

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

**FOLUKE SALGADO DE ASSIS**

**CARACTERIZAÇÃO E COMPORTAMENTO BALÍSTICO EM  
BLINDAGEM MULTICAMADA DE COMPÓSITOS DE POLIÉSTER  
REFORÇADO COM TECIDO DE JUTA**

**Rio de Janeiro**

**2018**

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**FOLUKE SALGADO DE ASSIS**

**CARACTERIZAÇÃO E COMPORTAMENTO BALÍSTICO EM  
BLINDAGEM MULTICAMADA DE COMPÓSITOS DE POLIÉSTER  
REFORÇADO COM TECIDO DE JUTA**

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

Orientador: Prof. Eduardo de Sousa Lima – D.C  
Co-orientador: Prof. Sergio Neves Monteiro – Ph.D.

Rio de Janeiro

2018

c2018

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

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

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

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

620.1 Assis, Foluke Salgado de

A848c Caracterização e comportamento balístico em blindagem multicamada de compósitos de poliéster reforçado com tecido de juta / Foluke Salgado de Assis; orientado por Eduardo de Sousa Lima; Sergio Neves Monteiro – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2018.

101p.: il.

Tese (Doutorado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018.

1. Curso de Ciência dos Materiais – teses e dissertações. 2. Balística. 3. Blindagem. I. Lima, Eduardo de Sousa. II. Instituto Militar de Engenharia. III. Título.

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**FOLUKE SALGADO DE ASSIS**

**CARACTERIZAÇÃO E COMPORTAMENTO BALÍSTICO EM  
BLINDAGEM MULTICAMADA DE COMPÓSITOS DE POLIÉSTER  
REFORÇADO COM TECIDO DE JUTA**

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

Orientador: Prof. Eduardo de Sousa Lima – D.C. do IME

Co-orientador: Prof. Sergio Neves Monteiro – Ph.D. do IME

Aprovada em 12 de Novembro de 2018 pela seguinte banca examinadora:

---

Prof. Eduardo de Sousa Lima – D.C. do IME – Presidente

---

Prof. Sérgio Neves Monteiro – Ph.D do IME

---

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

---

Prof. Lucio Fabio Cassiano Nascimento – D.C. do IME

---

Prof. Fábio Oliveira Braga – D.C. da Faculdade SENAI

---

Prof. Maycon de Almeida Gomes – D.C. do IFF-Campos

Rio de Janeiro  
2018

## **AGRADECIMENTOS**

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

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

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

Ao meu orientador Cel Eduardo de Sousa Lima pelo apoio e ideias que acrescentaram a este trabalho. Agradeço também ao meu professor de longa data Sergio Neves, que desde que o conheci (2012) na graduação, sempre me apoiou, ensinou-me e me ofereceu todas as oportunidades possíveis para que eu chegasse até aqui.

Aos meus amigos de pós-graduação que sem eles não seria possível a conclusão deste trabalho: Michele, Luana, Fernanda Fábio Garcia, Rodolfo e Jheison. Aos meus amigos Noan Simonassi e Artur Camposo que me acompanham desde a graduação.

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

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

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

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

A CAPES pelo incentivo financeiro para o desenvolvimento desse trabalho

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	8	
LISTA DE TABELAS .....	11	
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	12	
LISTA DE SIGLAS.....	14	
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1	Justificativa do Trabalho .....	19
1.2	Objetivo do Estudo .....	20
1.2.1	Objetivo Geral.....	20
1.2.2	Objetivos Específicos .....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
2.1	Blindagem Balística .....	22
2.2	Sistema de Blindagem Multicamada.....	24
2.3	Camada Externa: Material Cerâmico.....	25
2.4	Camada Intermediária: Compósitos Reforçados com Fibras Naturais ou Fibras de Aramida .....	26
2.4.1	Materiais Compósitos .....	26
2.4.2	Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Lignocelulósicas .....	27
2.4.2.1	Matriz Polimérica .....	28
2.4.2.1.1	Resina Poliéster.....	28
2.4.2.2	Fibras Naturais Lignocelulósicas .....	30
2.4.2.2.1	Fibras de Juta .....	33
2.4.3	Fibras de Aramida .....	34
2.4.4	Arranjo das Fibras para Proteção Balística .....	35

2.5	Camada Interna: Material Metálico .....	36
2.6	Análise de Weibull .....	37
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>38</b>
3.1	Materiais Utilizados.....	38
3.1.1	Alumina, Nióbia e Ítria.....	38
3.1.2	Ligante.....	39
3.1.3	Tecido de Juta .....	40
3.1.4	Resina Poliéster.....	40
3.1.5	Placa de Alumínio.....	41
3.1.6	Cola .....	42
3.1.7	Plastilina .....	42
3.2	Métodos Utilizados .....	43
3.2.1	Análise Térmica – Análise Dinâmico-Mecânica (DMA).....	43
3.2.2	Ensaio Mecânicos.....	44
3.2.2.1	Ensaio de Impacto Charpy e Izod .....	44
3.2.2.2	Ensaio de Flexão .....	46
3.2.2.3	Análise Microestrutural .....	48
3.2.3	Confecção da Blindagem Multicamada .....	49
3.2.3.1	Fabricação das Pastilhas Cerâmicas.....	50
3.2.3.1.1	Obtenção do Pó.....	50
3.2.3.1.2	Prensagem .....	51
3.2.3.1.3	Sinterização .....	52
3.2.3.2	Fabricação dos Compósitos .....	55
3.2.3.3	Colagem das Camadas .....	56
3.2.4	Ensaio Balístico .....	58
3.2.4.1	Ensaio de Deformação na Plastilina .....	59

3.2.4.2	Ensaio de Velocidade Residual .....	61
3.2.5	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	62
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>63</b>
4.1	Análise Térmica.....	63
4.1.1	Análise Dinâmico-Mecânica (DMA).....	63
4.2	Ensaio Mecânicos.....	66
4.2.1	Ensaio de Impacto Izod .....	66
4.2.2	Ensaio de Impacto Charpy .....	70
4.2.3	Ensaio de Flexão .....	74
4.3	Ensaio Balísticos.....	79
4.3.1	Ensaio Balísticos – Colete Balístico.....	79
4.3.2	Ensaio Balísticos – Blindagem Multicamada com Cerâmica $Al_2O_3+ Nb_2O_5$ com 7 Milímetros .....	83
4.3.3	Ensaio Balísticos – Blindagem Multicamada com Cerâmica $Al_2O_3+ Nb_2O_5+ Y_2O_3$ .....	87
4.3.3.1	Ensaio de Velocidade Residual na Cerâmica $Al_2O_3+ Nb_2O_5+ Y_2O_3$ .....	87
4.3.3.2	Blindagem Multicamada – Deformação na Plastina .....	89
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>91</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>93</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>94</b>



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 2.1	Avaliação do desempenho da blindagem por meio da medida do trauma na plastilina. ....	23
FIG. 2.2	Resina poliéster: Processo de cura. ....	29
FIG. 2.3	Estrutura das fibras lignocelulósicas. ....	31
FIG. 2.4	Estrutura química da celulose. ....	31
FIG. 2.5	Estrutura química da lignina. ....	32
FIG. 2.6	Planta de juta. ....	33
FIG. 2.7	Diferentes arranjos de fibras em tecido. ....	35
FIG. 2.8	Mecanismos de falha do compósito reforçado com tecido. ....	37
FIG. 3.1	Tecido de juta: trama simples. ....	40
FIG. 3.2	Resina poliéster e o catalisador metil-etil-cetona. ....	40
FIG. 3.3	Cola Cura Rápida, Marca ULTRAFLEX. ....	42
FIG. 3.4	(a) Massa de modelar CORFIX inserida no Suporte de tiro totalmente preenchido com a plastilina. ....	42
FIG. 3.5	Equipamento de ensaio para DMA. ....	43
FIG. 3.6	Matriz metálica utilizada na preparação das placas de compósito poliéster-juta. ....	44
FIG. 3.7	Etapas da preparação do material compósito: (a) matriz metálica, tecido de juta, resina poliéster e catalisador; (b) as fibras dentro da matriz junto à resina poliéster ainda líquida; (c) matriz fechada; (d) prensagem da matriz metálica. ....	45
FIG. 3.8	(a) Pêndulo PANTEC e esquema dos corpos de prova: (b) Izod e (c) Charpy. ....	46
FIG. 3.9	Máquina Instron configurada para ensaio de flexão em três pontos. ....	47
FIG. 3.10	Microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta FEG 250. ....	48
FIG. 3.11	Esquema do sistema blindagem multicamada. ....	49
FIG. 3.12	Esquema do sistema blindagem multicamada. ....	49
FIG. 3.13	Moinho de bolas MARCONI MA500. ....	50
FIG. 3.14	Matriz utilizada na moldagem dos corpos cerâmicos. ....	51

FIG. 3.15	Prensa hidráulica semiautomática NOWAK, com capacidade para 30 toneladas. ....	52
FIG. 3.16	Forno INTI FE 1700, utilizado na sinterização das pastilhas cerâmicas. ....	53
FIG. 3.17	Placa do compósito utilizado no colete balístico. ....	55
FIG. 3.18	Colagem das camadas do mosaico cerâmico e do compósito reforçado com tecido de juta. ....	56
FIG. 3.19	Agente utilizando o colete balístico. ....	57
FIG. 3.20	Blindagem multicamada: (a) Diagrama esquemático; (b) corpo de prova final utilizado nos ensaios balísticos. ....	57
FIG. 3.21	Esquema do sistema utilizado para os ensaios balísticos. ....	58
FIG. 3.22	Radar Doppler. ....	59
FIG. 3.23	Munição calibre 7,62 x 51 mm. ....	59
FIG. 3.24	(a) Provete calibre com mira a laser; (b) blindagem multicamada e (c) colete posicionados na plastilina. ....	60
FIG. 3.25	Dispositivo de fixação da cerâmica no ensaio de velocidade residual. ....	61
FIG. 3.26	Microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta FEG 250. ....	62
FIG. 4.1	Curvas do módulo de armazenamento para resina poliéster e os compósitos poliéster-juta. ....	63
FIG. 4.2	Curvas do módulo de perda para resina poliéster e os compósitos poliéster-juta. ....	64
FIG. 4.3	Curvas de tangente delta da resina poliéster e dos compósitos poliéster-juta. ....	65
FIG. 4.4	Energia de impacto Izod <i>versus</i> fração volumétrica de tecido de juta. ....	66
FIG. 4.5	Aspecto macroscópico dos compósitos poliéster-juta e da resina poliéster. ....	68
FIG. 4.6	MEV da resina poliéster (a) e dos compósitos poliéster-juta: (b) 10 vol.%, (c) 20 vol.% e (d) 30 vol. % de tecido de juta. ....	69
FIG. 4.7	Energia de impacto Charpy <i>versus</i> quantidade de tecido de juta. ....	71
FIG. 4.8	Aspecto macroscópico da resina poliéster e dos compósitos poliéster-juta após o ensaio de impacto Charpy. ....	72

