Desvio padrão (g/cm<sup>3</sup>)</b>
ERP10	11,37	0,43	1,09	0,03
ERP20	11,64	0,49	1,07	0,03
ERP30	11,38	0,33	1,08	0,03
ERP40	11,24	0,21	1,10	0,02
ERP50	11,21	0,22	1,12	0,02

Pode-se observar que tanto os valores de espessura quanto de densidade dos compósitos produzidos são estatisticamente iguais, com isso é possível acreditar que esses resultados não terão influência nos ensaios balísticos.

## 4.3 ENSAIOS BALÍSTICOS

### 4.3.1 MATERIAL CERÂMICO

Em todos os ensaios dos SBM, a camada frontal cerâmica foi completamente destruída e energia absorvida nesse fenômeno é da ordem de 56% (GOMES, 2004; MONTEIRO et al, 2014). A fratura predominante neste cerâmico é a intergranular. A precipitação de  $\text{AlNbO}_4$  nos contornos de grão fragiliza o material e se deve por conta da adição de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  na formulação desse cerâmico. As trincas percorrem maior caminho ao contornarem o grão e, conseqüentemente, absorvem uma maior parcela de energia (CHAGAS, 2014; TRINDADE, 2012; MADHU et al, 2005). A FIG. 4.6 (a) e 4.6 (b) apresenta a superfície de fratura predominantemente intergranular de um dos fragmentos de material cerâmico usado com camada frontal do SBM, recuperado após o ensaio balístico.



**FIG. 4.6 – Superfície de fratura dos corpos cerâmicos após o ensaio balístico com magnificações de (a)6000x e (b)10000x.**

### 4.3.2 ENSAIO BALÍSTICO DE PROFUNDIDADE DE INDENTAÇÃO

Um indicador muito importante da eficiência dos SBMs é a profundidade de indentação causada no bloco de plastilina após o ensaio balístico. Esse ensaio é chamado de “*Perforation and Backface Signature Test (P-BFS)*” e descrito pela NIJ 0101.04 (2000).

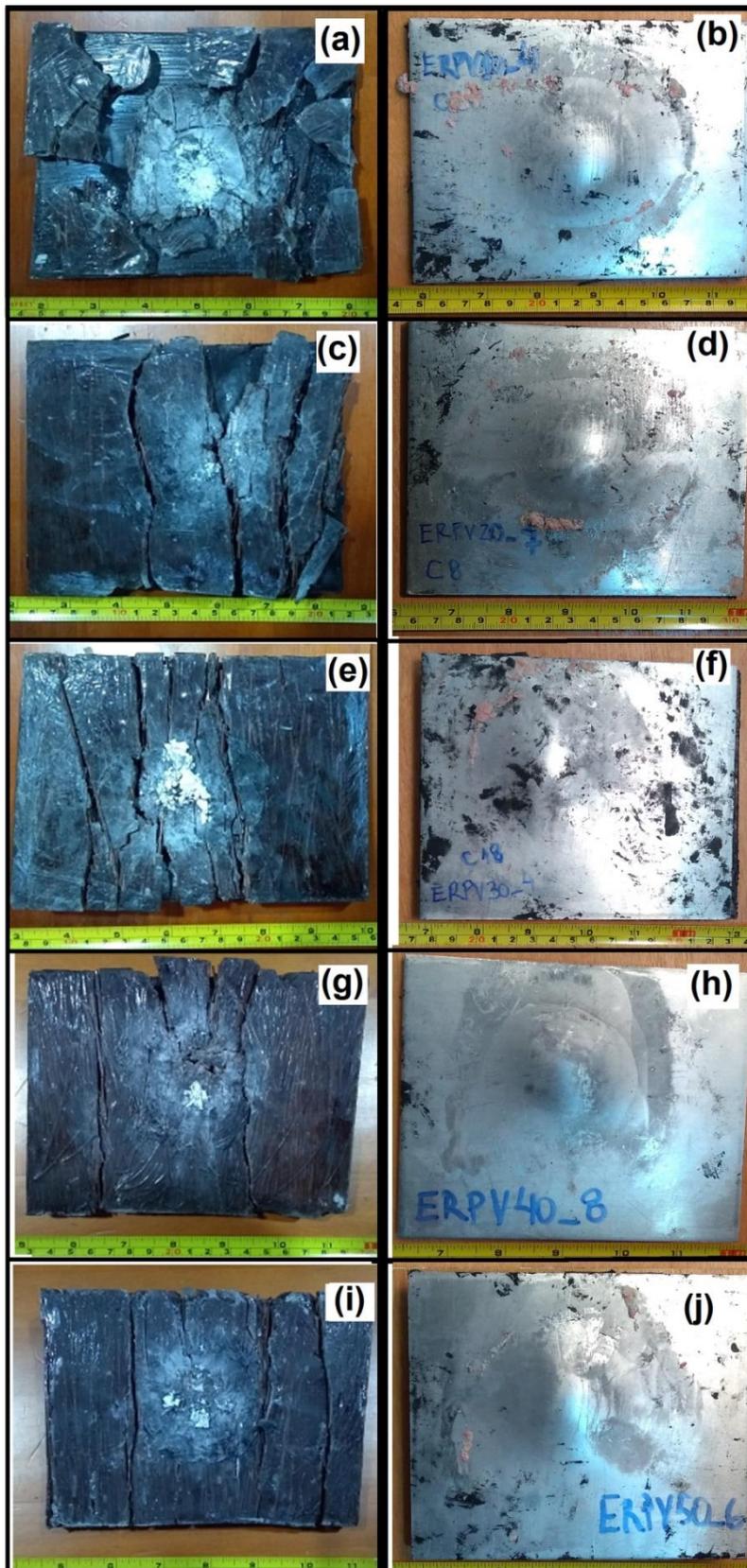
Após o ensaio de P-BFS os SBMs foram analisados macroscopicamente para avaliar a integridade dos componentes após o impacto balístico. As FIGs 4.7 (a) – (j) exibe tanto a parte frontal quanto a parte posterior de cada uma das condições testadas.

Pode-se notar que, os SBMs não foram perfurados para nenhuma das condições investigadas, como mostrado nas FIG.4.7 (b), (d), (f), (h) e (j). Para a condição ERPV10, FIG. 4.7 (a), foi observada a completa fragmentação da camada de compósito, inclusive, se soltando da camada posterior (liga de alumínio). No entanto, com o aumento da fração volumétrica de fibra de piaçava empregada como reforço do compósito, observou-se uma tendência de diminuição na quantidade de trincas e fraturas do compósito após o ensaio balístico. Tal comportamento pode ser verificado nas FIG.s 4.7 (c), (e), (g) e (i). Apesar disso, ao se considerar a aplicação desses materiais como camada intermediária em um SBMs, é mandatório que o material seja capaz de manter sua integridade física após o impacto balístico (MEDVEDOVSKI et al, 2010; TASDERMIRCI et al, 2012; MONTEIRO et al, 2016). Como citado anteriormente, o número de trincas e fraturas apresentou uma relação inversa com a quantidade de fibra utilizada como reforço, mas mesmo assim nenhuma das condições investigadas foi capaz de manter totalmente sua integridade.

A TAB. 4.4 apresenta os resultados de profundidade de indentação referentes ao ensaio de P-BFS para todas as 5 condições analisadas neste trabalho. Considerando os resultados apresentados na TAB. 4.4, é possível notar que todos resultados de profundidade de indentação após o teste de P-BFS foram menores do que o valor máximo considerado pela norma internacional (NIJ, 2000). Mais ainda, os valores obtidos são mais de duas vezes menores do que o previsto pela norma, que é 44 mm. Esse é um resultado importante e um requisito técnico para considerar o uso desse tipo de blindagem.

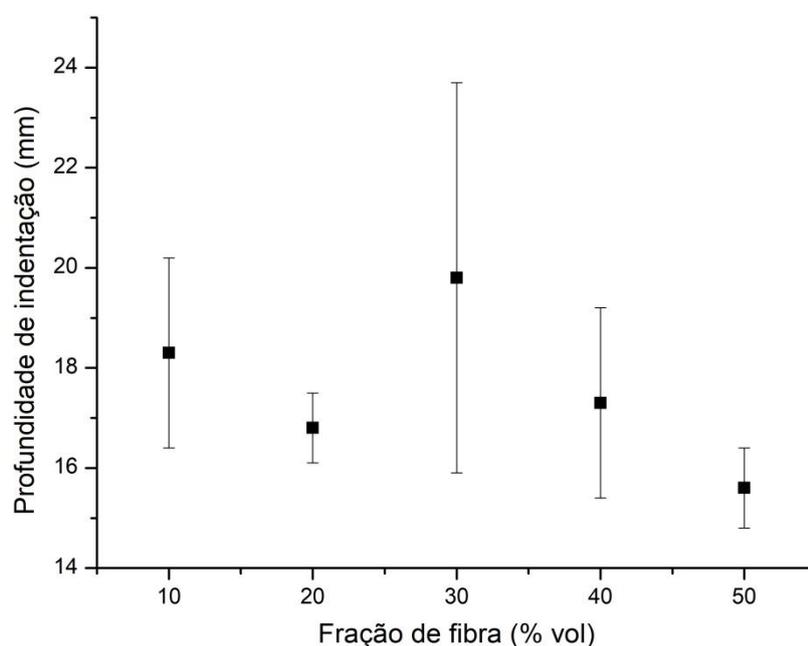
**TAB. 4.4 – Resultados de profundidade de indentação**

<b>Condição</b>	<b>Profundidade de indentação após os testes de P-BFS (mm)</b>
ERPV10	18,3 ± 1,9
ERPV20	16,8 ± 0,7
ERPV30	19,8 ± 3,9
ERPV40	17,3 ± 1,9
ERPV50	15,6 ± 0,8



**FIG. 4.7 – Face frontal e posterior dos SBM depois do ensaio balístico: (a) e (b) ERPV10; (c) e (d) ERPV20; (e) e (f) ERPV30; (g) e (h) ERPV40; (i) e (j) ERPV50.**

Para uma melhor visualização desses resultados, a FIG. 4.8 apresenta um gráfico relacionando a profundidade de indentação medida e a fração volumétrica de fibra utilizada como reforço.



**FIG. 4.8 – Gráfico relacionando profundidade de indentação e fração de reforço.**

A TAB. 4.5 exibe o resultado da análise de variância (Anova) para os dados referentes à TAB. 4.5. São apresentados os parâmetros de análise tais como graus de liberdade (GL), soma dos quadrados (SQ), quadrado médio (QM), além dos valores de F e Fc, calculado e crítico, respectivamente. É importante destacar que antes de ser realizado o Anova foi feito a análise de Shapiro-Wilk e verificou-se que os dados seguem uma distribuição normal (VIEIRA, 1999).

**TAB. 4.5 – Análise de Variância dos resultados obtidos após o teste de P-BFS.**

	Anova				
	GL	SQ	QM	F	Fc
<b>Tratamento</b>	4	1870,17	467,54	101,46	2,69
<b>Resíduo</b>	30	138,24	4,61		
<b>Total</b>	34	2008,42			

Comparando os valores de F (calculado) com o Fc que é tabulado ( $F=2,69$ ), percebe-se que  $F > F_c$ . Então a hipótese que os valores médios são iguais pode ser rejeitada com 95% de confiança, ou seja, está estatisticamente mostrado que o material utilizado como alvo, de fato, influencia a profundidade de indentação do teste de P-BFS. O teste de diferença mínima significativa foi aplicado para comparar dois a dois os resultados médios de profundidade de

indentação. O valor de  $q$  para 5 tratamentos e 30 graus de liberdade do resíduo é de 4,10. Assim, a  $d.m.s.$  foi calculada como 3,33 mm. A TAB. 4.6 mostra a comparação entre os valores médios utilizando o teste  $d.m.s.$  Estão destacadas as diferenças entre valores médios maiores que os  $d.m.s.$

TAB. 4.6 – Teste de Tukey para a profundidade de indentação medida.