FIG. 4.9	MEV da resina poliéster (a) e dos compósitos poliéster-juta: (b) 10 vol. %, (c) 20 vol. % e (d) 30 vol. % de tecido de juta. ....	73
FIG. 4.10	Resistência à flexão versus fração volumétrica de tecido de juta. ....	75
FIG. 4.11	Aspecto macroscópico dos corpos de prova de flexão rompidos dos compósitos poliéster-juta e poliéster puro. ....	76
FIG. 4.12	MEV da resina poliéster (a) e dos compósitos poliéster-juta: (b) 10 vol. %, (c) 20 vol. % e (d) 30 vol. % de tecido de juta. ....	77
FIG. 4.13	MEV do compósito poliéster-juta reforçado com 30 vol.% de tecido de juta. ....	78
FIG. 4.14	Colete balístico antes dos disparos de munição 7,62 mm. ....	79
FIG. 4.15	Colete balístico após os disparos de munição 7,62 mm. ....	79
FIG. 4.16	Colete balístico após o primeiro disparo. ....	80
FIG. 4.17	Micrografia por MEV: (a) e (b) Partículas Cerâmicas na superfície do compósito (2000x e 2500x); (c) Espectro de EDS de um dos fragmentos cerâmicos. ....	81
FIG. 4.18	Sistema de blindagem multicamada após o disparo da munição de calibre 7,62 x 51 mm. ....	83
FIG. 4.19	Imagem microscópica da cerâmica fraturada: 10000X. ....	83
FIG. 4.20	Blindagem multicamada com compósito poliéster-juta (30 vol.%), como camada intermediária após ensaio balístico – visão traseira do corpo de prova. ....	84
FIG. 4.21	Profundidade causada na plastilina após o ensaio balístico. ....	85
FIG. 4.22	Ensaio de velocidade residual nas cerâmicas $Al_2O_3+Nb_2O_5+Y_2O_3$ : (a)Antes e (b) após o impacto do projétil. ....	87
FIG. 4.23	Sistema de blindagem multicamada após o disparo da munição de calibre 7,62 x 51 mm. ....	89
FIG. 4.24	Imagem microscópica da cerâmica fraturada: 10000x. ....	89

## LISTA DE TABELAS

TAB. 1.1	Diferentes níveis de proteção balística. ....	17
TAB. 2.1	Níveis de proteção balística. ....	22
TAB. 2.2	Propriedades das cerâmicas balísticas. ....	25
TAB. 2.3	Propriedades da resina poliéster. ....	29
TAB. 2.4	Propriedades das fibras lignocelulósicas e algumas sintéticas. ....	30
TAB. 2.5	Propriedades da fibra de juta. ....	33
TAB. 2.6	Propriedades da fibra de aramida. ....	34
TAB. 3.1	Composição química da Alumina. ....	38
TAB. 3.2	Composição química da Nióbia. ....	39
TAB. 3.3	Composição química da Ítria. ....	39
TAB. 3.4	Propriedades da resina poliéster.....	41
TAB. 3.5	Propriedades mecânicas da liga de Alumínio 5052 H34. ....	41
TAB. 3.6	Composição química do Alumínio 5052 H34. ....	41
TAB. 4.1	Energia de Impacto Izod referente aos compósitos poliéster-juta. ....	66
TAB. 4.2	Parâmetros de Weibull dos valores de energia absorvida dos compósitos poliéster-juta. ....	67
TAB. 4.3	Energia de Impacto Charpy referente aos compósitos poliéster-juta. ....	70
TAB. 4.4	Parâmetros de Weibull dos valores de energia absorvida dos compósitos poliéster-juta. ....	72
TAB. 4.5	Resistência à flexão referente à resina poliéster e aos compósitos poliéster-juta. ....	74
TAB. 4.6	Valores de indentação média das blindagens multicamada. ....	86
TAB. 4.7	Propriedades das cerâmicas sinterizadas. ....	87
TAB. 4.8	Valores das velocidades médias de impacto e residual, energia absorvida e velocidade limite das cerâmicas. ....	88
TAB. 4.9	Valores de Indentação média das blindagens multicamada. ....	90

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

### ABREVIATURAS

DMA	-	Análise Dinâmico-Mecânica
MAS	-	Multilayered Armor System
MEV	-	Microscópio Eletrônico de Varredura
PEG	-	Polietileno Glicol
FNL	-	Fibras Naturais Lignocelulósicas

### SÍMBOLOS

$\beta$	-	Módulo de Weibull
$R^2$	-	Coefficiente de correlação
$E'$	-	Módulo de Armazenamento
$E''$	-	Módulo de Perda
Tan $\delta$	-	Tangente delta
$\theta$	-	Unidade característica
V	-	Volume
$V_i$	-	Velocidade de impacto
$V_r$	-	Velocidade residual
$V_L$	-	Velocidade limite
$\rho$	-	densidade
$\rho_{\text{sinterizado}}$	-	Densidade do material sinterizado
m	-	Massa
$e_{\text{verde}}$	-	Espessura do corpo verde
$e_{\text{sinterizado}}$	-	Espessura da amostra sinterizada
$R_L$	-	Retração linear
$E_{\text{abs}}$	-	Energia absorvida
$\sigma_m$	-	Tensão máxima à flexão
$Q_m$	-	Carga Máxima
L	-	Distância entre os suportes

- b - Largura do corpo de prova
- d - Espessura do corpo de prova

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IME	-	Instituto Militar de Engenharia
NIJ	-	National Institute of Justice
IMA	-	Instituto de Macromoléculas
UFRJ	-	Universidade Federal do Rio de Janeiro
LAMAV	-	Laboratório de Materiais Avançados
UENF	-	Universidade Estadual do Norte Fluminense
CAEx	-	Centro de Avaliações do Exército
IFF	-	Instituto Federal Fluminense

## RESUMO

O sistema de blindagem multicamada é classificado como sistema de proteção nível III, garantindo proteção pessoal contra o impacto balístico de munições de calibre 7,62 x 51 mm com velocidade de impacto na ordem de 840 m/s. Normalmente, esse sistema é formado por duas camadas: a primeira frontal é uma cerâmica e a segunda camada é formada por tecido de aramida. O material cerâmico é capaz de absorver grande parte da energia de impacto, por ser capaz de deformar e erodir a ponta do projétil, o tecido de aramida dissipa a energia residual do evento balístico capturando os fragmentos tanto da cerâmica fraturada quanto do projétil. Estudos recentes mostram que a segunda camada pode ser substituída por compósito polimérico reforçado com fibras naturais lignocelulósicas, apresentando resultados balísticos semelhantes, tendo como principal vantagem a redução do custo da blindagem. Neste trabalho, foi produzido um colete balístico, tendo como material de proteção a blindagem multicamada sendo a segunda camada o compósito poliéster reforçado com tecido de juta. Além disso, foram realizadas caracterizações mecânica e térmica nos compósito poliéster-juta. Os ensaios balísticos foram conduzidos seguindo a norma NIJ 0101.04. Após o ensaio balístico, o colete atendeu os critérios da norma NIJ 0101.04, que determina que a profundidade de indentação deva ser inferior a 44 mm. Micrografias obtidas no MEV evidenciaram que os mecanismos de absorção de energia do compósito foram incrustação mecânica das partículas no compósito e “marcas de rio” na matriz polimérica. Os ensaios de caracterizações mecânicas e térmica evidenciaram que com o aumento da fração volumétrica do tecido de juta (até 30 vol.%), essas propriedades melhoraram; principalmente as propriedades mecânicas relacionadas ao impacto dinâmico. Ademais, foram realizados ensaios balísticos preliminares na blindagem multicamada, com a redução da camada cerâmica, objetivando reduzir peso da blindagem. Por fim, outro ensaio balístico preliminar realizado foi na blindagem multicamada tendo como camada frontal a cerâmica de alumina dopada com nióbia e ítria, evidenciando que esta cerâmica não pode ser utilizada como um material de proteção balística.



## ABSTRACT

The multilayered armor system (MAS) is classified level III protection system, ensuring effective personal protection against ballistic impact from 7.62 x 51 mm caliber ammunition, with impact of 840 m/s. Usually, this system is formed by two layers: the front layer is ceramic material and intermediate layer is aramid fabric. The ceramic material dissipates the most energy of impact, through of deformation and erosion of projectile, the aramid fabric dissipates the residual energy by the capturing of ceramic and projectile fragments. Recent studies show that the intermediate layer can be replaced by polymeric composites reinforced with lignocellulosic fibers that present similar results, and these composites present as the principal advantage the low cost. In this work, it was produced a bullet proof vest with the multilayered armor with intermediate layer the polyester composite reinforced with jute fabric. Moreover, mechanical and thermal characterizations were performed in polyester-jute composites. The ballistic test was performed according to NIJ 0101.04 standard. After the ballistic test, the vest attended the specifications of NIJ 0101.04 standard that determines that the value of indentations depth is less or equal 44 mm. Micrographs have obtained from SEM show that the mechanisms of absorption of energy of composite were mechanic incrustations of ceramic particles and "river marks" of polymeric matrix. The mechanical and thermal characterization tests have evidenced that the increase of amount of jute fabric, these properties increase, specially the impact properties. Besides, preliminary ballistic tests were performed in multilayered armor, with reduction of thickness of ceramic material, which aimed the reduction of weight of multilayered armor. Other preliminary ballistic tests were performed in MAS with frontal ceramic formed by aluminum oxide doped with niobium oxide and yttrium oxide, showing that ceramic cannot be used as protection ballistic material.

# 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o aumento da violência em virtude dos conflitos armados tem aumentado decorrente das guerras ao redor do mundo, por exemplo: Iraque e Síria; e no Brasil em virtude dos conflitos urbanos (traficantes e agentes da segurança pública). Segundo o ATLAS DA VIOLÊNCIA (2018), no Brasil, no ano de 2017, aproximadamente 60 mil pessoas sofreram homicídio em decorrência de conflitos com armas de fogo, representando assim, 72% do total de casos envolvendo homicídios.

Em virtude desse cenário preocupante, bem como a crescente circulação de armas de fogo (ATLAS DA VIOLÊNCIA, 2018) e desenvolvimento de munições, os pesquisadores da área de defesa, em especial a proteção balística pessoal (coletes balísticos), têm a necessidade de desenvolverem novos materiais e sistemas que possam melhorar o desempenho de proteção balística, garantindo assim, maior segurança ao usuário: agente de segurança pública ou militar.

A evolução do colete balístico está condicionada ao desenvolvimento das munições e armas de fogo (BHATNAGAR, 2006; WANG *et al.*, 2014), entretanto, à medida que as munições vão ficando mais potentes, por exemplo a munição de calibre 7,62 mm, os coletes que são capazes de resisti-las, possuem como desvantagem o fator peso, o que acaba reduzindo significativamente a mobilidade do usuário, caso este colete fosse feito de um único material de proteção (colete de Kevlar<sup>TM</sup>). Na TAB. 1.1 são mostradas as diferentes munições utilizadas atualmente, classificadas em função do calibre, massa, velocidade de impacto e energia cinética.

**TAB. 1.1 Diferentes níveis de proteção balística.**

Nível	Calibre	Massa (g)	Velocidade (m/s)	Energia (J)
I	.22 LRHV	2,6	320	133
II	9 mm FMJ	8,0	358	513
III	7,62 x 51 FMJ	9,7	838	3406

Adaptado de NIJ 0101.04 (2000)

Segundo BRAGA *et al.* (2017), para resistir a um evento de nível III (munição calibre 7,62 mm), um colete balístico feito com fibras de Kevlar®, material comumente utilizado em coletes, teria que ter uma espessura de pelo menos 50 mm, equivalente a 96 camadas de tecido de Kevlar®, resultando em um peso de pelo menos 20 Quilogramas. Fator este que reduziria a mobilidade do usuário que usasse esse colete.

Para eventos balísticos classificados como nível III, são utilizados os sistemas de blindagem multicamada (*Multilayered Armor System – MAS*). Através da união de diferentes materiais, proporciona uma proteção pessoal de baixo peso, efetiva. Além de absorver a energia cinética do projétil, este sistema impede a penetração de fragmentos (DA SILVA *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2016). A blindagem multicamada comumente utilizada é composta por uma placa frontal cerâmica, seguida de camadas de fibras sintéticas de poliaramida (Kevlar®).

O material cerâmico que possui elevada resistência à compressão e elevada dureza e baixa resistência à tração, tem como função dissipar a maior parte da energia de impacto através da deformação, erosão e fragmentação do projétil (MEDVEDOVSKI, 2010; MONTEIRO *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2016). Na segunda camada, normalmente, são utilizados materiais sintéticos, Kevlar® (fibras de aramida) ou Dyneema® (polietileno de ultra-alto peso molecular), que possuem baixa massa específica e elevada resistência à tração (MONTEIRO *et al.*, 2011; CALLISTER JR & RETHWISCH, 2014). Essa camada tem como principal objetivo dissipar a energia de impacto através da absorção da energia cinética dos fragmentos gerados pelo impacto do projétil com a camada cerâmica. Em alguns casos, uma terceira camada pode ser adicionada no sistema de blindagem multicamada que é composta por um metal dúctil e tenaz que tem a função de absorver a energia cinética residual (WANG *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2016b; BRAGA *et al.*, 2017b).