Material	ERP V10	ERP V20	ERP V30	ERP V40	ERP V50
ERP V10	0	1,5	1,5	1	2,7
ERP V20	1,5	0	3	0,5	1,2
ERP V30	1,5	3	0	2,5	<b>4,2</b>
ERP V40	1	0,5	2,5	0	1,7
ERP V50	2,7	1,2	<b>4,2</b>	1,7	0

Ou seja, a condição ERP V50 pode ser considerada estatisticamente diferente da condição ERP V30. Sendo a primeira considerada a melhor condição e a segunda a pior.

#### 4.3.3 ENSAIO BALÍSTICO DE VELOCIDADE RESIDUAL

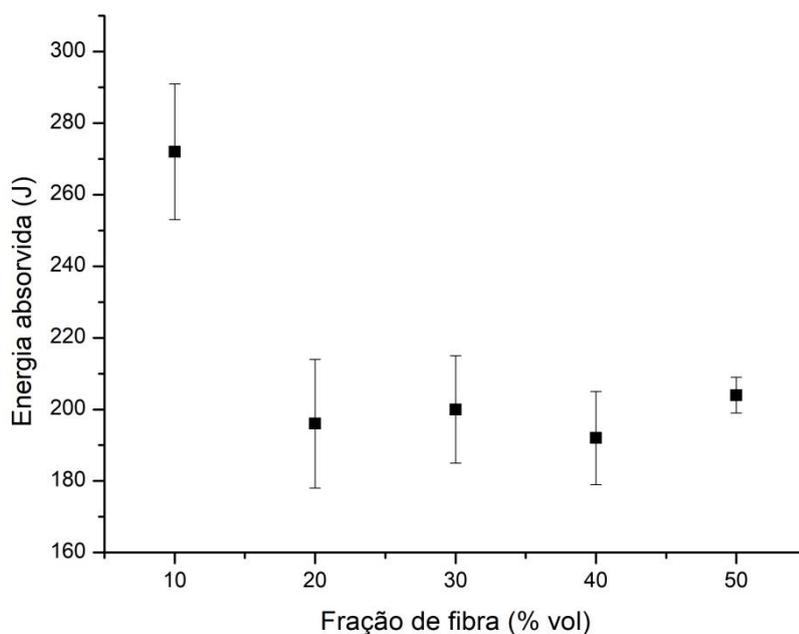
Nesta análise, a dissipação de energia individual dos compósitos de piaçava é medida para verificar a contribuição na absorção de energia em um SBM. Tal análise foi conduzida usando o valor de energia cinética absorvida pelo alvo conforme as equações 2.1. A razão para os testes balísticos independentes é determinar como cada material investigado se comportaria sem a frente cerâmica, permitindo assim, uma compreensão mais completa os mecanismos de dissipação de energia envolvidos.

A TAB. 4.7 mostra a energia absorvida pelos alvos de diferentes condições.

TAB. 4.7 – Energia absorvia após o ensaio de velocidade residual.

Condição	Energia Absorvida (J)
ERP V10	272 ± 19
ERP V20	196 ± 18
ERP V30	200 ± 15
ERP V40	192 ± 13
ERP V50	204 ± 5

Novamente, a representação gráfica desses resultados é apresentada na FIG. 4.9.



**FIG. 4.9 - Gráfico relacionando energia absorvida e fração de reforço.**

Analisando apenas os resultados de média e desvio padrão da energia absorvida pelo alvo, pode-se observar a influência da variação da fração volumétrica de fibra na absorção de energia. No entanto, para que se obtenha um resultado fidedigno é necessário que uma análise estatística seja aplicada. A TAB. 4.8 apresenta o resultado da análise de variância (Anova) desses dados.

**TAB. 4.8 – Análise da variância para os resultados de velocidade residual.**

<b>Anova</b>					
	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>	<b>Fc</b>
<b>Tratamento</b>	4	17731	4432,7	19,8	3,06
<b>Resíduo</b>	15	3357	223,8		
<b>Total</b>	19	21088			

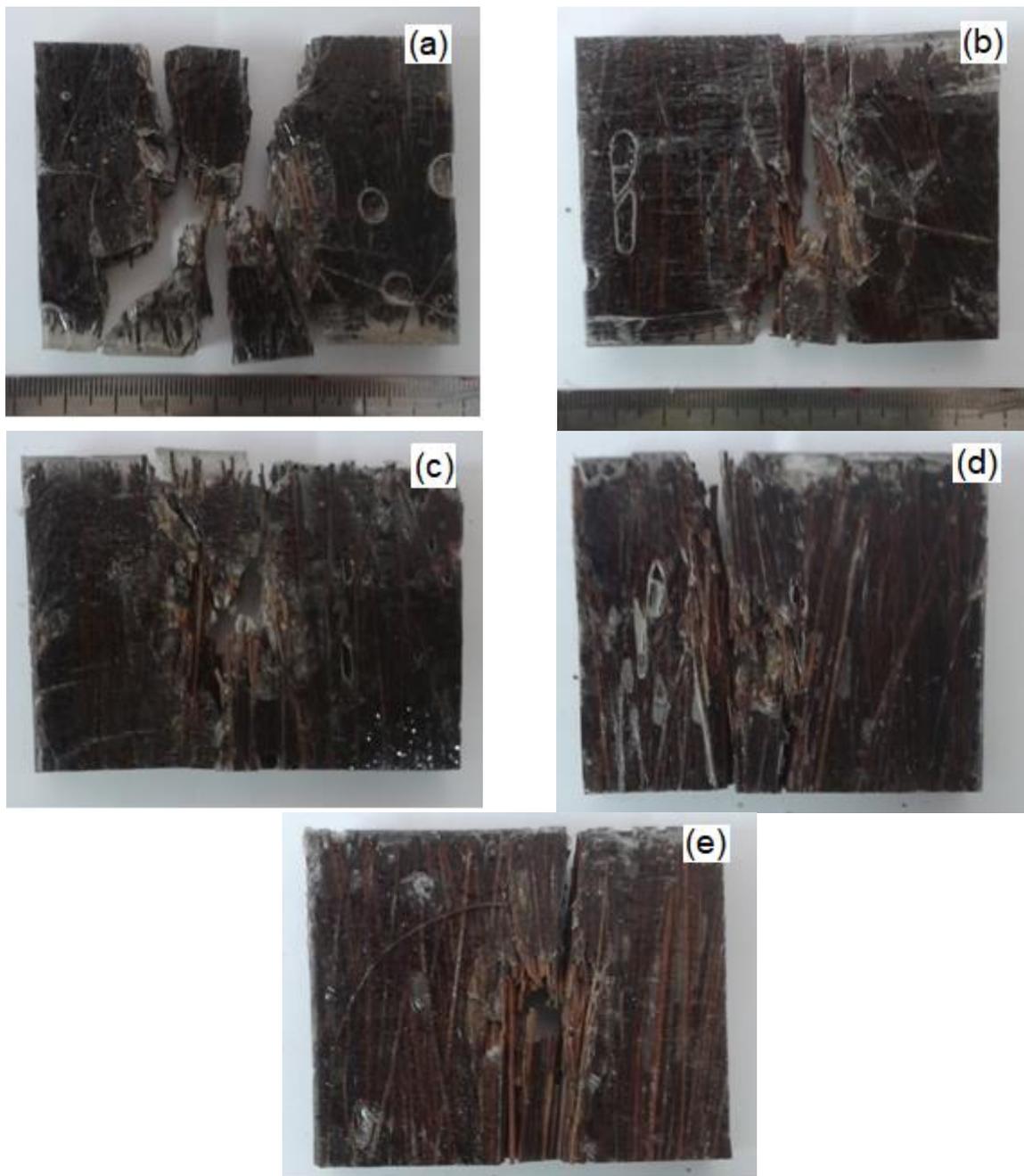
Novamente, comparando o valor de F calculado com o valor TAB.do ( $F_c=3,06$ ), a hipótese de que os valores médios são os mesmos pode ser rejeitada com 95% de confiança, uma vez que  $F > F_c$ . Ou seja, foi estatisticamente provado que o material do alvo, de fato, influenciou a energia absorvida do projétil. Após a ANOVA, é possível comparar os valores médios energia absorvida usando o teste de Tukey. O valor de q para 5 tratamentos e 15 graus de liberdade do resíduo é de 4,37. Assim, a *d.m.s.* foi calculada como 32,7 J. A TAB. 4.9 mostra a comparação entre os valores médios utilizando o teste *d.m.s.* Estão destacadas as diferenças entre valores médios maiores que os *d.m.s.*

**TAB. 4.9 – Teste de Tukey para absorção de energia após o ensaio de velocidade residual.**

<b>Material</b>	<b>ERP V10</b>	<b>ERP V20</b>	<b>ERP V30</b>	<b>ERP V40</b>	<b>ERP V50</b>
<b>ERP V10</b>	0	76	72	80	68
<b>ERP V20</b>	76	0	4	4	8
<b>ERP V30</b>	72	4	0	8	4
<b>ERP V40</b>	80	4	8	0	12
<b>ERP V50</b>	68	8	4	12	0

Analisando os resultados obtidos, pode-se verificar que a condição ERP V10 foi o que apresentou a maior absorção de energia. Tal comportamento pode estar diretamente relacionado à característica frágil da matriz de epóxi, que tende a dissipar energia pela criação de superfícies de fratura, ou seja, o reforço da fibra não foi feito em uma quantidade efetiva. Por outro lado, o teste *d.m.s.* confirmou que os compósitos ERP V20, ERP V30, ERP V40 e ERP V50 acabaram por apresentarem o valor absoluto de absorção de energia inferior àquele exibido para a condição ERP V10. Isto pode ser associado à mudança dos mecanismos de fratura, a partir de um material com características mais frágeis, sem um reforço efetivo, transformando-se mais resistente com o aumento da porcentagem de fibras empregadas no reforço.

As FIG.s 4.10 (a) até (e) apresentam o aspecto geral das amostras após os ensaios balísticos de velocidade residual.



**FIG. 4.10 – Aspecto geral dos compósitos após o ensaio de velocidade residual: (a) ERPV10, (b) ERPV20, (c) ERPV30, (d) ERPV40 e (e) ERPV50.**

A condição ERPV10, FIG. 4.10 (a), foi praticamente toda fragmentada. Apesar de sua maior energia absorção, a fragmentação é um problema prático quando o material está sujeito a múltiplos impactos. Comparado os resultados obtidos para os compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de piaçava com a quantidade de energia absorvida pelo laminado de Kevlar™, que é um material usualmente empregado para blindagem balística,  $220 \pm 17$  J (BRAGA, 2017). É possível notar que os valores são estatisticamente os mesmos para os encontrados para as condições ERPV20, ERPV30, ERPV40 e ERPV50.

Considerando o aspecto final da placa compósita, ou seja, a integridade dos compósitos, a condição que mais se destaca entre as investigadas é a ERPV50. Embora tal condição tenha absorvido menos energia que ERPV10. Em comparação com as outras condições ERPV20, ERPV30 e ERPV40, a quantidade de energia absorvida não foi significativamente maior, e todos os casos não houve a total fragmentação do compósito. No entanto, quanto maior a quantidade de fibras de piaçava, mais barato se torna o compósito, conforme será discutido mais a frente.

#### 4.3.4 ESTIMATIVA DA VELOCIDADE LIMITE

Conforme discutido na seção 2.1.1 a velocidade limite ( $V_L$ ) é considerado um importante parâmetro para avaliação de materiais utilizados como blindagem. Com base nos resultados apresentados na seção 4.3.3 e da EQ. 2.2, foi possível estimar os valores para os materiais investigados nesta dissertação. A TAB. 4.10 resume os resultados obtidos, bem como apresenta os valores de velocidade limite para compósitos reforçados com FNLs e para o laminado de Kevlar<sup>TM</sup>.

É possível observar que os valores obtidos na presente dissertação são da mesma ordem de grandeza de todos os compósitos reforçados com FNLs. Esse resultado complementa o resultado obtido na seção anterior e confirma que a segunda camada do SBM não é responsável por absorver a maior parte da energia do impacto balístico, uma vez que, quando usado como blindagem individual percentual de energia absorvida varia entre 1,5 a 3% da energia inicial.

**TAB. 4.10 – Velocidade limite das condições estudadas e de outros compósitos reforçados com FNLs encontrados na literatura.**

<b>Condição</b>	<b>V<sub>L</sub> (m/s)</b>	<b>E<sub>abs</sub> (J)</b>	<b>Referência</b>
ERP10	236 ± 8	2,71	*PD
ERP20	200 ± 9	1,94	*PD
ERP30	202 ± 7	1,98	*PD
ERP40	198 ± 6	1,90	*PD
ERP50	204 ± 2	2,01	*PD
Compósito Epóxi-Tecido Malva (vol. de fibra de 30%)	231 ± 18	2,59	NASCIMENTO, 2017
Compósito Epóxi-Fibra Malva (vol. de fibra de 30%)	229 ± 10	2,54	NASCIMENTO, 2017
Compósito Poliéster-Tecido Juta (vol. de fibra de 30%)	200 ± 24	1,94	DE ASSIS, 2016
Compósito Poliéster-Fibra Sisal (vol. de fibra de 30%)	169 ± 9	1,39	BOLZAN, 2016
Compósito Epóxi-Fibra Sisal (vol. de fibra de 30%)	188	1,71	DE ARAÚJO, 2015
Compósito Epóxi-Fibra Bambu (vol. de fibra de 30%)	198	1,90	CRUZ, 2015
Compósito Poliéster-Fibra Curauá (vol. de fibra de 30%)	207 ± 21	2,08	BRAGA, 2015
Laminado de Kevlar <sup>TM</sup>	212 ± 23	2,18	BRAGA, 2015
Compósito Epóxi-Tecido Juta (vol. de fibra de 30%)	176	1,5	LUZ, 2014

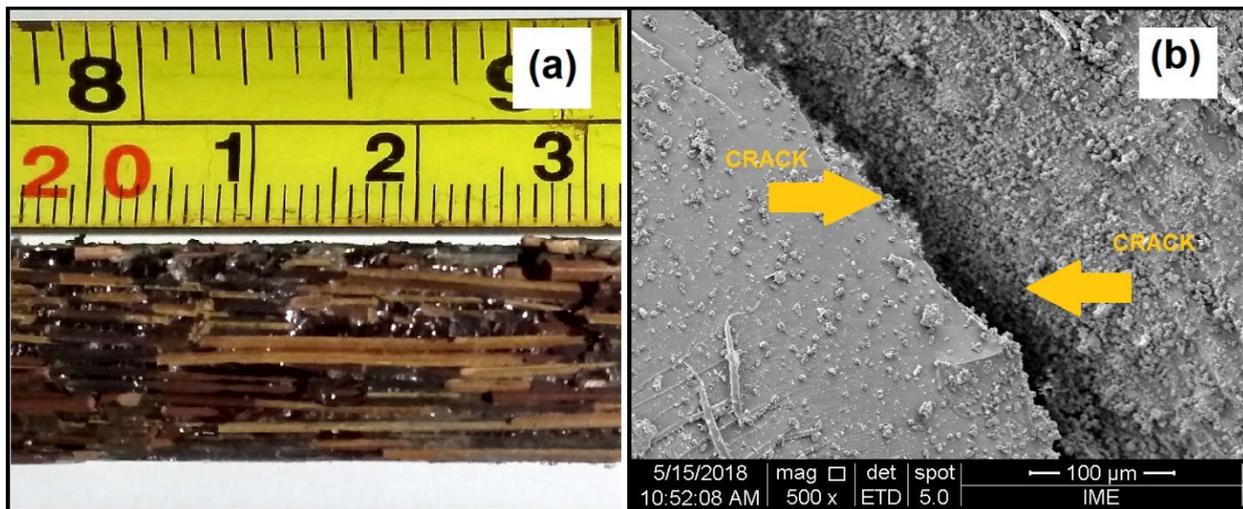
\*PD – Presente Dissertação

#### 4.3.5 ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA

Conforme discutido anteriormente, na seção 2.3.2, diversos mecanismos de falha são relatados para materiais compósitos reforçados com fibras. Efeitos de “*Pull-Out*”, “*Fiber Bridging*”, descolamento fibra/matriz, falha de matriz, ruptura de fibras e delaminação são alguns dos mecanismos apresentados para descrever a falha desses materiais.

Ao se realizar a análise macroscópica após os ensaios balísticos, FIG. 4.7 e FIG. 4.10, é possível verificar que o modo de falha se modifica com o aumento da fração volumétrica de reforço. Para as condições com menor quantidade de fibras de piaçava, observa-se o mecanismo de fratura frágil da matriz como o principal mecanismo atuante. O reforço das fibras não é efetivo ao ponto de representar uma maior resistência. Por outro lado, com o aumento da porcentagem volumétrica de fibras reforçando o compósito além de apresentar

uma relação inversamente proporcional entre a quantidade de fibra e número de fraturas, nota-se uma restrição do tipo de falha apresentado. Este fenômeno de descolamento interfacial entre fibra e matriz passa a ser governante como mecanismo principal de falha para os compósitos reforçados com maiores percentuais de fibras de piaçava, embora ainda existam mecanismos minoritários em particular a ruptura de fibras. As FIG.s 4.11 (a) e (b) apresentam esses tipos de falha.

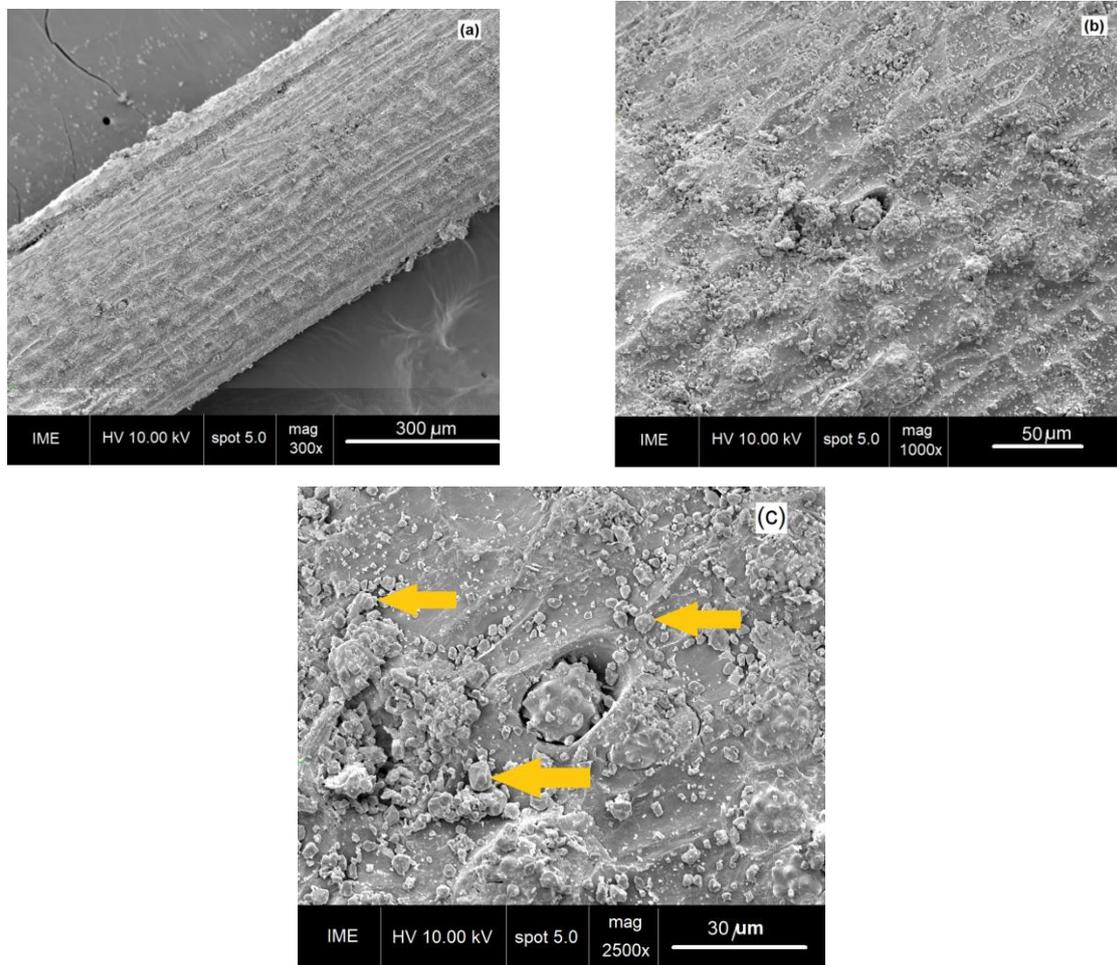


**FIG. 4.11 – Aspecto de falha de separação fibra/matriz; (a) macroscópico e (b) microscópico.**

A FIG. 4.11(a) apresenta a imagem macroscópica da condição ERPV50 após o ensaio balístico. É possível notar a fratura de diversas fibras de piaçava, bem como superfícies livres após a separação interfacial entre fibra e matriz. Por outro lado, a FIG. 4.11 (b) apresenta uma micrografia de MEV dessa mesma condição evidenciando o descolamento interfacial entre fibra e matriz. Nesta imagem, destaca-se a matriz de epóxi (à esquerda) com características frágeis, evidenciado pela presença de padrões tipo “marcas de rio” e “marcas de praia” (NASCIMENTO, 2017). Nesta mesma imagem tem-se a fibra de piaçava (à direita) e está destacada com setas a trinca que promove a separação interfacial entre fibra e matriz. Essa observação corrobora com os resultados discutidos na seção 4.1.5, que destaca a diferença de natureza entre a fibra de piaçava, hidrofílica, e a matriz de epóxi, hidrofóbica. Outra informação que pode ser obtida da FIG. 4.10 (b), diz respeito ao mecanismo de captura de fragmentos oriundos do impacto balístico. Comparando a superfície da matriz e da fibra, é possível notar que poucas partículas estão presas na superfície da matriz, enquanto que a superfície da fibra encontra-se completamente encrustada com essas partículas. Tal mecanismo será discutido na próxima seção.

#### 4.3.6 MECANISMO DE CAPTURA DE FRAGMENTOS

As FIG.s 4.12 (a) – (c) apresentam micrografias com diferentes magnificações de uma única fibra de piaçava retirada do compósito, da área atingida no impacto balístico.



**FIG. 4.12 – Absorção da nuvem de fragmentos pela fibra de piaçava: (a) 300x, (b) 1000x e (c) 2500x.**

O material cerâmico que é completamente fragmentado após o impacto balístico gera uma nuvem de fragmentos que foi efetivamente coletado pelas fibras de piaçava por incrustação mecânica associada a forças de Van der Waals e atração eletrostática. Tal mecanismo de captura pode ser observado nas FIG. 4.12 (a) – (c). Na FIG. 4.12 (a) é possível notar uma grande quantidade de fragmentos depositados na superfície da fibra. Na FIG. 4.11 (b), maior magnificação da FIG. 4.12 (a), é possível verificar em detalhes como a fibra de piaçava foi capaz de efetivamente coletar a nuvem de fragmentos gerados no impacto balístico. Já na FIG. 4.12 (c), em uma magnificação ainda maior, é possível observar as

protrusões características da fibra de piaçava, conforme apresentado na seção 4.1.1, assim como uma grande quantidade de partículas cerâmicas. O mecanismo absorção desses fragmentos é, de fato, o mesmo verificado por Monteiro et al (2015) para as fibras de Kevlar<sup>TM</sup> bem com por outros pesquisadores para compósitos reforçados com FNLs, como por exemplo, juta (ASSIS et al, 2018; LUZ et al, 2015), curauá (BRAGA et al, 2017) e rami (MONTEIRO et al, 2016).