Em virtude do alto valor de aquisição e produção das fibras sintéticas utilizadas em blindagens balísticas (CALLISTER JR & RETHWISCH, 2014; DA LUZ *et al.*, 2015; MONTEIRO *et al.*, 2016b), recentemente, vem-se aplicando como camada intermediária nos sistemas de blindagem multicamada os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais lignocelulósicas, que além de apresentarem resultados balísticos satisfatórios e baixo peso (DA LUZ *et al.*, 2015; MONTEIRO *et*

*al.*, 2016b), a utilização dessas fibras apresentam algumas vantagens em relação às fibras sintéticas, como: baixo custo, baixa massa específica, são renováveis, biodegradáveis, disponíveis em grande escala (principalmente no Brasil) e neutras em relação a emissão de dióxido de carbono, sendo consideradas materiais de engenharia ambientalmente correto (SATYANARAYANA *et al.*, 2007; MONTEIRO *et al.*, 2011; PICKERING *et al.*, 2016).

Neste trabalho, pretende-se caracterizar os compósitos de poliéster reforçado com tecido de juta e avaliar o seu desempenho balístico quando utilizados como segunda camada na blindagem multicamada.

## 1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O Programa de Ciência dos Materiais do IME já vem dedicando esforços e recursos na pesquisa de novos materiais para serem utilizados em blindagem balística, que é área de interesse do Exército Brasileiro. Os sistemas de blindagem multicamada tendo como segunda camada os compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas apresentaram desempenhos balísticos satisfatórios, atendendo os critérios da norma NIJ 0101.04 (2000), aliados ao baixo custo e baixo peso. O presente trabalho dedica esforços para transformar esta blindagem multicamada de caráter científico em um produto tecnológico, podendo ser utilizada em coletes balísticos. Este trabalho também visa contribuir cientificamente através da caracterização térmica e mecânica dos compósitos de poliéster reforçados com tecido de juta. Além disso, esse trabalho avaliou as propriedades balísticas da cerâmica de alumina dopada com nióbia e ítria, fato esses ainda não estudado.

## 1.2 OBJETIVO DO ESTUDO

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

Neste trabalho, pretende-se avaliar as propriedades mecânicas de impacto e flexão e térmicas dos compósitos de poliéster reforçado com tecido de juta, bem como o seu desempenho balístico, quando aplicado como camada intermediária em um sistema de blindagem multicamada. Como complementação do objetivo, o compósito reforçado com tecido de juta será comparado com uma blindagem multicamada que possua o tecido de aramida como camada intermediária, material tradicional de blindagem balística. Além disso, foram analisadas as propriedades balísticas da cerâmica de alumina dopada com nióbia e ítria.

## 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Avaliar as propriedades dinâmico-mecânico dos compósitos poliéster-juta, variando a fração volumétrica de tecido de juta de 0 até 30%;
- 2) Analisar a resistência ao impacto dos compósitos poliéster-juta, variando a fração volumétrica de tecido de juta de 0 até 30%;
- 3) Analisar resistência à flexão dos compósitos poliéster-juta, variando a fração volumétrica de tecido de juta de 0 até 30%;
- 4) Avaliar o desempenho e a integridade do colete balístico utilizando o sistema de blindagem multicamada, tendo camada o compósito poliéster-juta tendo uma fração volumétrica de 30% de tecido de juta;
- 5) Avaliar o desempenho e a integridade do sistema de blindagem multicamada em uma condição de menor espessura da pastilha cerâmica tendo a camada cerâmica uma espessura de 7 milímetros;
- 6) Comparar o desempenho da blindagem supracitada com a blindagem multicamada tendo como camada intermediária o tecido de aramida, bem como blindagens multicamada tendo como camada intermediária o compósito polimérico reforçado com fibras lignocelulósicas;
- 7) Avaliar o desempenho individual da cerâmica de alumina dopada com nióbia e ítria através do ensaio de velocidade limite;
- 8) Verificar a influência da cerâmica de alumina dopada com nióbia e ítria no desempenho da blindagem multicamada, através do ensaio de deformação na plastilina;
- 9) Analisar as superfícies de fratura dos compósitos e da pastilha cerâmica produzida após os ensaios balísticos, através de microscopia eletrônica de varredura.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BLINDAGEM BALÍSTICA

Blindagem balística pode ser definida como um anteparo desenvolvido para oferecer proteção, impedindo a perfuração de projeteis oriundos por armas de fogo (NIJ 0101.04, 2000; ABNT NBR 15000, 2005). Tratando-se de blindagem balística pessoal (colete), essa blindagem pode ser dividida em cinco níveis de proteção baseados no desempenho balístico, em função do calibre do projétil utilizado (NIJ 0101.04, 2000), conforme ilustrado na TAB. 2.1.

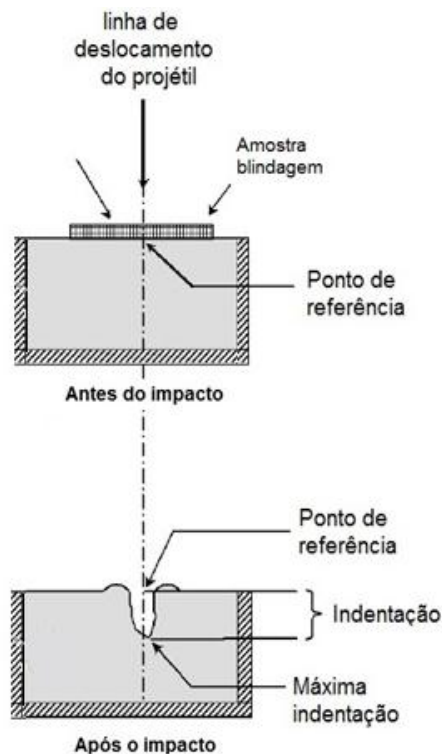
**TAB. 2.1 Níveis de proteção balística.**

Nível	Calibre	Massa (g)	Velocidade (m/s)	Energia Cinética (J)
I	.22 LRHV	2,6	320	133,12
	.38 Special RN	10,2	254	329,03
IIA	9 mm FMJ	8,0	332	440,9
	.357 Magnum JSP	10,2	381	740,32
II	9 mm FMJ	8,0	358	512,66
	.357 Magnum JSP	10,2	425	921,19
IIIA	9 mm FMJ	8,0	426	725,9
	.44 Magnum SWC GC	15,6	426	1415,51
III	7,62 x 51 FMJ	9,7	838	3405,88
IV	.30 – 06 AP	10,8	868	4068,49

**Adaptado de NIJ 0101.04 (2000)**

A norma NIJ 0101.04 (2000) estabelece que para um sistema de blindagem ser considerado eficiente, o mesmo não deve apresentar uma deformação superior a 44 milímetros. Acima desse valor, o trauma causado pode ser grave ou letal para o usuário.

Em um ensaio balístico, essa deformação é medida em um material de referência apoiado atrás da blindagem, conforme ilustrado na FIG. 2.1.



**FIG. 2.1 Avaliação do desempenho da blindagem por meio da medida do trauma em plastilina.  
Adaptado de NIJ-0101.04 (2000)**

Existem outros métodos que avaliam o desempenho do sistema de blindagem balística, baseados na possível ocorrência ou não do projétil perfurar a blindagem balística, buscando-se determinar a velocidade limite ( $V_L$ ), sendo que abaixo dessa velocidade o projétil é barrado e acima ele perfura a blindagem (ZUKAS, 1982; MORYE *et al.*, 2000).



## 2.2 SISTEMA DE BLINDAGEM MULTICAMADA

O sistema de blindagem multicamada consiste na união de diferentes materiais com propriedades distintas, tendo como objetivos impedir a penetração do projétil e dos fragmentos (DA SILVA *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2016).

Para o caso de proteção individual, esse sistema surgiu a partir da necessidade de se obter uma proteção leve e efetiva contra projéteis de calibre (7,62 x 51 mm) com velocidade de impacto de aproximadamente 850 m/s, sendo que a blindagem monolítica, por exemplo, uma blindagem aço, não atendia perfeitamente essas duas exigências em virtude de sua elevada massa específica (DA SILVA, 2014b).

Normalmente, a blindagem multicamada possui três camadas: a camada frontal composta de material cerâmico; a segunda camada composta de fibras sintéticas ou um compósito de matriz polimérica reforçada com fibras naturais; e a terceira camada formada por uma fina camada de material metálico de reduzida massa específica (DA SILVA *et al.*, 2014; DA LUZ *et al.*, 2015; MONTEIRO *et al.*, 2016b)

O material cerâmico utilizado na camada frontal possui elevado módulo de elasticidade, elevada dureza e elevada resistência à compressão, sendo responsável por dissipar a maior parte da energia cinética provida do impacto do projétil, fragmentando-o. Além disso, o cerâmico promove uma melhor distribuição da pressão do impacto sobre a segunda camada (MEDVEDOVSKI, 2010; DA SILVA *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2016b).

A segunda camada (material polimérico ou compósito) tem como objetivo absorver a energia residual dos fragmentos do projétil, da própria cerâmica, impedindo a passagem dos mesmos através da blindagem multicamada (DA SILVA *et al.*, 2014; WANG *et al.*, 2014).

Na terceira camada, é utilizado um material metálico leve (liga de alumínio) que tem como objetivo aperfeiçoar e garantir o desempenho de absorção da energia dissipada pelo sistema de blindagem (MEDVEDOVSKI, 2010; MONTEIRO *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2016b).

## 2.3 CAMADA EXTERNA: MATERIAL CERÂMICO

O material cerâmico pode ser definido como um composto formado por elementos metálicos e não metálicos, sendo sua ligação química predominantemente iônica (CALLISTER JR & RETHWISCH, 2014). No sistema de blindagem multicamada, a camada frontal é formada pelo material cerâmico, em virtude de suas propriedades físicas e mecânicas (DA SILVA *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2014; DA LUZ *et al.*, 2015; MONTEIRO *et al.*, 2016), sendo responsável por dissipar grande parte da energia cinética do projétil, em torno de 55% (MONTEIRO *et al.*, 2014), além de melhorar a distribuição de impacto balístico sobre a camada posterior (MEDVEDOVSKI, 2010; DA SILVA *et al.*, 2014)

As principais cerâmicas utilizadas em blindagem balística são: carbeto de boro ( $B_4C$ ), carbeto de silício ( $Si_4C$ ) e a alumina ( $Al_2O_3$ ). Essas cerâmicas apresentam valores elevados de resistência mecânica, módulo de elasticidade, dureza e custo (MEDVEDOVSKI, 2010; DA SILVA *et al.*, 2014), conforme observado na TAB. 2.2.

**TAB. 2.2 Propriedades das cerâmicas balísticas.**

Cerâmica	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (GPa)	Dureza (Kg/mm <sup>2</sup> )	Custo (\$) do quilo
Carbeto de Boro	2,5	460	3200	750
Carbeto de Silício	3,2	450	2300	250
Alumina	3,4-3,7	380	1400-1800	33

**Adaptado de CALLISTER JR & RETHWISCH (2014); DA SILVA *et al.* (2014)**

Conforme observado na TAB. 2.2, a alumina é a cerâmica que apresenta uma boa relação custo-benefício dentre as cerâmicas avançadas. No intuito de melhorar as propriedades da alumina, aditivos são utilizados no seu processo de confecção, como a nióbia - $Nb_2O_5$  (GOMES *et al.*, 2014), a ítria -  $Y_2O_3$  (CABRAL *et al.*, 2018) e o fluoreto de lítio - LiF (JESUS, 2016; SANTOS, 2017). Esses aditivos atuam de forma a reduzir o tempo e a temperatura de sinterização, aumentar a densificação, o tamanho de grão e modificar o processo de fratura da alumina, de transgranular para intergranular (GOMES *et al.*, 2014; JESUS, 2016; SANTOS, 2017).

## 2.4 CAMADA INTERMEDIÁRIA: COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS OU FIBRAS DE ARAMIDA

### 2.4.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Nos últimos anos, devido à necessidade de se ter materiais de engenharia que possuam propriedades muitas vezes antagônicas, por exemplo: baixa massa específica e alta resistência; a classe dos materiais compósitos é a classe que vem crescendo mais e ganhando destaque (CALLISTER JR & RETHWISCH, 2014).

A definição do material compósito ainda não é completamente aceita pelos pesquisadores. Segundo CHAWLA (1993), o material compósito é definido como um material feito pelo homem, multifásico, com fases quimicamente distintas, sendo que uma das fases (reforço) tem a função de oferecer maior resistência ao esforço e a outra (matriz) tem a função de transferir esse esforço.

Segundo CALLISTER JR e RETHWISCH (2014), um material compósito é definido como sendo um material multifásico, que exiba uma proporção significativa de ambas as fases que o constituem e sejam quimicamente distintos, separados por uma interface bem definida de modo que esse novo material apresente melhores propriedades que os componentes individuais utilizados para a confecção do novo material.

No sistema de blindagem multicamada, o material compósito possui menor peso específico que a camada cerâmica. Esse é um fator importante no que diz respeito à interação e reflexão das ondas de choque entre esses dois materiais (ASSIS *et al.*, 2018). Esse material tem a função de impedir e atenuar o impacto balístico, impedindo a penetração de fragmentos provenientes do projétil e da camada cerâmica fraturada (DA SILVA, 2014b; WANG *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2016b).

## 2.4.2 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS LIGNOCELULÓSICAS

Nos últimos anos, em virtude dos problemas decorrentes do impacto ambiental, houve um aumento no interesse em materiais renováveis (BLEDZKI & GASSAN, 1999; SATYANARAYANA *et al.*, 2009; MONTEIRO *et al.*, 2011; FARUK *et al.*, 2014; PICKERING *et al.*, 2016). Esse interesse é decorrente, principalmente, dos problemas ambientais causados por produtos derivados da indústria petrolífera, fazendo com que empresas e pesquisadores busquem soluções que minimizem os problemas causados ao meio ambiente (FARUK *et al.*, 2014).

Uma das soluções que vem ganhando grande destaque nos últimos anos é a utilização de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais lignocelulósicas. No decorrer dos anos, o número de empresas que utilizam esses compósitos vem aumentando devido ao fato das fibras naturais lignocelulósicas apresentarem diversas vantagens (SATYANARAYANA *et al.*, 2007; MONTEIRO *et al.*, 2011; FARUK *et al.*, 2014;) tais como: baixo custo (um terço da fibra de vidro), baixo peso (metade do peso da fibra de vidro), são renováveis, recicláveis, biodegradáveis e neutras em relação à emissão de CO<sub>2</sub>. Outra importante vantagem das fibras naturais está relacionada ao aspecto social (ALVES, 2010; MONTEIRO *et al.*, 2011), durante a fase de cultivo, elas são fonte de renda para as comunidades de agricultores locais, contribuindo assim, para a sustentabilidade da região, evitando o êxodo rural.

É perceptível que os compósitos reforçados com fibras naturais lignocelulósicas apresentam grande importância no que diz respeito aos materiais que atendem as especificações das indústrias (SATYANARAYANA *et al.*, 2009; FARUK *et al.*, 2012), e ao conceito de sustentabilidade (BLEDZKI E GASSAN, 1999; MOHANTY *et al.*, 2002; ALVES, 2010). Em decorrência desse avanço, o número de publicações, revisões e livros vêm crescendo a cada ano (SATYANARAYANA *et al.*, 2009; FARUK *et al.*, 2014; PICKERING *et al.*, 2016). Recentemente, os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais lignocelulósicas apresentaram-se como um possível substituto das fibras sintéticas em sistemas de blindagem multicamada

(DA SILVA, 2014b; DA CRUZ, 2015; DRELICH *et al.*, 2016; ASSIS, 2016, NASCIMENTO, 2017; BRAGA, 2018; DA LUZ, 2018).

#### 2.4.2.1 MATRIZ POLIMÉRICA

Entre as classes dos materiais que são utilizados como a fase matriz de um compósito, a matriz polimérica possui vasta aplicação em diversos setores da engenharia, em virtude deste compósito apresentar boas propriedades em temperatura ambiente, tais como: resistência mecânica, ductilidade e baixa massa específica. Destaca-se, também, a facilidade em sua fabricação, reduzindo assim o custo de produção. Conseqüentemente, os compósitos de matriz polimérica são utilizados na maior diversidade de aplicações dos compósitos, assim como em maiores quantidades (CALLISTER JR & RETHWISCH, 2014).

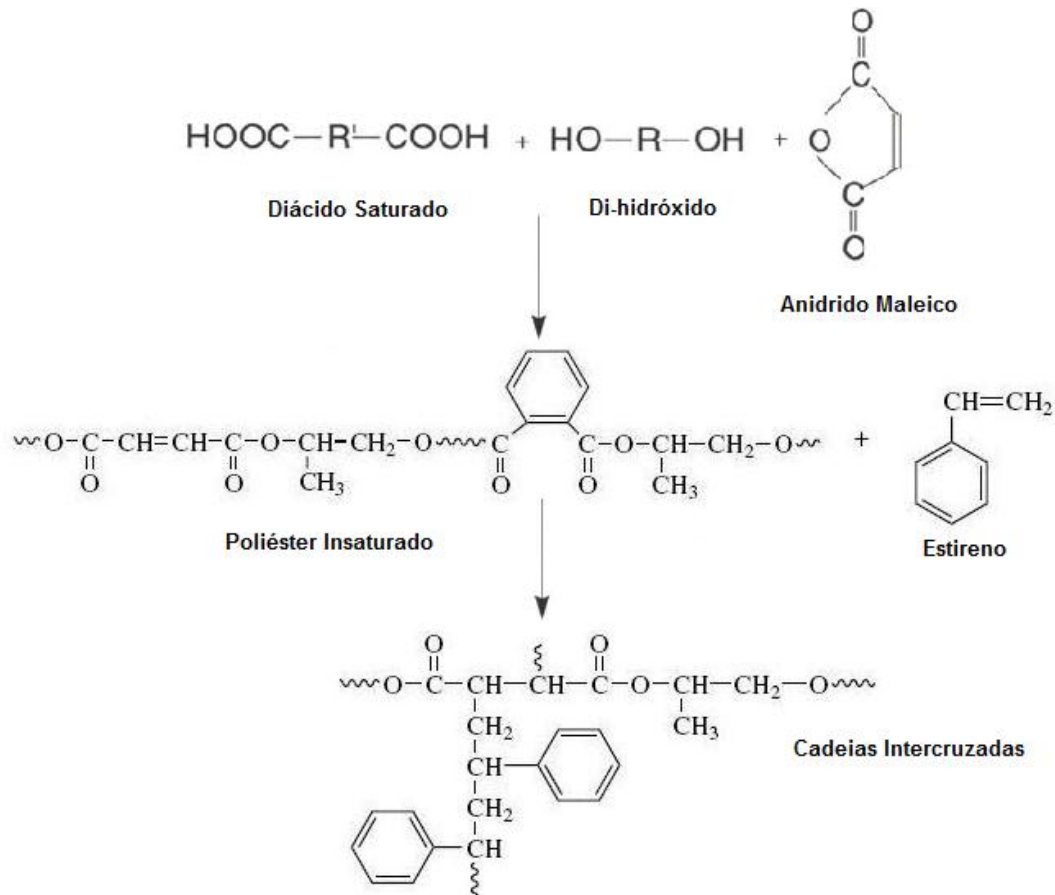
Em um material compósito, tendo-se matriz polimérica e como fase dispersa as fibras, a matriz polimérica atua de forma a proteger, alinhar e estabilizar as fibras, e também, garantem a transferência de tensões de uma fibra para outra. Geralmente, as propriedades mecânicas da matriz polimérica são inferiores as propriedades da fase dispersa (LACH, 1998; CALLISTER JR & RETHWISCH, 2014)

##### 2.4.2.1.1 RESINA POLIÉSTER

As resinas poliéster consistem de um grupo de alto peso molecular, provenientes da reação de um diácido e dianídrico com um composto di-hidróxi (FIG. 2.2). Podem ser classificados como poliéster saturado ou insaturado, sendo a diferença entre eles a presença de ligações simples (saturado) ou ligações duplas (insaturado) na cadeia principal (RATNA, 2009; EMBRAPOL, 2017).

Para produzir poliéster insaturado, utiliza-se anidrido maleico em adição a um ácido saturado, que proporciona insaturação na estrutura. Um diol comum utilizado é o propileno glicol (RATNA, 2009). Com a adição de estireno, tem-se a reação

irreversível de intercruzamento das cadeias que garante a rigidez do poliéster (DHOLAKIYA, 2012). As resinas insaturadas são mais utilizadas na fabricação de materiais compósitos, devido ao seu baixo custo, facilidade de processamento e boas propriedades mecânicas, elétricas e químicas (RATNA, 2009; EMBRAPOL, 2017).



**FIG. 2.2 Resina poliéster: Processo de cura.**  
Adaptado de RATNA (2009); DHOLAKIYA (2012)

As resinas poliéster possuem um vasto campo de aplicação, sendo utilizadas como resinas para laminação, recobrimentos, para fabricação de fibras, filmes borrachas e plastificantes (BRYDSON, 1999). Na TAB. 2.3 são mostradas algumas propriedades da resina poliéster insaturado à temperatura ambiente.

**TAB.2.3 Propriedades da resina poliéster.**

Densidade (g/cm³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Tenacidade à fratura (MPa√m)
1,04-1,46	2,06-4,41	41,4-89,7	0,6

Adaptado de CALLISTER JR & RETHWISCH (2014)

## 2.4.2.2 FIBRAS NATURAIS LIGNOCELULÓSICAS

As fibras lignocelulósicas (FNL) são fibras naturais que apresentam em sua estrutura grande quantidade de celulose e lignina (BLEDZKI e GASSAN, 1999; MOHANTY *et al.*, 2005; MONTEIRO *et al.*, 2011; KALIA *et al.*, 2011; FARUK *et al.*, 2014). Elas podem ser extraídas a partir de diversas partes da planta, como o caule e o pseudocaule (KALIA *et al.*, 2011; FARUK *et al.*, 2014).

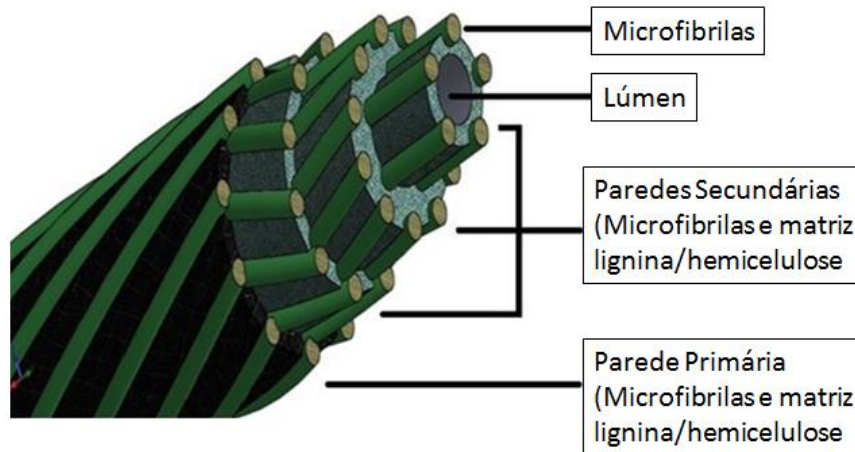
Diversos fatores podem influenciar nas propriedades das fibras lignocelulósicas, tais como: composição química, diâmetro da fibra, arranjo dos constituintes na fibra (incluindo ângulo das microfibrilas), grau de polimerização, fração cristalina da celulose, e condições de crescimento (idade, condições climáticas e processos de degradação). Na TAB. 2.4 são mostradas as propriedades de algumas fibras lignocelulósicas e algumas fibras sintéticas tais como as fibras de vidro, de carbono e de aramida.