Ainda foi realizado o ensaio de EDS para verificar se, de fato, tratava-se de fragmentos de cerâmico na superfície da fibra de piaçava. Os pontos investigados foram destacados na FIG. 4.12 (c) e o resultado está apresentado na TAB. 4.11.

**TAB. 4.11 - Composição química dos fragmentos depositados na superfície da fibra de piaçava analisado por EDS.**

Elemento	Composição (%)		
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Al	47,68	52,66	52,38
Nb	2,32	2,84	2,75
O	31,19	21,78	18,76
Pt	18,81	22,71	26,11

Esses resultados confirmam a captura de fragmentos cerâmicos associados com o impacto balístico, uma vez que, foram identificados alumínio, nióbio e oxigênio que são os elementos principais na composição do material cerâmico usado como primeira camada no SBMs.

#### 4.3.7 IMPEDÂNCIA DE CHOQUE

A impedância de choque dos materiais investigados foi calculada conforme o modelo apresentado na seção 2.4, chamado de casamento de impedâncias. Foram realizados os cálculos de impedância de choque, velocidades de partícula e pressões de interface dos SBMs utilizados na presente dissertação. A TAB. 4.12 apresenta os parâmetros característicos dos materiais utilizados nesses cálculos.

**TAB. 4.12 – Parâmetros empregados para o cálculo de impedância de choque.**

<b>Material</b>	$\rho_0(\text{g/cm}^3)$	<b>C (km/s)</b>	<b>S</b>	<b>Referência</b>
Chumbo	11.300	2.066	1.517	MEYER, 1994
Alumina	3.890	7.455	1.299	MEYER, 1994
Alumínio	2.700	5.328	1.338	KLEISER et al, 2011

Os parâmetros para os compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de piaçava não foram encontrados na literatura. Desta forma, a velocidade da onda de choque ( $U_s$ ) foi aproximada pela velocidade da onda elástica ( $C_0$ ) que depende unicamente do módulo de elasticidade e densidade do compósito, conforme apresentado na EQ. 2.7. Para a densidade do compósito foi considerado os valores medidos apresentados na TAB. 4.4. O módulo de elasticidade do compósito foi calculado através da regra das misturas direta, apresentado na equação 4.1.

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

Onde,  $E_c$ ,  $E_m$  e  $E_f$  são os módulos de elasticidade do compósito, da matriz e da fibra, respectivamente; enquanto  $V_m$  e  $V_f$  são as frações volumétricas de matriz e fibras. É importante ressaltar que foram considerados valores máximos e mínimos para o módulo de elasticidade da fibra de piaçava. Os valores para os compósitos estudados estão apresentados na TAB. 4.13.

A TAB. 4.14 apresenta os resultados referentes à velocidade de partícula ( $U_p$ ), pressões de interfaces ( $P$ ), velocidades das ondas de choque ( $U_s$ ), impedância de choque ( $Z = \rho_0 U_s$ ) e a natureza das ondas de choque. Apesar de em cada ensaio balístico uma velocidade diferente ser verificada, uma vez que a velocidade do projétil varia em uma determinada faixa, foi considerado um único valor de 847 m/s que é a velocidade de referência da norma internacional NIJ 0101.04 (2000).

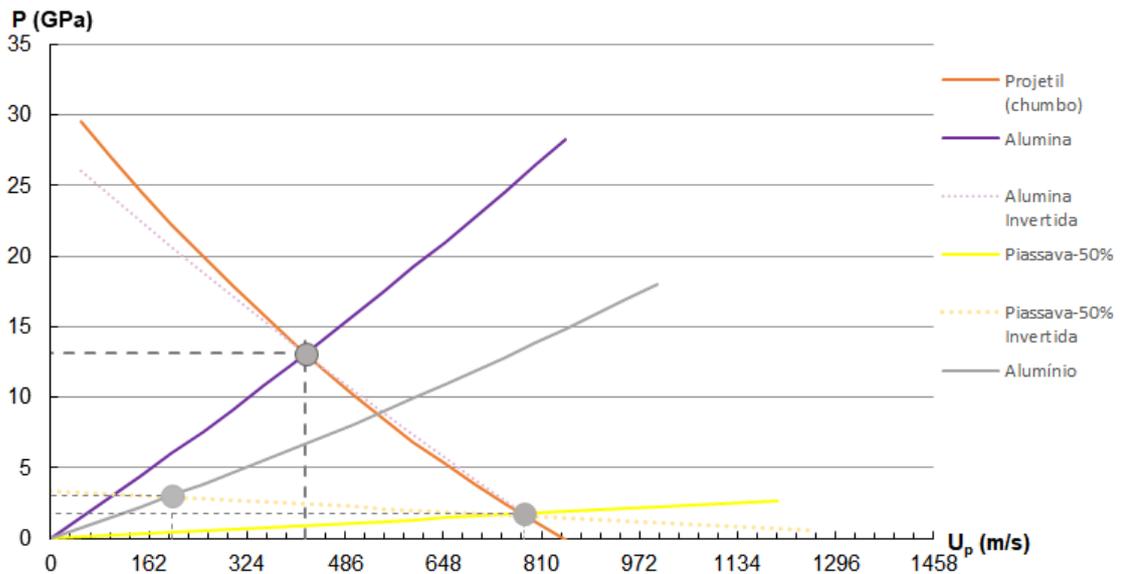
**TAB. 4.13 – Densidade, módulo de elasticidade e velocidade da onda elástica para os compósitos estudados.**

<b>Material</b>	$\rho_0(\text{g/cm}^3)$	$E_{\min}$ (GPa)	$E_{\max}$ (GPa)	$C_{0\min}$ (km/s)	$C_{0\max}$ (km/s)
ERP10	1.09	2.719	2.799	1.579	1.602
ERP20	1.07	3.028	3.188	1.682	1.726
ERP30	1.08	3.337	3.577	1.757	1.819
ERP40	1.10	3.646	3.966	1.820	1.898
ERP50	1.12	3.955	4.355	1.879	1.971

**TAB. 4.14 – Resultados dos cálculos do modelo de casamento de impedâncias.**

	Interface		U <sub>p</sub> (km/s)	P (GPa)	U <sub>s</sub> (km/s)	Z (10 <sup>6</sup> kg/m <sup>2</sup> .s)	Natureza da onda de choque
1	Pb/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,4203	13,08	8,001	31,123	Compressiva
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ERPV10	Mín	0,7922	1,41	1,579	1,721	Trativa
		Máx	0,7916	1,43	1,602	1,746	Trativa
3	ERPV10/Al	Mín	0,1633	2,45	5,546	14,974	Compressiva
		Máx	0,1653	2,48	5,549	14,982	Compressiva
4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ERPV20	Mín	0,7902	1,47	1,682	1,799	Trativa
		Máx	0,7891	1,51	1,726	1,846	Trativa
5	ERPV20/Al	Mín	0,1693	2,54	5,554	14,995	Compressiva
		Máx	0,1729	2,60	5,559	15,009	Compressiva
6	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ERPV30	Mín	0,7878	1,55	1,757	1,897	Trativa
		Máx	0,7861	1,60	1,819	1,964	Trativa
7	ERPV30/Al	Mín	0,1767	2,66	5,564	15,022	Compressiva
		Máx	0,1817	2,73	5,571	15,041	Compressiva
8	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ERPV40	Mín	0,7852	1,62	1,820	2,002	Trativa
		Máx	0,7831	1,69	1,898	2,087	Trativa
9	ERPV40/Al	Mín	0,1844	2,78	5,574	15,049	Compressiva
		Máx	0,1905	2,87	5,582	15,071	Compressiva
10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ERPV50	Mín	0,7826	1,70	1,879	2,104	Trativa
		Máx	0,7801	1,77	1,971	2,207	Trativa
11	ERPV50/Al	Mín	0,1917	2,89	5,584	15,076	Compressiva
		Máx	0,1990	3,01	5,594	15,103	Compressiva

A FIG. 4.13 ilustra um esquema gráfico de casamento de impedâncias aplicado na análise de interação entre as ondas de choque em cada interface dos sistemas de blindagem multicamadas estudadas.



**FIG. 4.13 – Ilustração gráfica do método de casamento de impedâncias.**

A interação entre as ondas de choque das camadas que compõe o SBMs é de grande importância no comportamento desses materiais. Quando uma onda compressiva atinge uma interface, parte dela é transmitida e parte é refletida. Considerando que o material da segunda camada tem impedância de choque menor do que o da primeira camada, como é o caso da interface  $Al_2O_3$ /Compósito calculado na TAB. 4.14, a parte que retorna é uma onda trativa e desta forma provoca a completa fragmentação do material cerâmico (MEYERS, 1994), como foi observado em todos os ensaios balísticos. Desta forma, quanto menor for a impedância de choque da segunda camada maior será a absorção de energia do cerâmico, uma vez que ele tenderá a se fragmentar em pedaços cada vez menores. No caso estudado, esta condição seria para o compósito ERPV10 apesar de valores próximos terem sido encontrados para as outras condições. Esses menores valores de impedância de choque exibidos pelo ERPV10 não se traduziram nos resultados apresentados na seção 4.3.2. Meyers (1994) afirma que considerando um ensaio balístico em que diversos fenômenos dinâmicos complexos estão envolvidos, a diferença entre a impedância de choque dos materiais de segunda camada poderia ser considerada insignificante. Sendo assim, a medida da profundidade de indentação não deveria apresentar grandes diferenças, e de fato não apresentou grandes variações conforme exibido na seção 4.3.2.

#### 4.4 ANÁLISE DE CUSTO E PESO

Uma das principais vantagens de utilização de FNLs como reforço de materiais compósitos diz respeito ao custo associado à fabricação desses materiais que em muitos casos podem ser, inclusive, considerados como rejeitos das suas respectivas indústrias (CANDIDO, 2014). Mesmo aquelas fibras que não sejam consideradas rejeitos, em geral, têm custos de produção muito baixos que vão impactar diretamente no custo de produção dos materiais compósitos. Ao serem comparados com materiais usualmente empregados para aplicações balísticas, como Kevlar<sup>TM</sup>, a utilização de materiais compósitos reforçados com FNLs é economicamente favorável como será mostrado a seguir.

A estimativa do custo de cada componente foi feita com base em dados disponíveis na literatura (NASCIMENTO, 2017; DE ASSIS, 2016; BOLZAN, 2016; LUZ, 2014), bem como através de fornecedores. O custo da fibra de piaçava foi verificado diretamente no site do

IBEGE (2018). Foi considerado que o SBMs possui área de 180 cm<sup>2</sup>, o que representa dimensões de 12x15 cm<sup>2</sup>. Quanto a espessura, o compósito, cerâmico e laminado de Kevlar<sup>TM</sup> tem espessura de 10 mm, enquanto que a placa de alumínio tem espessura de 5 mm. A TAB. 4.15 resume os dados referentes aos custos dos componentes que integram os sistemas de blindagem.

**TAB. 4.15 – Custos e peso dos componentes do SBMs.**

<b>Componente</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso (kgf)</b>	<b>Custo unitário (US\$/kg)</b>	<b>Custo total (US\$)</b>
Cerâmico Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	180	3,43	0,619	33,00	20,43
Laminado de Kevlar <sup>TM</sup>	180	1,44	0,259	63,60	16,49
Compósito 50%Epóxi-50%Piaçava	180	1,12	0,201	1,64	0,33
Compósito 60%Epóxi-40%Piaçava	180	1,10	0,198	1,89	0,37
Compósito 70%Epóxi-30%Piaçava	180	1,08	0,194	2,10	0,41
Compósito 80%Epóxi-20%Piaçava	180	1,07	0,192	2,33	0,45
Compósito 90%Epóxi-10%Piaçava	180	1,09	0,196	2,57	0,50
Liga de Alumínio 5052 H34	90	2,68	0,241	9,73	2,34

Custo epóxi US\$ 2,8/kg ; Custo piaçava US\$0,47/kg

Com base na TAB. 4.15, fica clara a grande diferença de custo dos materiais para produção de uma placa de material compósito, da ordem de centavos de dólar, enquanto que para se fabricar uma placa de laminado de Kevlar<sup>TM</sup> o custo seria duas ordens de grandeza maior. Outra informação relevante que pode ser analisada, diz respeito a relação inversa entre quantidade de fibras de piaçava utilizada como reforço e custo total do componente. O custo extremamente baixo das fibras de piaçava faz com que seja economicamente favorável a utilização de compósitos com maiores frações volumétrica de reforço na sua composição. A TAB. 4.16 apresenta um comparativo entre os custos totais de um SBM utilizando o compósito ERPV50 e o laminado de Kevlar<sup>TM</sup> como camada intermediária.

**TAB. 4.16 – Comparativo entre custos totais de um SBM usando Kevlar<sup>TM</sup> e usando compósitos reforçados com fibras de piaçava.**

<b>Camada intermediária</b>	<b>Peso total (kgf)</b>	<b>Redução de peso (%)</b>	<b>Custo total (US\$)</b>	<b>Redução de custo (%)</b>
Kevlar <sup>TM</sup>	1,119		39,26	
ERPV50	1,061	5,18	23,10	41,16

Nota-se que apesar da redução de peso associada à utilização do compósito de epóxi reforçado com fibras de piaçava como segunda camada não ser muito efetiva, apenas 5,18% em comparação com o laminado de Kevlar<sup>TM</sup>. A redução do custo total é muito grande, acima

de 40%. Tal resultado, como citado anteriormente, ilustra uma das principais vantagens da utilização de compósitos reforçados com FNLs ao invés de materiais usuais como o Kevlar<sup>TM</sup>.

#### 4.5 NOVAS CONDIÇÕES INVESTIGADAS

Todos os resultados e discussões apresentadas até aqui, justificam a utilização de compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de piaçava como camada intermediária em um SBM. Questões como custo e peso bem como eficiência balística e captura de fragmentos, foram mostrados ser melhores ou iguais aos exibidos por materiais usuais, como o Kevlar<sup>TM</sup>. No entanto, os compósitos estudados não foram capazes de manter sua integridade estrutural após um único disparo. Tal característica é essencial para materiais que são empregados como segunda camada em SBM (BRAGA et al, 2017). Para um colete ser aprovado pela norma internacional NIJ (2000), ele deverá ser capaz de se manter íntegro após múltiplos disparos.

Analisando, novamente, as imagens macroscópicas do aspecto geral dos compósitos após o ensaio balístico, FIG. 4.7 e FIG. 4.10, é possível notar um padrão de fratura. De modo que, para as condições com maiores frações volumétricas de fibras de piaçava como reforço, as fraturas tendem a seguir a direção da fibra, conforme discutido na seção 4.3.5. Como a configuração do reforço adotado nesse trabalho é de fibras longas e alinhadas em uma única direção, mostrado na TAB. 4.2, apenas uma direção possui reforço efetivo e, desta forma, a fratura tenderá acontecer nesta direção. Mais ainda, materiais que são reconhecidamente eficientes para aplicações balísticas têm arranjos que favorecem diferentes direções de carregamento. As FIG.s 4.14, 4.15 e 4.16 apresentam alguns materiais empregados como blindagem balística e suas diferentes configurações.

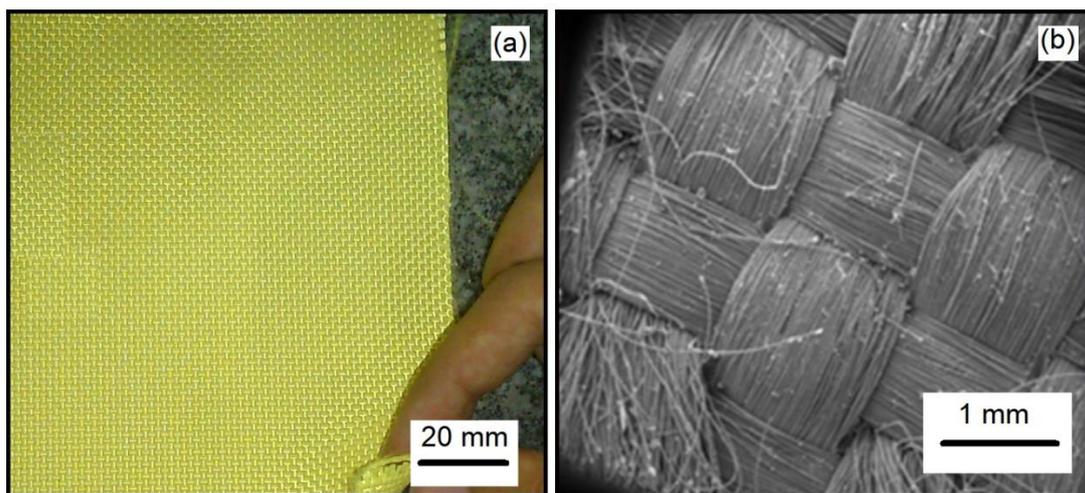


FIG. 4.14 – Configuração do Kevlar<sup>TM</sup>: (a) macroscópico e (b) microscópico (MONTEIRO et al, 2016 b).

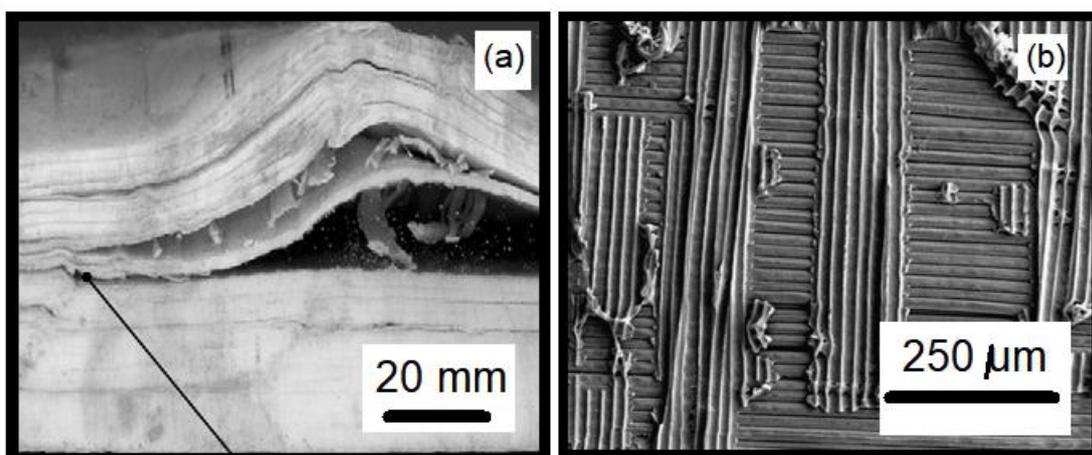


FIG. 4.15 - Configuração do Dyneema®: (a) macroscópico e (b) microscópico (GREENHALGH et al, 2013).

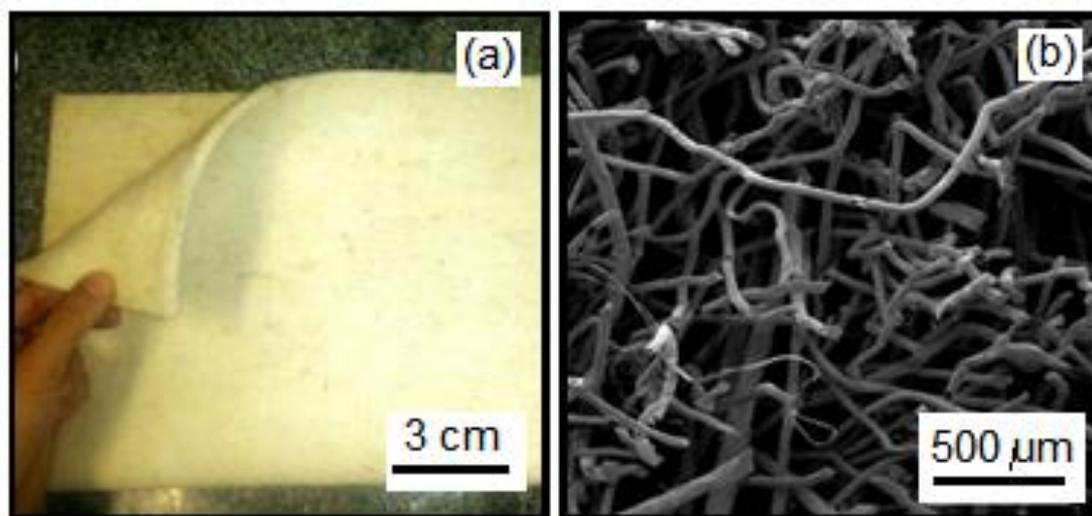


FIG. 4.16 - Configuração da manta de curauá: (a) macroscópico e (b) microscópico (BRAGA, 2018).

A FIG. 4.14 (a) apresenta o aspecto macroscópico do tecido de Kevlar<sup>TM</sup>, estudado por Monteiro et al (2016 b), destacando o tipo de arranjo simples desse tecido. Na FIG. 4.14 (b) é possível notar que a dimensão das fibras de aramida é muito pequena, além de se observar em detalhes a trama desse tecido. As FIG. 4.15 (a) e (b) destacam o aspecto de um laminado de Dyneema® após um ensaio balístico, macro e microscópico respectivamente. Esse material foi objeto de estudo de Greenhalgh et al (2013) e é de grande interesse para aplicações balísticas, sendo inclusive o material utilizado pelo Exército Brasileiro em seus coletes. O interessante dessas imagens é verificar que diversas camadas de Dyneema® são prensadas para formar a blindagem. Na FIG. 4.15 (a) é possível notar falha por delaminação neste material, evidenciando assim as diversas camadas. Por outro lado, na FIG. 4.15 (b), que é uma micrografia desse material após o ensaio balístico, observa-se que o arranjo é feito com cada camada girada em 90° em relação a anterior, de modo que em cada camada as fibras de PEUAPM (extremamente finas) estão alinhadas em uma única direção. Por fim, as FIG.s 4.16 (a) e (b), apresentam a configuração de uma manta de Curauá utilizada por Braga (2018) como reforço para compósitos de matriz polimérica para aplicações balísticas. A FIG. 4.16 (b) mostra que diferentemente do Kevlar<sup>TM</sup> e do Dyneema® o arranjo das fibras não é organizado, mas sim aleatório. Em comum, esse três materiais:

1. Promovem reforço em mais de uma direção e;
2. São relatados como excelentes para aplicações como blindagem balística.

Logo, a abordagem para buscar promover a melhora na integridade apresentada pelos compósitos de epóxi reforçados com fibras de piaçava será tentar mimetizar as configurações exibidas por esses materiais apresentados. As configurações desenvolvidas são apresentadas na TAB. 4.17.

**TAB. 4.17 – Condições de arranjos alternativos estudados.**

<b>Nomenclatura</b>	<b>Material</b>	<b>Arranjo/Configuração</b>	<b>Número de amostras</b>
PCA	Compósito de epóxi reforçado com 30% vol de fibras de piaçava	Fibras curtas aleatoriamente dispersas	2 (P-BFS) 4 (veloc. Residual)
PLA	Compósito de epóxi reforçado com 30% vol de fibras de piaçava	Fibras longas aleatoriamente dispersas	2 (P-BFS) 4 (veloc. Residual)
PLCC	Compósito de epóxi reforçado com 30% vol de fibras de piaçava	Fibras longas e alinhadas, organizadas em três camadas, cada camada girada em 90° em relação a anterior	2 (P-BFS) 4 (veloc. Residual)

A escolha por utilizar a fração volumétrica de fibra de 30% se deu pela questão tecnológica, onde o processamento do compósito com maiores quantidades de fibra exige maiores cuidados, mas também pelo fato dessa fração já promover um reforço efetivo ao compósito. Esses cuidados objetivam evitar o aparecimento de vazios, isto é, regiões onde a resina não foi capaz de penetrar, que serão pontos preferenciais para a nucleação e crescimento de trincas. A respeito das configurações propostas, a fibra de piaçava é rígida e por isso não foi possível produzir um tecido como o Kevlar<sup>TM</sup>. Já o critério para separação das fibras longas ou curtas para as se deu através de resultados do ensaio de “pull-out”, onde abaixo de 15 mm a fibra é considerada curta e acima disso é dita longa (AQUINO et al, 2003). Como comparação, ainda será adicionado os resultados encontrados para o ERPV30.