**TAB. 2.4 Propriedades das fibras lignocelulósicas e algumas sintéticas.**

Fibra	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Relação $\sigma/\rho$ (MPa.cm <sup>3</sup> /g)
Bagaço de cana-de-açúcar	0,34-0,49	135-222	15-17	493
Bambu	1,03-1,21	106-204	---	-
Banana	0,67-1,50	700-800	27-32	1194
Buriti	0,63-1,12	129-254	---	403
Coco	1,15-1,52	95-220	4-6	530
Algodão	1,51-1,60	287-800	6-13	2193
Curauá	0,57-0,92	117-3000	27-80	496
Linho	1,30-1,50	344-1035	26-28	649
Juta	1,30-1,45	393-800	13-27	615
Piaçava	1,10-1,45	109-1750	5-6	1591
Abacaxi	1,44-1,56	362-1627	35-86	1130
Rami	1,5	128-1080	61-128	1080
Sisal	1,26-1,50	287-913	9-28	725
Fibra de vidro	2,50-2,58	2000-3450	70-73	1380
Carbono	1,78-1,81	2500-6350	230-400	3567
Aramida	1,44	3000-4100	63-131	2847

**Adaptado de MONTEIRO *et al.* (2011)**

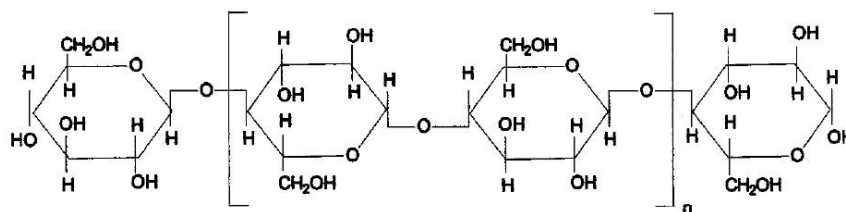
Uma fibra lignocelulósica elementar possui comprimento que varia de 1 a 50 mm, diâmetro entre 10 e 50  $\mu\text{m}$  e são similares a tubos microscópicos, com paredes celulares ao redor do lúmen, conforme observado na FIG. 2.3.



**FIG. 2.3 Estrutura das fibras lignocelulósicas.**  
Adaptado de SIMONASSI (2017)

Essas paredes celulares são formadas a partir de uma matriz de hemicelulose/lignina reforçada por microfibrilas de celulose semicristalina. A composição desse compósito natural varia de fibra para fibra. As moléculas de hemicelulose são unidas à celulose por ligações de hidrogênio e atuam como cimentante das microfibrilas, formando uma rede de celulose/hemicelulose que é considerada o principal componente estrutural da fibra. A lignina, por sua vez, age como cimentante e aumenta a rigidez do compósito de celulose/hemicelulose. Outros constituintes presentes nas FNL são as pectinas e as graxas (MONTEIRO *et al.*, 2011; KALIA *et al.*, 2011).

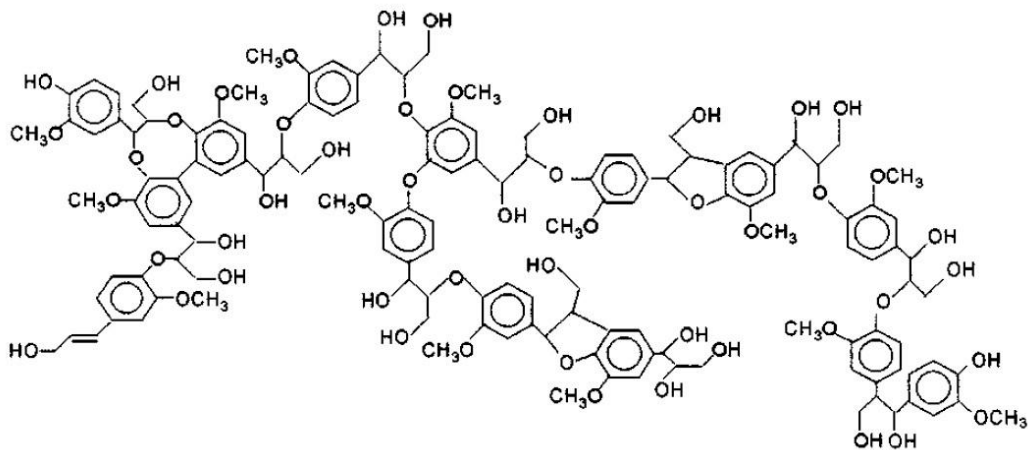
A celulose é um polímero natural linear composto por unidades de D-anidroglicopirranose unidas por ligações  $\beta$ -1,4-glicosídicas (MOHANTY *et al.*, 2005).. Na FIG. 2.4 é mostrada a estrutura química da celulose.



**FIG. 2.4 Estrutura química da celulose.**  
Adaptado de MOHANTY *et al.* (2005)



A hemicelulose é um polissacarídeo que apesar de ter sua estrutura similar à da celulose, apresenta diferentes características como menor grau de polimerização, alto grau de intercruzamento e é constituída por diferentes açúcares ao contrário da celulose. A lignina é um hidrocarboneto complexo, composto por anéis alifáticos e aromáticos e se apresenta de maneira amorfa (MOHANTY *et al.*, 2005). A estrutura química da lignina estrutura é mostrada na FIG. 2.5.



**FIG. 2.5 Estrutura química da lignina.**  
Adaptado de MOHANTY *et al.* (2005)

#### 2.4.2.2.1 FIBRAS DE JUTA

Uma das fibras mais utilizadas ( $2300 \times 10^3$  toneladas/ano) como material de reforço em compósitos de matriz polimérica é a fibra de juta (*Corchorus capsularis*), devido a suas boas propriedades mecânicas, físicas e baixo custo (MOHANTY *et al.*, 2002; MONTEIRO *et al.*, 2011; FARUK *et al.*, 2012; MONTEIRO *et al.*, 2012; MONTEIRO *et al.*, 2012b; PICKERING *et al.*, 2016), conforme ilustrado na TAB. 2.5 Sua principal aplicação é na indústria de sacaria (CASTANHAL DO PARÁ, 2017)

**TAB. 2.5 Propriedades da fibra de juta.**

Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (GPa)	Limite de resistência à tração (MPa)
1,3-1,45	13-27	393-800

**Adaptado de MONTEIRO *et al.* (2011)**

A fibra de juta é extraída do caule da planta de juta, cultivada principalmente na região Norte do Brasil, devido ao clima tropical da região. A planta pode alcançar até quatro metros de altura e vinte e dois milímetros de diâmetro (FIG 2.6). Além das boas propriedades que a fibra de juta possui, através dela, pode ser desenvolvida uma importante atividade econômica das populações ribeirinhas da região amazônica (CASTANHAL DO PARÁ, 2017).



**FIG. 2.6 Planta de juta.**

**Disponível em: <<http://www.amazonianarede.com.br>>. Acesso em 16 de agosto de 2017**

Para a produção da fibra de juta, a planta passa por um processo que leva aproximadamente cinco dias. Este processo consiste, basicamente, no corte dos talos, limpeza das hastes, maceração em água corrente ou parada, desprendimento das fibras da casca, lavagem, secagem em varais e produção de bobinas ou tecidos (CASTANHAL DO PARÁ, 2017).

### 2.4.3 FIBRAS DE ARAMIDA

As fibras de aramida foram desenvolvidas no final da década de 1960, pelos cientistas da empresa Dupont, e são comercialmente conhecidas como Kevlar® (BHATNAGAR, 2006). Devido ao elevado grau de ordenamento de suas cadeias moleculares, esse polímero sintético apresenta excelentes propriedades físicas e mecânicas, como ilustrado na TAB 2.6.

**TAB 2.6 Propriedades da fibra de aramida.**

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

**Adaptado de CALLISTER JR & RETHWISCH (2014)**

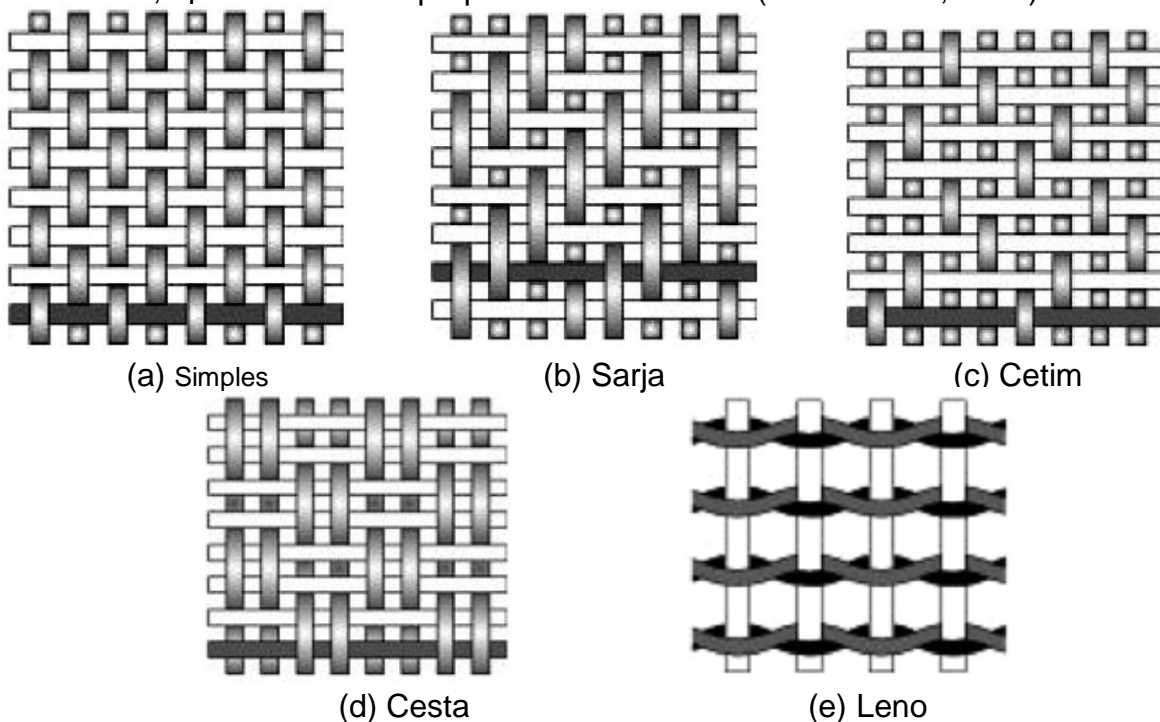
As fibras de aramida são aplicadas principalmente no setor de blindagem balística, e quando aplicadas unicamente em coletes balístico, elas são capazes de absorver a energia cinética de projeteis provenientes de arma de fogo com velocidade de impacto inferior a 420 m/s (BHATNAGAR, 2006; NIJ 0101.04, 2000). Quando aplicados em sistema de blindagem multicamada, quando utilizadas como a segunda camada do sistema, elas são responsáveis em absorver em até 37% da energia cinética de projeteis que possuem velocidade acima de 830 m/s (MONTEIRO *et al.*, 2014; DA SILVA, 2014b).

#### 2.4.4 ARRANJO DAS FIBRAS PARA PROTEÇÃO BALÍSTICA

Estudos recentes (ASSIS, 2016, NASCIMENTO, 2017) em sistemas de blindagem multicamada tendo como camada intermediária: compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais lignocelulósicas; sendo essas fibras na forma de tecido, os sistemas apresentaram desempenhos balísticos melhores quando comparados com as fibras orientadas de forma contínua e alinhada.