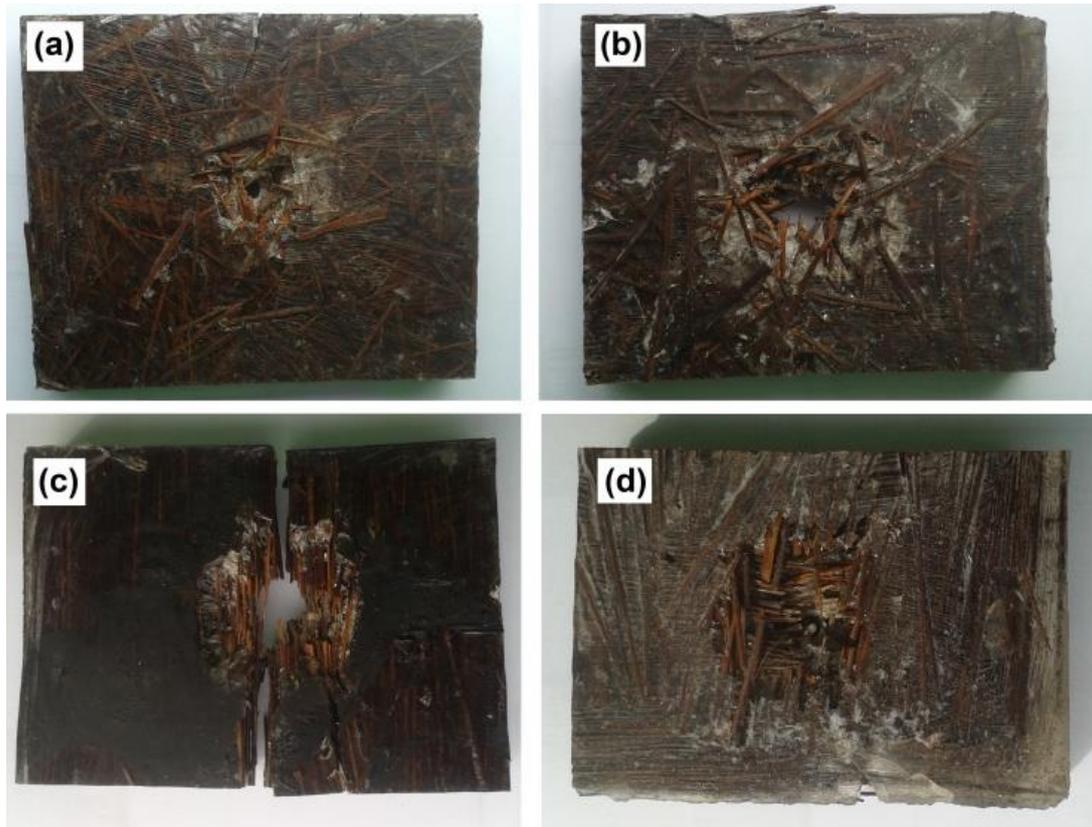
#### 4.5.1 ENSAIO BALÍSTICO DE VELOCIDADE RESIDUAL

A TAB. 4.18 apresenta a quantidade de energia dissipada para cada uma das condições estudadas, bem como a média e o desvio padrão.

**TAB. 4.18 - Energia absorvia após o ensaio de velocidade residual das condições de arranjo alternativo.**

	<b>PCA</b>	<b>PLA</b>	<b>PLCC</b>
<b>Energia Absorvida (J)</b>	174	214	212
	209	209	184
	182	179	194
	225	193	161
<b>Média e Desvio Padrão (J)</b>	198 ± 24	199 ± 16	188 ± 21

Considerando os resultados obtidos pode-se notar que a absorção de energia para as 3 condições testadas considerando o desvio padrão, são estatisticamente iguais. Mais ainda, os valores são estatisticamente iguais ao observado para a condição ERPV30,  $200 \pm 15$  [J]. A FIG. 4.17 (a) – (d) apresenta o aspecto dos corpos de prova após o impacto balístico.

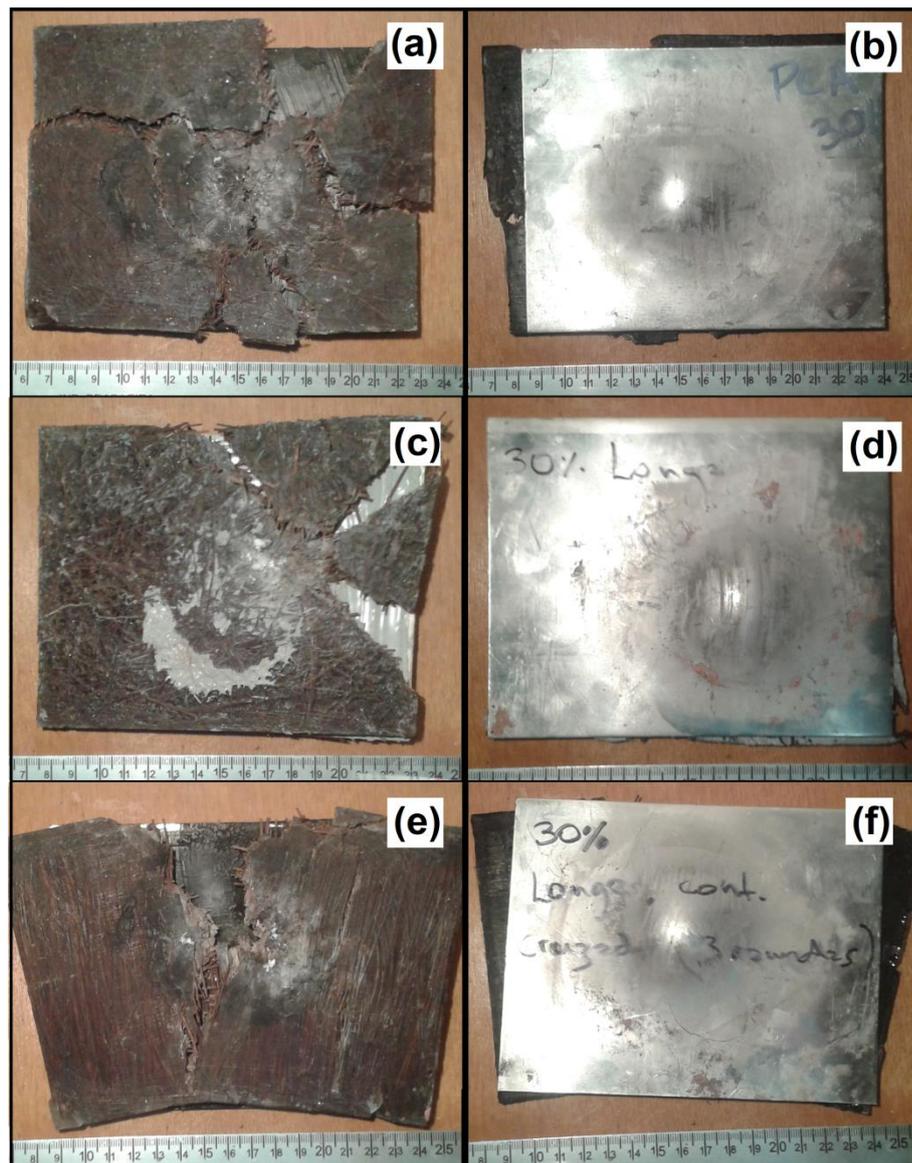


**FIG. 4.17 – Aspecto macroscópico das placas compósitas após o ensaio balístico de velocidade residual: (a) PCA, (b) PLA, (c) ERPV30 e (d) PLCC.**

É possível ver que a condição ERPV30, FIG. 4.17 (c), o compósito apresentou mais fraturas do que as outras condições, essas fraturas tenderam a ocorrer todas no sentido da fibra. Para as outras condições PCA, PLA e PLCC o material manteve sua integridade física, principalmente, pelo fato das fibras promoverem resistência em duas direções no caso PLCC, FIG. 4.17 (d), e em diversas direções no caso das fibras dispostas aleatoriamente PCA e PLA, FIG. 4.17 (a) e (b), respectivamente.

#### 4.5.2 ENSAIO BALÍSTICO DE PROFUNDIDADE DE INDENTAÇÃO

As FIG.s 4.18 (a) – (f) apresentam a face frontal e posterior de cada uma das condições analisadas.



**FIG. 4.18 – Face frontal e posterior, respectivamente, dos compósitos de arranjo alternativo após o ensaio balístico de profundidade de indentação: (a) e (b) PCA, (c) e (d) PLA, (e) e (f) PLCC.**

Como era de se esperar, nenhuma das condições foi perfurada. Por outro lado, a capacidade do compósito se manter íntegro após o impacto balístico, que era esperado com base nos resultados apresentados na seção 4.5.1, não se concretizou. Porém, fica claro uma mudança no modo de fratura em comparação com a condição com fibras alinhadas em uma única direção e contínuas (ERP30). Infelizmente, não foram estudados corpos de prova suficientes para formar uma base estatística e chegar a uma conclusão sobre essas condições. De qualquer forma, a TAB. 4.19 apresenta os resultados de profundidade de indentação para essas condições.

**TAB. 4.19 – Resultados de profundidade de indentação para os compósitos de arranjo alternativo.**

Condição	Profundidade de indentação após os testes de P-BFS (mm)
PCA	26,6 ± 2,9
PLA	19,1 ± 0,4
PLCC	22,8 ± 1,7

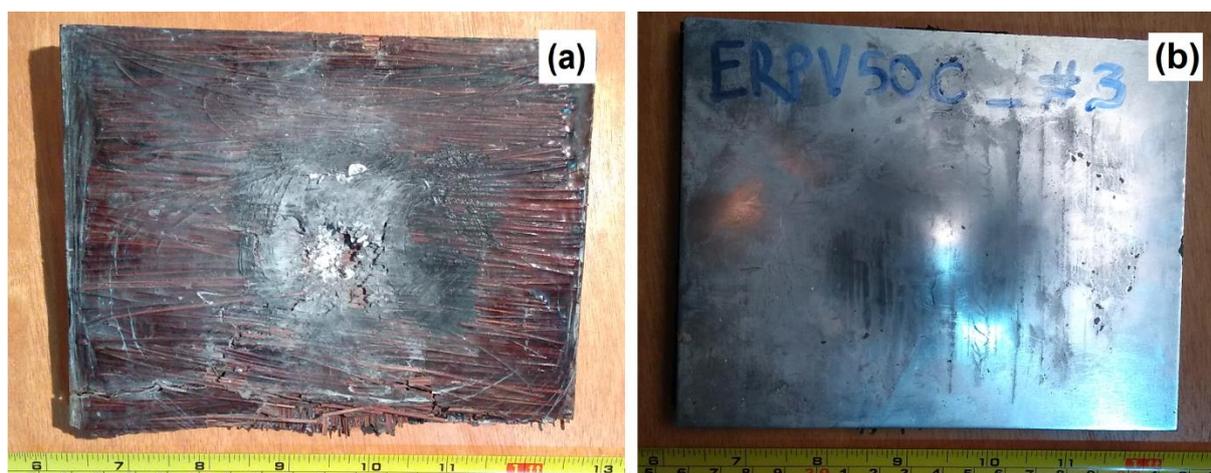
Os resultados encontrados se encontram bem abaixo do limite imposto pela NIJ (2000) para considerar uma blindagem como eficiente, que é de 44 mm. No entanto, esses resultados não podem ser considerados conclusivos e carecem de estudo.

Ainda em busca de se encontrar uma condição que se mantivesse íntegro após o impacto balístico foi preparado mais três corpos de prova para o ensaio de P-BFS com o arranjo apresentado na TAB. 4.20.

**TAB. 4.20 – Configuração do compósito ERPV50C.**

Nomenclatura	Material	Arranjo/Configuração
ERPV50C	Compósito de epóxi reforçado com 50% vol de fibras de piaçava	Fibras longas e alinhadas, organizadas em três camadas, cada camada girada em 90° em relação a anterior

A FIG. 4.19 (a) e (b) apresentam a face frontal e posterior da blindagem após o ensaio balístico.



**FIG. 4.19 - Face frontal e posterior, respectivamente, do compósito ERPV50C após o ensaio balístico de profundidade de indentação**

Finalmente, nesta condição foi observada a capacidade do material se manter íntegro após o ensaio balístico. A grande porcentagem de fibra empregada, 50% vol, foi responsável

por promover um reforço eficiente, enquanto o arranjo em 3 camadas giradas em 90° em relação a anterior foi efetiva em evitar que o mecanismo de falha observado na seção 4.3.5 fosse reinante. A respeito da profundidade de indentação foram medidos valores de  $18,4 \pm 2,4$ . Esses resultados apresentados podem indicar uma tendência a ser investigada em um estudo posterior.

## 5 CONCLUSÕES

Foram estudadas várias características específicas das fibras de piaçava. Além disso, foram analisadas diversas frações volumétricas e arranjos de compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de piaçava para fins balísticos. As principais conclusões são apresentadas a seguir:

- Para todas as condições testadas como camada intermediária na blindagem multicamadas, o teste de P-BFS verificou profundidades de indentação abaixo do limite de 44 mm, que é especificado como máximo pela norma internacional NIJ 0101.04 (2000). E a condição ERPV50 foi a que mais se destacou, apresentando uma impressão na plastilina de  $15,6 \pm 0,8$  mm. Por outro lado, nenhuma das condições inicialmente testadas foi capaz de manter sua integridade após apenas um impacto balístico e tal fato estimulou o estudo de novas configurações.

- No desempenho individual dos compósitos (velocidade residual) foi verificado que a condição ERPV10 foi responsável pela maior absorção de energia do impacto, mas tal fato foi associado à completa fratura desse material o que impossibilita sua aplicação como camada intermediária. Por outro lado, as outras condições testadas (ERPV20, ERPV30, ERPV40 e ERPV50) apresentaram valores próximos de 200 J.

- Para os valores de velocidade limite foram obtidos valores desde 198 até 236 m/s que são valores muito próximos aos relatados para outros compósitos de matriz polimérica reforçados com FNLs.

- Na análise de falha foi observado a grande influência do mecanismo de separação fibra/matriz, provocado pela diferença na natureza desses materiais. Sendo a fibra hidrofílica e a matriz hidrofóbica. Outros mecanismos de falha como fratura de fibras foram considerados minoritários. Uma relação inversamente proporcional entre a quantidade de fibras e número de fraturas foi proposta. Por outro lado, o mecanismo de absorção da nuvem de fragmentos gerados pelo impacto balístico se mostrou ser o mesmo observado para materiais usualmente empregados, como o Kevlar<sup>TM</sup>, bem como outras FNLs usadas em aplicações balísticas.

- O modelo de casamento de impedâncias foi utilizado para a análise de interação entre as ondas de choque das interfaces do SBM. Foi verificado que os compósitos

menores valores de impedância de choque do que a camada cerâmica, esse é um comportamento desejado para materiais utilizados como camada intermediária em SBM, para maximizar a absorção de energia através da fragmentação da camada cerâmica.

- A análise de custo e peso dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de piaçava revelou uma redução de peso de 5,18% e uma redução do custo total acima de 40% quando comparando um SBM tendo a condição ERPV50 e o Kevlar<sup>TM</sup> como segunda camada.

- Diferentes condições (arranjos) do compósito de piaçava foram propostas para tentar contornar o problema de integridade após o impacto balístico. Tais condições buscaram mimetizar arranjos de materiais reconhecidamente eficazes como blindagem balística. Apesar de apresentarem resultados surpreendentemente positivos no ensaio balístico de velocidade residual, o mesmo não ocorreu para o teste de P-BFS, de modo que tais materiais não mantiveram sua integridade. No entanto, uma pequena amostragem foi feita para essas condições de modo que não foi possível se obter um resultado definitivo, carecendo de maiores investigações.

- Por fim, uma condição com grande quantidade de fibras (50% vol) em um arranjo em camadas giradas em 90° em relação a anterior foi capaz de manter sua integridade após o disparo. Mas novamente, uma pequena amostragem foi utilizada não tendo uma base estatística confiável para qualquer conclusão. Embora, tão resultado possa apresentar uma tendência, ainda carece de mais informações.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Continuar a investigação dos arranjos de compósitos propostos e comparar com os encontrados para as fibras longas e alinhadas.
- Verificar em qual fração volumétrica de fibras de piaçava existe a maior eficiência balística para as condições alternativas.
- Verificar a influência nas propriedades dos compósitos considerando a utilização de sistemas à vácuo na manufatura desses materiais.
- Avaliar e comparar o desempenho balístico do compósito polimérico reforçado com fibras de piaçava utilizando outras matrizes como poliéster, polipropileno, policarbonato, entre outros.
- Propor um modelo de medida de energia absorvida pelo bloco de plastilina, com base na deformação plástica do material metálico utilizado como camada posterior.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 15000. Blindagens para impactos balísticos - classificação e critérios de avaliação, 2005.
- ABNT NBR 11936. Determinação do peso específico de plásticos com o uso de picnômetro, 1977.
- ABRABLIN. Disponível em: <<http://www.abrablin.com.br/>>. Acesso em 12 de abril de 2018.
- ABRATE, S. Ballistic Impact on composite structures. 1st ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp. 215-20, 1998.
- ALMOND, E.A., EMBURY, J.D., WRIGHT, E.S. Fracture in laminated materials. Interfaces in composites. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) STP 452, p.107-129, 1969.
- 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 2004; 14(2): 105-111.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, West Conshohocken, PA, 2010.
- ANDERSON, T.L. Fracture mechanics – Fundamentals and Applications. 2nd. ed. New York: CRC Press, 1995.
- AQUINO, R.C.M.P.; MONTEIRO, S.N.; D’ALMEIDA, J.R.M. Evaluation of the critical fiber length of piassava (*Attalea funifera*) fibers using the pullout test. Journal Mater. Sci. Lett. 2003; 22: 1495–7.
- ASM Aerospace Specification Metals Inc. Aluminum 5052 H34. Disponível em: <<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA5052H34>>. Acesso em 12 de abril de 2018.
- ASKELAND, D.R.; PRADEEP, E.; PHULE, P. The science and engineering of materials. s.l. : PWS Pub. Co, 2008.
- ASSIS, F.S.; PEREIRA, A.C.; GARCIA FILHO, F.C.; LIMA Jr, E.P.; MONTEIRO, S.N.; WEBER, R.P. Performance of jute non-woven mat reinforced polyester matrix composite in multilayered armor. Journ. Materials Research Technol. 2018. [Accepted for publication]

- ASSIS, F.S. Comportamento balístico de blindagem multicamadas com compósitos de poliéster reforçados com fibras de juta. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia, 2016.
- BHATNAGAR, A. Lightweight ballistic composites: military and lawenforcement applications. Woodhead Publishing, 2006.
- BLEDZKI, A.K.; GASSAN, J. Composites Reinforced with Cellulose Based Fibres. Progress in Polymer Science 1999; 4: 221-274.
- BOLZAN, L.T. Avaliação do comportamento balístico de um sistema de blindagem multicamada com compósito de poliéster reforçado com fibra e tecido de sisal. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia, 2016.
- BORVIK, T.; LANGSETH, M.; HOPPERSTAD, O.S.; MALO, K.A. Ballistic penetration of steel plates. International Journal of Impact Engineering 1999; 22: 885 – 886.
- BRAGA, F.O. Comportamento Balístico e otimização de desempenho de blindagem multicamada utilizando tecido de curauá. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia, 2018.
- BRAGA, F.O.; BOLZAN, L.T.; RAMOS, F.J.H.T.V.; MONTEIRO, S.N.; LIMA JR, E.P. Ballistic Efficiency of Multilayered Armor Systems with Sisal Fiber Polyester Composites. Materials Research-Ibero-american Journal of Materials 2018; 20: 767-774.
- BRAGA, F.O.; BOLZAN, L.T.; LUZ, F.S.; LOPES, P.H.L.M.; LIMA Jr, E.P.; MONTEIRO, S.N. High energy ballistic and fracture comparison between multilayered armor systems using non-woven curaua fabric composites and aramid laminates. Jour. Mater. Research and Technology 2017; 6: 417-422.
- BRAGA, F.O.; BOLZAN, L.T.; LIMA Jr, E.P.; MONTEIRO, S.N. Performance of natural curauá fiber-reinforced polyester composite under 7.62 mm bullet impact as a stand-alone ballistic armor. Jour. Mater. Res. Technol. 2017; 6(4): 323-328.
- 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.
- BÜRGER, D.; DE FARIA, A.R.; DE ALMEIDA, S.F.; DE MELO, F.C.; DONADON, M.V. Ballistic impact simulation of an armour-piercing projectile on hybrid ceramic/fiber reinforced composite armours. International Journal of Impact Engineering 2012: 63-77.
- CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D.G. Materials Science and Engineering: An Introduction. 8a ed. Danvers: John Wiley & Sons, 2012.
- CARASCHI, J.C.; LEÃO, A.L. Characterization of curaua fiber. Mol Cryst Liq Cryst 2000; 353: 149-152.

- 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* 2003; 61: 161-173.
- D'ALMEIDA, A.L.F.S.; D'ALMEIDA, J.R.M.; BARRETO, D.W.; CALADO, V. Effect of surface treatments on the thermal behavior and tensile strength of piassava (*Attalea funifera*) fibers. *Journal of Applied Polymer Science* 2011; 120: 2508-2515.
- D'ALMEIDA, J.R.M.; AQUINO, R.C.M.P.; MONTEIRO, S.N. Tensile mechanical properties, morphological aspects and chemical characterization of piassava (*Attalea funifera*) fibers. *Composites: Part A* 2006; 37(9): 1473–1479.
- D'ALMEIDA, J.R.M.; NUNES, L.M.; PACIORNIK, S. Evaluation of the damaged area of glass-fiber-reinforced epoxy-matrix composite materials submitted to ballistic impacts. *Composites Science and Technology* 2004; 64: 945–954.
- D'ALMEIDA, J.R.M.; MONTEIRO, S.N. The effect of the resin/hardener ratio on the compressive behavior of an epoxy system. *Polymer Testing* 1996; 15: 329-339.
- DA CRUZ, R.B. Avaliação do comportamento balístico de blindagem multicamadas com compósitos de epóxi reforçados com fibras ou plaquetas de bambu. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia, 2015.
- DA CRUZ, R. B.; JÚNIOR, E. P. L.; MONTEIRO, S. N.; LOURO, L. H. L. Giant Bamboo Fiber Reinforced Epoxy Composite in Multilayered Ballistic Armor. *Materials Research* 2015; 18: 70-75.
- DA SILVA, I.L.A.; BEVITORI, A.B.; ROHEN, L.A.; MARGEM, F.M.; BRAGA, F.O.; MONTEIRO, S.N. Characterization of Fourier transform infrared (FTIR) analysis for natural jute fiber. *Materials Science Forum* 2016; 869: 283-287.
- DA SILVA, M. V.; STAINER, D.; AL-QURESHI, H. A.; HOTZA, D. Blindagens Cerâmicas para Aplicações Balísticas: Uma Revisão. *Cerâmica* 2014; 60: 323-331.
- ELZUBAIR, A.; SUAREZ, J.C.M. Mechanical behavior of recycled polyethylene/piassava fiber composites. *Materials Science & Engineering A* 2012; 557: 29-35.
- ELZUBAIR, A.; BONELLI, C.M.C.; RADEMAKER, H.; SUAREZ, J.C.M.; MANO, E.B. Morphological, structural, thermal and mechanical characterization of piassava fibers. *J Natural Fibers* 2007; 4(2): 13–31.
- FARUK, O. et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science* 2012; 37: 1552– 1596.