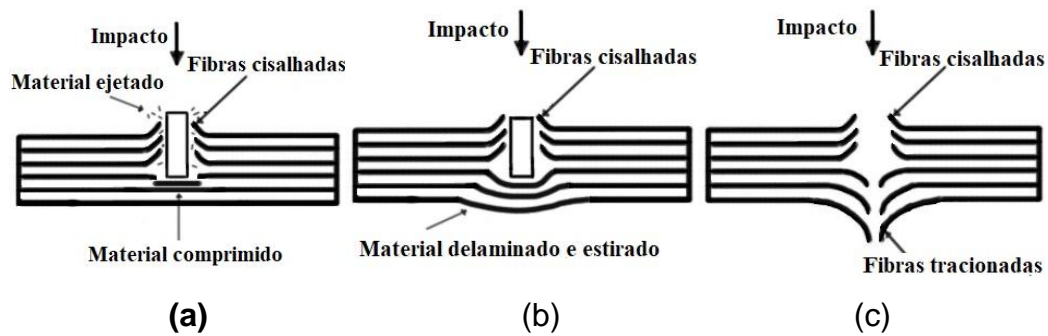
Esse aumento de desempenho pode ser explicado devido ao fato de que na configuração tecido, a maior parte da absorção da energia de impacto é em virtude das regiões de encontro dos fios da trama atuarem como pontos de inflexão e divergência das ondas de choque, tendo assim, uma maior distribuição de tensões em várias frentes de trincas (HOSUR *et al.*, 2004).

Os tecidos são produzidos pelo entrelaçamento dos fios de trama ( $0^\circ$ ) com os fios de urdume ( $90^\circ$ ), em um arranjo regular (JOHN & THOMAS, 2008). Os principais tipos de trama são mostrados na FIG. 2.7. No presente trabalho será selecionado o tecido de trama simples, FIG. 2.7(a), pois além deste ser facilmente encontrado no mercado, apresentou boas propriedades balísticas (ASSIS *et al.*, 2018).



**FIG. 2.7 Diferentes arranjos de fibras em tecido.  
Adaptado de JOHN & THOMAS (2008)**

Na FIG. 2.8 são mostrados os mecanismos de falhas para um compósito balístico reforçado por tecidos.



**FIG. 2.8. Mecanismos de falha do compósito reforçado com tecido.**  
Adaptado de KARTHIKEYAN *et al.* (2017)

A penetração parcial ocorre em dois momentos: o impacto produz inicialmente, a compressão das fibras, induzindo a quebra das mesmas por cisalhamento (FIG. 2.8a); quando a energia de impacto é absorvida e a velocidade do projétil diminuída, ocorre o estiramento das fibras e a delaminação entre as camadas (FIG. 2.8b). Por fim, a penetração completa do projétil produz a quebra das fibras, decrescendo sua velocidade devido à absorção da energia cinética (FIG. 2.8c).

## 2.5 CAMADA INTERNA: MATERIAL METÁLICO

O material metálico utilizado na terceira camada da blindagem multicamada deve apresentar alta plasticidade e tenacidade (WANG *et al.*, 2014; MONTEIRO *et al.*, 2016b; ASSIS *et al.*, 2018). Essa camada tem como objetivo principal a otimização o desempenho da blindagem, absorvendo a energia cinética residual (WANG *et al.*, 2014).

Normalmente são utilizadas ligas de alumínio, em especial a liga 5052 H34, devido à alta resistência mecânica, plasticidade e tenacidade (BRAGA *et al.*, 2017b).

## 2.6 ANÁLISE DE WEIBULL

A distribuição de Weibull é um método estatístico de confiabilidade muito utilizado para cálculos de engenharia e tem a vantagem de se adequar a diversos casos reais pelo ajuste de poucos parâmetros (ABERNETHY *et al.*, 1983; O'CONNOR & KLEYNER, 2012). A função de distribuição cumulativa de Weibull é dada pela EQ. 2.1.

$$F(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x}{\theta} \right)^\beta \right] \quad \text{EQ 2.1}$$

Rearranjando-se a EQ 2.1, é obtida a EQ 2.2:

$$\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{1-F(x)} \right) \right] = \beta \ln(x) - [\beta \ln(\theta)] \quad \text{EQ 2.2}$$

Onde:

$\theta$  → Unidade característica. Esse parâmetro corresponde a 63,3% de probabilidade de o material analisado apresentar determinada propriedade (CARVALHO, 2007; VIEIRA, 2010);

$\beta$  → Módulo de Weibull. Este valor controla a variação dos resultados e fornece uma avaliação da homogeneidade do material.. Para corpos de elevada dispersão como as fibras lignocelulósicas, o valor do módulo de Weibull deve estar compreendido entre 0,5 e 15 (CARVALHO, 2007; VIEIRA, 2010).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

##### 3.1.1 ALUMINA, NIÓBIA E ÍTRIA

A Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), cerâmica utilizada no presente trabalho, foi fornecida pela empresa nacional Treibacher Scheifmittel. Na TAB. 3.1 é mostrada a composição química fornecida pelo fabricante.

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

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

**Adaptado de TRINDADE (2012)**

A Nióbia ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ), adicionada à alumina no processo de sinterização, foi fornecida pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM). Na TAB. 3.2 é mostrada a composição química fornecida pelo fabricante.

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

Elemento	Concentração (%)
$\text{Nb}_2\text{O}_5$	99,5
Perda ao fogo	0,1
Elemento	Concentração (ppm)
Ta	745
Ti	240
Fe	136
Si	66

**Adaptado de TRINDADE (2012)**

A ítria ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ), adicionada à alumina no processo de sinterização, foi fornecida pela Alfa Aesar. Na TAB. 3.3 é mostrada a composição química fornecida pelo fabricante

**TAB. 3.3 Composição química da Ítria.**

Elemento	Concentração (%)
$\text{Y}_2\text{O}_3$	99,5
Elemento	Concentração (ppm)
Eu	4,9
Fe	2,0
Cu	2,0
Si	28,0
Ni	3,0
Pb	2,0

**Adaptado de CABRAL (2011)**

### 3.1.2 LIGANTE

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



### 3.1.3 TECIDO DE JUTA

No presente trabalho, foram utilizadas fibras de juta com configuração tecido (FIG. 3.1), sendo o mesmo fornecido pela empresa brasileira SISALSUL.



**FIG. 3.1** Tecido de juta: trama simples.

### 3.1.4 RESINA POLIÉSTER

A matriz polimérica utilizada nos compósitos foi a resina poliéster cristal, fornecida pela empresa LOKALFIBRA. De acordo com o fornecedor, a resina é Ortoftálica, que deve ser misturada ao catalisador peróxido metil-etil-cetona (FIG. 3.2) na proporção de 0,5% em peso.



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

Na TAB. 3.4 são mostradas algumas propriedades da resina poliéster, obtidas através da fornecedora LOKALFIBRA.

**TAB. 3.4 Propriedades da resina poliéster.**

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

### 3.1.5 PLACA DE ALUMÍNIO

As placas de alumínio 5052 H34 utilizadas nos ensaios foram adquiridas da empresa METALAK METAIS, com dimensões 300 x 300 x 5 mm. Os valores referentes às propriedades mecânicas são apresentados na TAB. 3.5. Na TAB. 3.6 é mostrada a composição química da liga 5052 H34.

**TAB. 3.5 Propriedades mecânicas da liga de Alumínio 5052 H34.**

Propriedade	Valor	Especificação
Tensão máxima (MPa)	249	Min. 235 Max. 285
Tensão de escoamento (MPa)	205	Min. 180
Ductilidade (%)	10	Min. 10

**TAB. 3.6 Composição química do Alumínio 5052 H34.**

Elemento	Concentração (%)	Especificação (%)
Mg	2,25	Min. 2,20 Max. 2,80
Fe	0,32	Máx. 0,40
Cr	0,16	Min. 0,15 Máx. 0,35
Si	0,20	Máx. 0,25
Cu	0,01	Máx. 0,10
Zn	0,01	Máx. 0,10
Ga	0,01	Máx. 0,05

### 3.1.6 COLA

Para a colagem das camadas, será utilizada a cola de Cura Rápida (FIG. 3.3), da Marca ULTRAFLEX.



**FIG. 3.3 Cola Cura Rápida, Marca ULTRAFLEX.**

### 3.1.7 PLASTILINA

A plastilina trata-se de uma massa de modelar CORFIX® (FIG. 3.4 a, b), que é um produto não tóxico, não ressecante, inodora, de cor “branco 301”. O fabricante é a Indústria de Tintas CORFIX LTDA, localizada em Porto Alegre-RS. A massa para modelar (plastilina), disponível comercialmente, possui densidade aproximada de 1,07 g/cm<sup>3</sup>. A plastilina tem como finalidade principal simular uma estrutura que tenha uma consistência similar a do corpo humano.



**FIG. 3.4 Massa de modelar CORFIX inserida no suporte de tiro totalmente preenchido com a plastilina.**

## 3.2 MÉTODOS UTILIZADOS

### 3.2.1 ANÁLISE TÉRMICA – ANÁLISE DINÂMICO-MECÂNICA (DMA)

Para o ensaio de DMA, os corpos de prova foram fabricados com formatos retangulares, nas dimensões 50 x 13 x 5 mm dos compósitos poliéster-juta, com fração volumétrica de tecido de juta de 0, 10, 20 e 30%, sendo três corpos de prova para cada fração volumétrica de tecido.

A norma utilizada no ensaio foi ASTM D4065 (2006). O equipamento forneceu as seguintes curvas: o módulo de armazenamento ( $E'$ ), módulo de perda ( $E''$ ) e a tangente delta ( $\delta\delta$ ). As amostras foram ensaiadas no equipamento (FIG. 3.5) de DMA TA Instruments modelo operacional Q800, pertencente ao Instituto de Macromoléculas da UFRJ (IMA/UFRJ). Os parâmetros de ensaio foram:

Modo: flexão 3 pontos;

Frequência: 1 Hz;

Taxas de aquecimento: 3°C/min;

Intervalo de temperatura: temperatura ambiente até 200 °C;

Atmosfera: nitrogênio.



**FIG. 3.5** Equipamento de ensaio para DMA.

## 3.2.2 ENSAIOS MECÂNICOS

### 3.2.2.1 ENSAIOS DE IMPACTO CHARPY E IZOD

Para a confecção dos corpos de prova para os ensaios de Charpy e Izod, os compósitos reforçados com tecido de juta foram preparados nas proporções de 0, 10, 20 e 30% em volume de tecido utilizando uma matriz metálica com dimensões 120 x 150 x 10 mm (FIG 3.6), pertencente ao laboratório de fibras do IME.



**FIG 3.6** Matriz metálica utilizada na preparação das placas de compósito poliéster-juta.



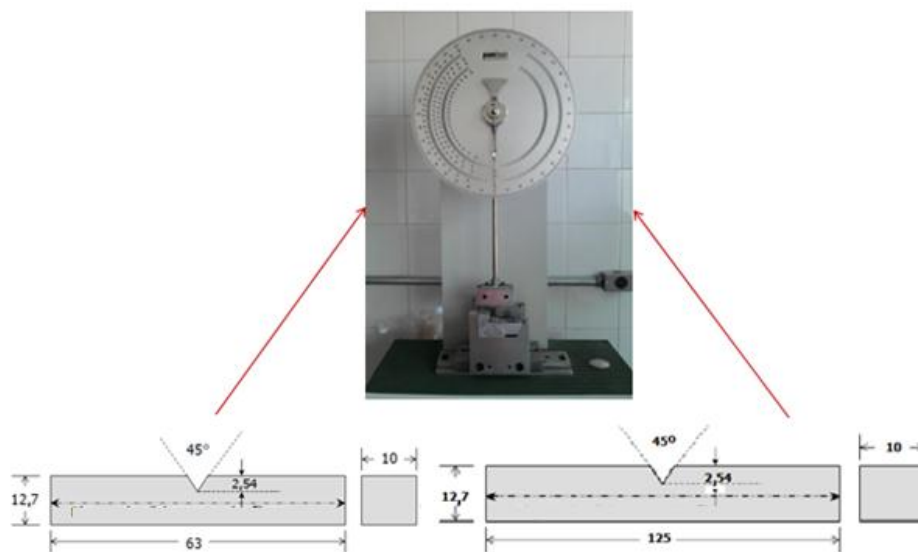
O tecido de juta foi colocado em camadas na matriz. Posteriormente, foi vertida a resina poliéster (ainda em estado líquido) sobre o tecido. A matriz foi fechada e colocada sob uma pressão de cinco toneladas por um período de 24 horas (tempo de cura do compósito), conforme ilustrado na FIG. 3.7. Para cada ensaio foram feitos dez corpos de prova para cada fração volumétrica de tecido de juta, totalizando oitenta corpos de prova.



**FIG. 3.7** Etapas da preparação do material compósito: (a) matriz metálica, tecido de juta, resina poliéster e catalisador; (b) as fibras dentro da matriz junto à resina poliéster ainda líquida; (c) matriz fechada; (d) prensagem da matriz metálica.

Após a preparação das placas dos compósitos, os mesmos foram cortados e lixados nas dimensões 63 x 12,7 x 10 mm (FIG. 3.8b) para o ensaio de Izod e 120 x 12,7 x 10 mm (FIG. 3.8c) para o ensaio de Charpy, de acordo com as normas ASTM D6110 (2010) e ASTM D256 (1997).

Os corpos de prova foram ensaiados no pêndulo instrumentado PANTEC (FIG. 8a), pertencente ao laboratório de fibras do LAMAV (UENF), com o martelo de 11 J para Izod e martelo de 11 J para Charpy. Para cada fração volumétrica de tecido de juta, foram utilizados dez corpos de prova.



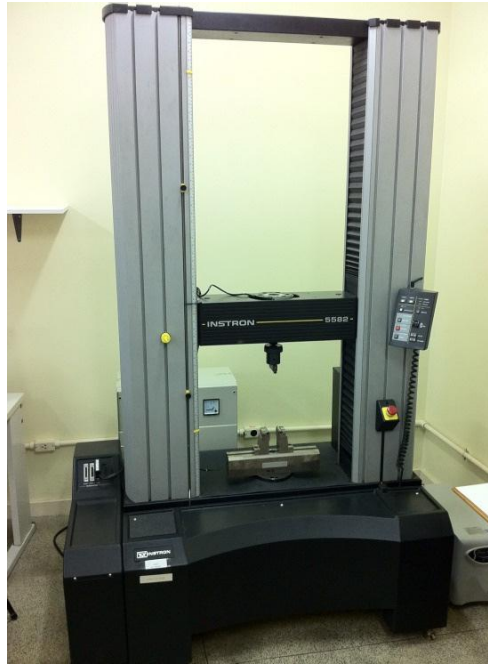
**FIG. 3.8 (a) Pêndulo PANTEC; corpos de prova: (b) Izod e (c) Charpy. Adaptado de ASTM D256 e ASTM D6110**

### 3.2.2.2 ENSAIOS DE FLEXÃO

Para os ensaios de flexão, foram preparados dez corpos de prova dos compósitos poliéster-juta com variação na fração volumétrica de tecido em 0, 10, 20 e 30 vol.%, totalizando quarenta corpos de prova. No ensaio de flexão, foi utilizada uma matriz metálica com dimensões 150 x 120 x 6 mm.

Inicialmente, foi vertida a resina poliéster (ainda em estado líquido) sobre o tecido de juta. A matriz foi fechada e colocada sob uma pressão de cinco toneladas

por um período de 24 horas (tempo de cura do compósito). Por fim, os compósitos foram cortados (ensaio de flexão) e lixados, de acordo com a norma ASTM D 790 (2015). Na FIG 3.9 é mostrada a máquina de ensaios Universais da Instron (modelo 5582) utilizada tanto para o ensaio de flexão, pertencente ao Laboratório de Materiais (LAMAV) da UENF.



**FIG. 3.9** Máquina Instron configurada para ensaio de flexão em três pontos.

Para o ensaio de flexão, foi utilizada a técnica de flexão em três pontos, com taxa de deformação de 0,5 mm/min e capacidade de 100 kN. Através desse ensaio, foi possível determinar a tensão máxima a flexão ( $\sigma_m$ ) dos compósitos utilizando a seguinte equação:

$$\sigma_m = \frac{3LQ_m}{2bd^2} \quad \text{EQ 3.1}$$

Sendo:

$Q_m$  – carga máxima;

L – a distância entre os suportes;

b; d – largura e espessura.



### 3.2.2.3 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Após os ensaios mecânicos (Charpy, Izod e flexão), com o objetivo analisar a superfície de fratura do compósito poliéster-juta, foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) FEI Quanta FEG 250 (FIG. 3.10), utilizando elétrons secundários. A análise foi realizada no IME.



**FIG. 3.10** Microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta FEG 250.

### 3.2.3 CONFECÇÃO DA BLINDAGEM MULTICAMADA

Para os ensaios balísticos, realizou-se a confecção dos corpos de prova da blindagem multicamada na condição de menor peso (camada frontal de  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5$ , com 7 mm de espessura) e para blindagem multicamada tendo como camada frontal  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5+\text{Y}_2\text{O}_3$  (FIG. 3.11): pastilhas cerâmicas (formato hexagonal), compósito poliéster-juta (formato quadrado) e placa de alumínio 5052 H34.

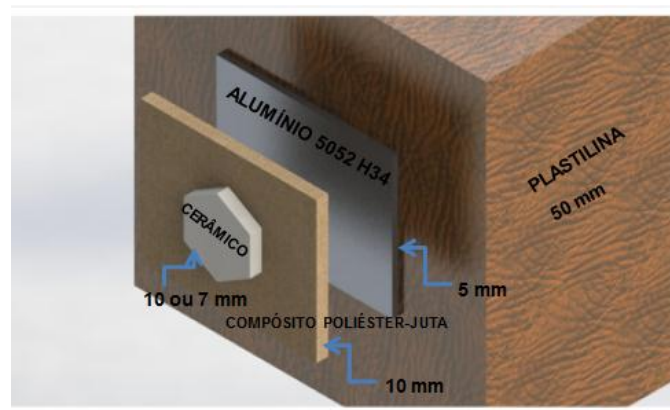


FIG. 3.11 Esquema do sistema blindagem multicamada.

Para a confecção do colete balístico tendo como o sistema de blindagem multicamada foi utilizado um mosaico cerâmico de  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5$  e uma placa do compósito reforçado com tecido de juta (FIG. 3.12).

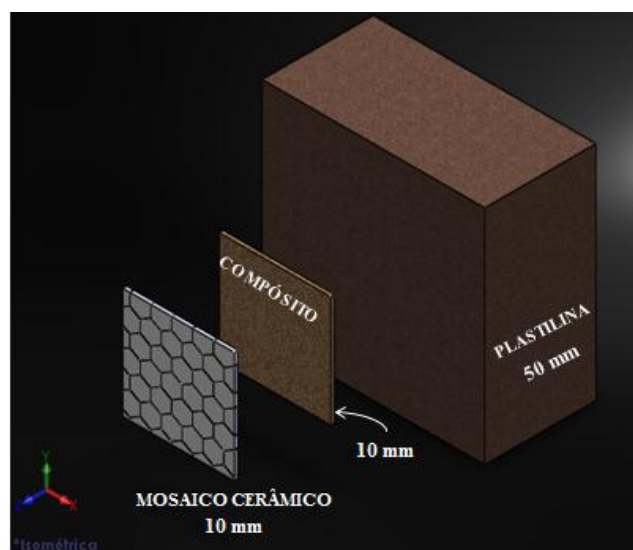


FIG. 3.12 Esquema do sistema blindagem multicamada.

### 3.2.3.1 FABRICAÇÃO DAS PASTILHAS CERÂMICAS

As pastilhas cerâmicas utilizadas nos ensaios balísticos apresentaram duas espessuras: 10 e 7 mm. Para a confecção das pastilhas cerâmicas foram realizadas três etapas (GOMES *et al.*, 2014; CABRAL *et al.*, 2018; TRINDADE *et al.*, 2013; SANTOS, 2016):

#### 3.2.3.1.1 OBTENÇÃO DO PÓ

Para a fabricação das pastilhas cerâmicas de alumina dopada com nióbia, primeiramente foi realizada a preparação da mistura de pós de Alumina (700g, 94,53%p), de Nióbia (29,15g, 3,94%p) e o ligante PEG líquido (11,3g, 1,53%p), em seguida foram misturados em um moinho com bolas de alumina, modelo MA 500 (FIG. 3.13), durante 8 horas.

Para a fabricação das pastilhas cerâmicas de alumina dopada com nióbia e ítria, inicialmente foi realizada a preparação da mistura de pós de Alumina (680g, 89,53%p), de Ítria (37g, 5%p), de Nióbia (29,15g, 3,94%p) e o ligante PEG líquido (11,3g, 1,53%p), em seguida foram misturados em um moinho com bolas de alumina, modelo MA 500 (FIG. 3.13), durante 8 horas.



**FIG. 3.13 Moinho de bolas MARCONI MA500.**

Após a moagem, a mistura foi colocada em estufa para secagem à temperatura de 100°C, durante 8 horas. Depois desta etapa, o pó foi desaglomerado em almofariz com pistilo e peneirado em uma peneira com abertura de 0,355 mm. Os equipamentos mencionados acima se encontraram disponíveis no laboratório de Cerâmica do IME.

### 3.2.3.1.2 PRENSAGEM

O pó cerâmico peneirado foi prensado em uma matriz hexagonal (FIG. 3.14), nas quantidades de 100g (pastilha com 10 mm de espessura), para  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5+\text{Y}_2\text{O}_3$ , e 70g (pastilha com 7 mm de espessura), somente para  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5$ . Uma carga de 12 toneladas, equivalente a 30 MPa foi aplicada, com o auxílio da prensa hidráulica semiautomática NOWAK (FIG. 3.15), disponível no laboratório de Fundição e Tratamentos Termomecânicos do IME.



**FIG. 3.14** Matriz utilizada na moldagem dos corpos cerâmicos.



**FIG. 3.15 Prensa hidráulica semiautomática NOWAK, com capacidade para 30 toneladas.**

#### 3.2.3.1.3 SINTERIZAÇÃO

As pastilhas cerâmicas de  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5$  (corpos verdes) foram sinterizadas no forno INTI, modelo FE 1700 (FIG. 3.17). A rota de sinterização é especificada abaixo e já foi utilizada por outros autores (TRINDADE *et al.*, 2013; DA LUZ *et al.*, 2015; DA CRUZ, 2015; NASCIMENTO, 2017; DA LUZ, 2018):

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

As placas cerâmicas resultantes deste processamento, utilizando matérias primas dos mesmos fornecedores, já tiveram suas propriedades físicas caracterizadas (retração linear, massa específica e densificação) por outros autores

(GOMES, 2004; CABRAL, 2011; TRINDADE, 2012; CHAGAS, 2014; DA SILVA, 2014b; ASSIS, 2016)

As pastilhas cerâmicas de  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5+\text{Y}_2\text{O}_3$  (corpos verdes) foram sinterizadas no forno INTI, modelo FE 1700 (FIG. 3.16). A rota de sinterização é especificada abaixo (CABRAL, 2011):

- (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 1500°C a uma taxa de 5°C/min;
- (6) Aquecimento de 1500°C até 1550°C a uma taxa de 3°C/min
- (6) Patamar de sinterização a 1550°C por 3h, e resfriamento no forno.



**FIG. 3.16 Forno INTI FE 1700, utilizado na sinterização das pastilhas cerâmicas.**

Para a cerâmica  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5+\text{Y}_2\text{O}_3$ , foram calculadas a densidade (EQ 3.1), a densificação (EQ 3.2) e retração linear (EQ 3.3) das pastilhas cerâmicas.

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

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

Sendo:

$\rho$  → densidade teórica do material;

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

$m$  → massa da amostra (g);

$V$  → volume da amostra ( $\text{cm}^3$ ).

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

Sendo:

$e_{\text{verde}}$  → espessura do corpo verde;

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



### 3.2.3.2 FABRICAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Os corpos de prova dos compósitos reforçados com tecido de juta foram preparados na proporção de 30 vol.%, totalizando 15 corpos de prova, um para colete balístico e quatorze para os sistemas de blindagem multicamada.