- FRANCK, R. Bast and Other Plant Fibres. CRC Press LLC, Boca Raton, USA, 2005.
- GOMES, A.V. Comportamento Balístico da Alumina com Adição de Nióbia e Variação da Geometria do Alvo. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2004.
- GREENHALGH, E.S.; BLOODWORTH, V.M.; IANNUCCI, L.; POPE, D. Fractographic observations on Dyneema® composites under ballistic impact. *Composites: Part A* 2013; 44: 51-62.
- HUI, D.; DUTTA, P.K. A new concept of shock mitigation by impedance-graded materials. *Composites: Part B* 2011; 42: 2081-2184.
- JACOBS, M.J.N.; J.L.J.V. DINGENEN. Ballistic protection mechanisms in personal armour. *Journal of Materials Science* 2001; 36: 3137 – 3142.
- JOHN, M.J.; THOMAS, S. Biofibres and Biocomposites. *Carbohydrate Polymers* 2008; 71: 343-364.
- JOSEPH, K.; VARGHESE, S.; KALAPRASAD, G.; THOMAS, S.; PRASANNAKUMARI, L.; KOSHY, P.; PAVITHRAN, C. Influence of interfacial adhesion on the mechanical properties and fracture behaviour of short sisal fibre reinforced polymer composites. *European Polymer Journal* 1996; 32(10): 1243-1250.
- KALIA, S.; KAITH, B.S.; KAUR, I. (Eds.). *Cellulose Fibers: Bio- and Nano- Polymer Composites*. 1a ed. New York: Springer. 2011.
- KHAN, M.A.; IDRIS ALI, K.M.; BASM, S.C. IR studies of wood plastic composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 1993; 49: 1547-1551.
- KU, H.; WANG, H.; PATTARACHAYAKOOP, N.; TRADA, M. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering* 2011; 42: 856-873.
- LEE, Y.S.; WETZEL, E.D.; WAGNER, N.J. The Ballistic Impact Characteristic of Kevlar Woven Fabrics Impregnated with a Colloidal Shear Thickening Fluid. *Journal of Materials Science* 2003; 38: 2825–33.
- LOURO, L.H.L.; MEYERS, M.A. Effect of stress state and microstructural parameters on impact damage of alumina-based ceramics. *Journal of Materials Science* 1989; 24: 2516-2532.
- LOURO, L.H.L.; LINDFORS, A.; MEYERS, M.A. Stress-wave-induced damage in alumina. *Journal de Physique* 1988; 3(9): 49.
- 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* 2015; 18(2): 170-177.

- LUZ, F.S. Avaliação do Comportamento Balístico de Blindagem Multicamada do Compósito de Epóxi Reforçado com Fibra de Juta. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2014.
- MADHU, V. K. RAMANJANEYULU, T. BALAKRISHNA BHAT, N.K. GUPTA. An experimental study of penetration resistance. *International Journal of Impact Engineering* 2005; 32: 337–350.
- MARGEM, J.I. Estudo das características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de malva. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2013.
- MATTOSO, L.H.C.; PEREIRA, N.; DE SOUZA, M.L.; AGNELLI, J.A.M. Utilização de fibras vegetais para reforço de plástico. *EMBRAPA-CNPDI* 1996; 3: 1-4.
- MAY, C.A. *Epoxy Resins: Chemistry and Technology*. Second ed. New York: Marcel Dekker Inc. p. 794, 1988.
- MEDVEDOVSKI, E. Ballistic Performance of Armour Ceramics: Influence of Design and Structure. Part 1. *Ceramics International* 2010; 36: 2103-2115.
- MEDVEDOVSKI, E. Lightweight ceramic composite armour system. *Advances in Applied Ceramics* 2006; 105(5): 241-245.
- 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* 2013; 7(6): 199-210.
- MOHANTY, A.K.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. Biofibres, Biodegradable Polymers and Bio-composites: An Overview. *Macromolecular Materials and Engineering* 2000; 276/277: 1–24.
- MOHANTY, A.K.; KHAN, M.A.; HINRICHSEN, G. Influence of chemical surface modification on the properties of biodegradable jute fabrics – polyester amide composites. *Composites Part A*. 2000; 31: 143-150.
- 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 & Science* 2017; 57(9): 947-954.
- 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* 2016; 96: 263-269.
- MONTEIRO, S.N.; LOURO, L.H.L.; TRINDADE, W.; ELIAS, C.N.; FERREIRA, C.L.; LIMA, E.S.; WEBER, R.P.; SUAREZ, J.C.M.; FIGUEIREDO, A.B.S.; PINHEIRO,

- W.A.; SILVA, L.C.; LIMA JR., E.P. Natural Curaua Fiber-Reinforced Composite in Multilayered Ballistic Armor. *Metallurgical and Materials Transactions A* 2015; 46: 4567-4577.
- 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* 2015; 46(1): 37–40.
- MONTEIRO, S.N.; LOPES, F.P.D.; BARBOSA, A.P.; BAVITORI, A.B.; SILVA, I.L.A; COSTAL, L.L. Natural Lignocellulosic Fibers as Engineering Materials – An Overview. *Metallurgical and Materials Transactions A* 2011; 42A: 2963-2974.
- MONTEIRO, S.N.; SATYANARAYANA, K.G.; FERREIRA, A.S.; NASCIMENTO, D.C.O.; LOPES, F.P.D.; SILVA, I.L.A.; BEVITORI, A.B.; INÁCIO, W.P.; BRAVO NETO, J.; PORTELA, T.G. Selection of high strength natural fibers. *Revista Matéria* 2011b; 15(4): 488-505.
- MONTEIRO, S.N. et al. Natural-Fiber Polymer-Matrix Composites: cheaper, tougher, and environmentally friendly – An overview. *JOM – A Publication of The Minerals, Metals & Materials Society* 2009; 61(1): 17-22.
- MONTEIRO, S.N. Properties and structure of *Attalea funifera* (piassava) fibers for composite reinforcement – a critical Discussion. *Natural Fibers* 2008; 6(2): 191–203
- MONTEIRO, S.N.; AQUINO, R.C.M.P.; LOPES, F.P.D.; D’ALMEIDA, J.R.M. Charpy impact notch toughness of piassava fiber reinforced polyester matrix composites. (in Portuguese). *Rev Mater* 2006; 11(3): 204–10.
- MORYE, S.S.; HINE, P.J.; DUCKETT, R.A.; CARR, D.J.; WARD, I.M. Modelling of the Energy Absorption by Polymer Composites Upon Ballistic Impact. *Composites Science and Technology* 2000; 60: 2631-2642.
- NABI SAHED, D.; JOG J.P. Natural Fiber Polymer composites a review. *Advances in Polymer Technology* 1999; 18: 351-363.
- NASCIMENTO, D.C.O., FERREIRA, A.S., MONTEIRO, S.N., AQUINO, R.C.M.P., SATYANARAYANA, G.K. Studies on the characterization of piassava fibers and their epoxy composites. *Composites: Part A* 2012; 43: 353-362.
- NASCIMENTO, L.F.C.; LOURO, L.H.L. MONTEIRO, S.N.; LIMA Jr, E.P.; LUZ, F.S. Mallow Fiber-Reinforced Epoxy Composites in Multilayered Armor for Personal Ballistic Protection. *JOM* 2017; 69: 2052-2056.
- NASCIMENTO, L.F.C. Caracterização do compósito de epóxi/fibra de malva para emprego em blindagem balística multicamada. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2017.
- NIJ Standards-0101.04.Ballistic Resistance of Body Armor.U.S. Department of Justice/Office of Justice Programs - National Institute of Justice. 2000.

- NORMANDO, D., TJADERHANE, L., QUINTÃO, C.C.A. A escolha do teste estatístico. *Dental Press J. Orthod.* 2010; 15(1): 101-106.
- O'CONNOR, P.D.T.; KLEYNER, A. *Practical Reliability Engineering*. 5a ed. Chinchester: John Wiley & Sons. 2012
- PICANÇO, M.S. Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2005.
- PIRES, G.; PEREIRA, D. S.; DIAS FILHO, N. L.; VECCHIA, G. D. Caracterização físico-química e mecânica do sistema éster de Silsexquioxano/Resina Epóxi Dgeba/Dietilenotriamina. *Revista Matéria* 2005; 10(2): 317-330.
- QUORA Disponível em: <<https://www.quora.com/During-WWII-why-didn%E2%80%99t-US-marines-have-shields-while-invading-the-Japanese-held-islands/>>. Acesso em 12 de abril de 2018.
- RAMIAH, M.V. Thermogravimetric and differential thermal analysis of cellulose, hemicellulose, and lignin. *J Appl Polym Sci* 1970; 14: 1323–1337.
- RAVEENDRAN, K.; GANESH, A.; KHILAR, K.C. Pyrolysis characteristics of biomass and biomass components. *Fuel* 1996; 75: 987–998.
- ROHEN, L.A.; MARGEM, F. M.; MONTEIRO, S.N.; VIEIRA, C.M.F.; ARAUJO, B.M.; LIMA, E.S. Ballistic Efficiency of an Individual Epoxy Composite Reinforced with Sisal Fibers in Multilayered Armor. *Materials Research*, v. 18, p. 55-62, 2015.
- SANTOS, M.A.; AMORIM Jr, W.F.; BASTIAN, F.L.; SUAREZ, J.C.M.; CARDOSO, A.L.V.; CHAVES, G.Q. Comportamento sob Impacto Balístico de um Sistema Compósito para Blindagem. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos* 2006; 1(1).
- SATYANARAYANA, K.G.; ARIZAGA, G.G.C.; WYPYCH, F. Biodegradable Composites Based on Lignocellulosic Fibers – An Overview. *Progress in Polymer Science* 2009; 34: 982-1021.
- SATYANARAYANA, K.G.; GUIMARÃES, J.L.; WYPYCH, F. Studies on lignocellulosic fiber of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. *Composites: Part A* 2007; 38 (1): 694-709.
- SERJOUEI, A.; CHI, R.; ZHANG, Z.; SRIDHAR, I. Experimental Validation of BLV Model on Bi-Layer Ceramic-Metal Armor. *International Journal of Impact Engineering* 2015; 77: 30-41.
- TASDEMIRCI, A.; TUNUSOGLU, G.; GUDEN, M. The effect of the interlayer on the ballistic performance of ceramic/composite armors: Experimental and numerical study. *International Journal of Impact Engineering* 2012; 44: 1-9.

- THAKUR, V.K.; THAKUR, M.K.; GUPTA, R.K. Review: Raw Natural Fibers Based Polymer Composites. *International Journal of Polymer Analysis and characterization* 2014; 19 (3): 256-271.
- TOMCZAK, F.; SYDENSTRICKER, T.H.D.; SATYANARAYANA, K.G. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. PartII: Morphology and properties of Brazilian coconut fibers. *Composites: Part A* 2007; 38: 1710-1721.
- 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* 2013; 4: 71-79.
- TRINDADE, W. Influência da Geometria e da Microestrutura no Comportamento Dinâmico da Alumina Aditivada com Nióbia. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2012.
- ULVEN, C.; VAIDYA, U.K.; HOSUR, M.V. Effect of projectile shape during ballistic perforation of VARTM carbon/epoxy composite panels. *Composite Structures* 2003; 61: 143–150.
- VIEIRA, S. Estatística experimental. 2ª Edição, Ed. Atlas S.A., São Paulo, Brasil, 1999.
- WANG, L.; KANESALINGAM, S.; NAYAK, R.; PADHYE, R. Recent trends in Ballistic Protection. *Textiles and Light Industrial Science and Technology* 2014; 3: 37-47.
- WESTIN J., Ballistic Impact Properties of Fiber – Reinforced Composite structures, Tese de Mestrado em segurança e defesa, Swedish Defense Research Agency, 2011.