A matriz utilizada para a prensagem das placas do compósito está apresentada na FIG. 3.8. As dimensões internas dessa matriz são de 12 x 15 cm, como as placas devem apresentar 1 cm de espessura, o volume final para a placa confeccionada é de 180 cm<sup>3</sup>. Uma vez que a fração volumétrica de tecido é de 30%, então, o volume ocupado foi de 54 cm<sup>3</sup>. De acordo com a literatura (MONTEIRO *et al.*, 2011), a massa específica utilizada para a fibra de juta foi de 1,3 g/cm<sup>3</sup>, logo, a quantidade de massa, de tecido utilizado, foi em torno 70,2 g para 30% . Para a resina poliéster, a densidade utilizada foi de 1,10g/cm<sup>3</sup> e considerando a perda de resina na etapa de prensagem dos corpos de prova, foi utilizada uma massa de resina de 200 g. O procedimento da produção dos compósitos é o mesmo que o descrito na seção 3.2.2.1.

A confecção da placa do compósito (FIG. 3.17) utilizado no colete balístico foi realizada em parceria com a empresa BARRACUDA LTDA. As dimensões da placa são 30 x 30 x 1 cm.



**FIG. 3.17** Placa do compósito utilizado no colete balístico.



### 3.2.3.3 COLAGEM DAS CAMADAS

A preparação do corpo de prova (FIG 3.18) utilizado no colete nível III foi realizada por meio da colagem das camadas do compósito e das pastilhas cerâmicas de  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5$ , utilizando-se cola de cura rápida ULTRAFLEX, que não interfere nos testes.



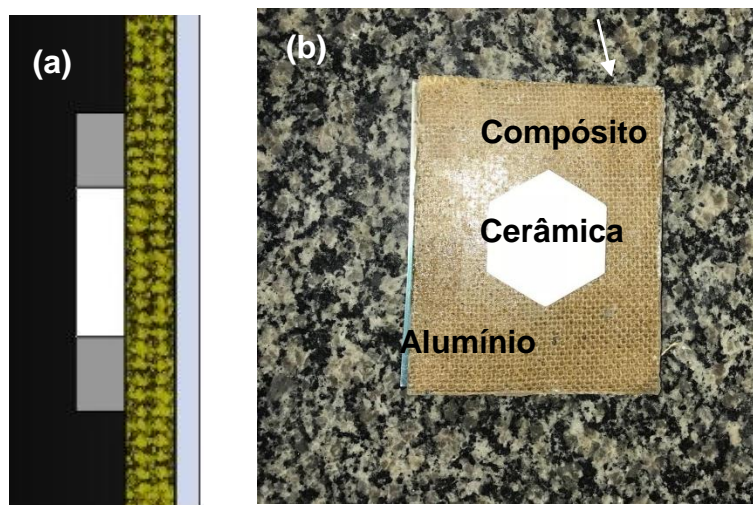
**FIG. 3.18 Colagem das camadas do mosaico cerâmico e do compósito reforçado com tecido de juta.**

Na FIG. 3.19 é mostrado um agente das forças armadas utilizando colete balístico tendo como material de proteção a blindagem multicamada com o compósito reforçado com tecido de juta.



**FIG. 3.19** Agente utilizando o colete balístico.

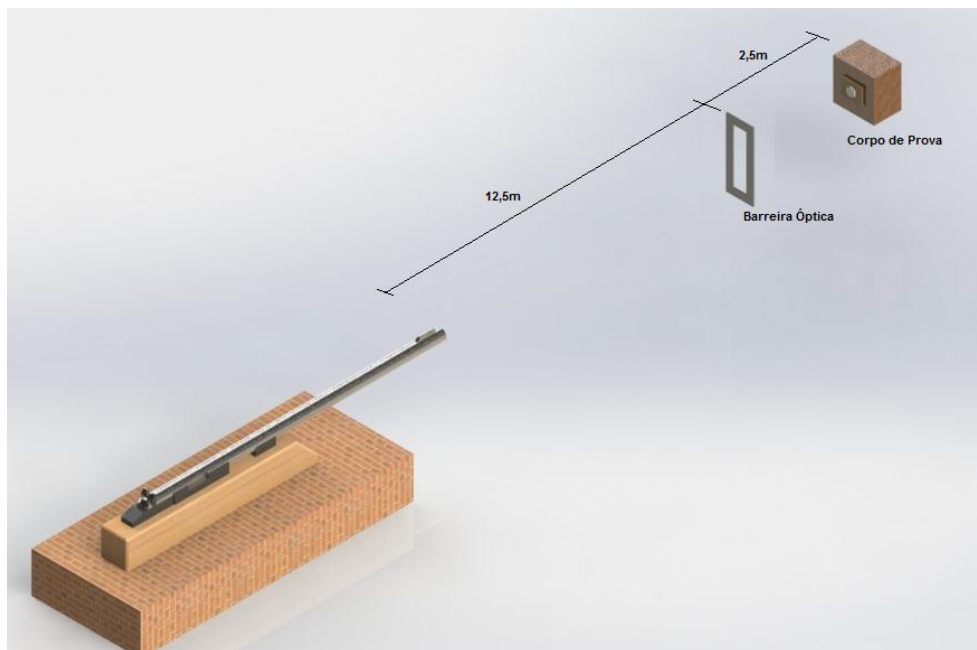
A preparação dos corpos de prova da blindagem multicamada foi realizada por meio da colagem das camadas de alumínio, do compósito poliéster-juta e da cerâmica, utilizando cola de cura rápida ULTRAFLEX. Na FIG. 3.20 é mostrado o esquema de montagem de uma blindagem multicamada e o corpo de prova final obtido.



**FIG. 3.20** Blindagem multicamada: (a) Diagrama esquemático; (b) corpo de prova final utilizado nos ensaios balísticos.

### 3.2.4 ENSAIO BALÍSTICO

O ensaio balístico tem por objetivo verificar a capacidade de um material ou equipamento absorver a energia cinética de um projétil de alta velocidade. Para isto, foi realizado ensaio para a avaliação do nível da proteção balística alcançada pela blindagem multicamada, por medida da deformação provocada na plastilina pelo disparo (ensaio de deformação na plastilina). Os ensaios foram realizados no CAEx (Centro de Avaliações do Exército) que fica localizado na península de Marambaia no Rio de Janeiro. Todos os ensaios obedeceram à norma NIJ 0101.04 (2000), nos quais foram utilizados projéteis com calibre 7,62 x 51 mm. Na FIG. 3.21 é mostrado esquematicamente o sistema utilizado para a realização desses ensaios.



**FIG. 3.21 Esquema do sistema utilizado para os ensaios balísticos.**

### 3.2.4.1 ENSAIO DE DEFORMAÇÃO NA PLASTILINA

A velocidade do projétil foi medida através de uma barreira óptica e um sistema de radar Doppler (FIG. 3.22), modelo SL-520P, fabricante WEIBEL.



**FIG. 3.22 Radar Doppler.**

As condições gerais dos ensaios foram:

a) Munição: calibre 7,62 x 51 mm, conforme é fornecida comercialmente ao Exército. O seu projétil tem uma massa de 9,7g (FIG. 3.23);



**FIG. 3.23 Munição calibre 7,62 x 51 mm**

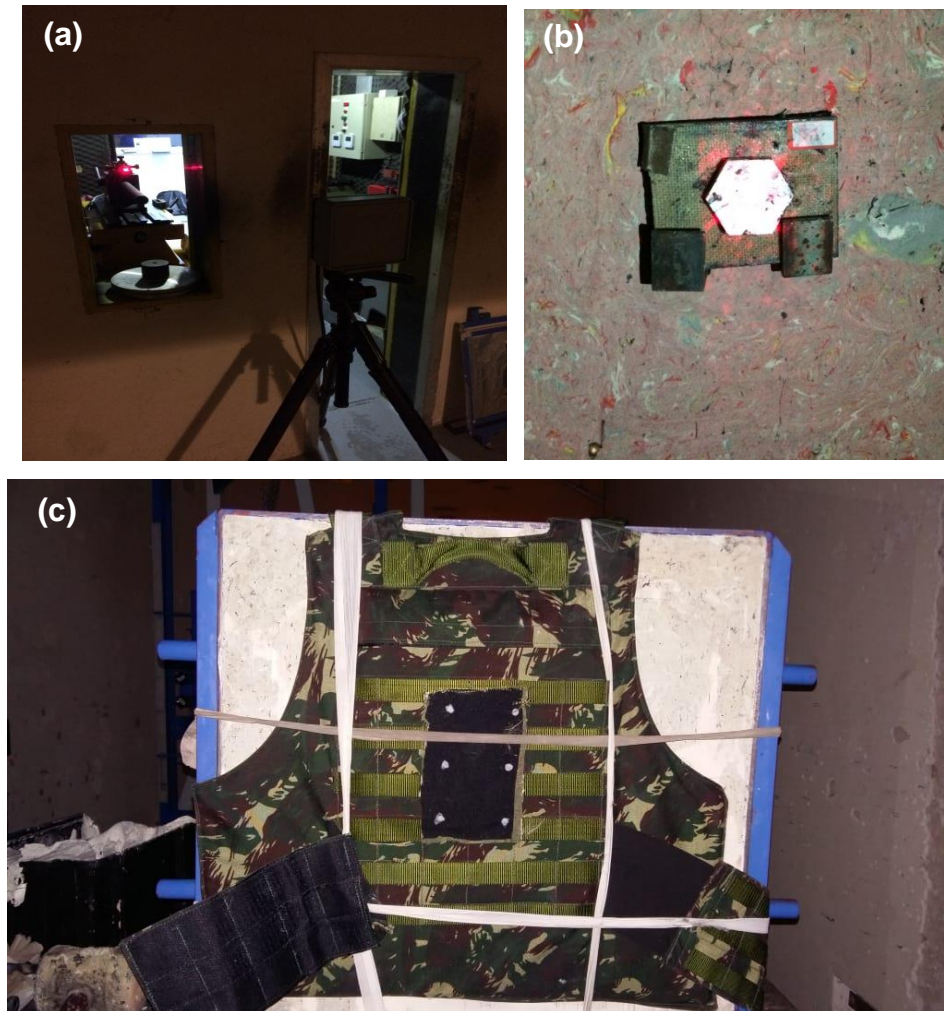
b) Distância do alvo (definida como a distância da boca da arma até o ponto de contato com o material a ser atingido): 15 metros, conforme prevê a norma ABNT NBR 15000 para as munições 7,62 x 51 mm;

c) Ângulo de incidência no alvo: 90°;

d) Quantidade total de tiros nos corpos de prova: 6 (seis) disparos no colete balístico; e 7 (sete) em cada configuração de blindagem multicamada;



e) Local: Centro de Avaliações do Exército (CAEx), linha de tiro IV, destinada aos testes que empregam armas e munições até o calibre .50". Para estes ensaios foi utilizado um provete calibre 7,62 x 51 mm (FIG. 3.24a) e um dispositivo de fixação do alvo (FIG. 3.24b e FIG. 3.24c).



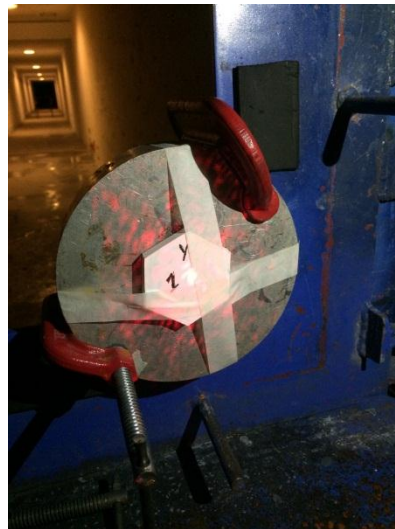
**FIG. 3.24 (a) Provete calibre com mira a laser; (b) blindagem multicamada e (c) colete posicionados na plastilina.**

O critério adotado neste trabalho para a caracterização da eficiência balística foi a medida da maior profundidade da deformação na massa de plastilina após o impacto. Foi considerada a blindagem multicamada eficiente se a mesma apresentar o valor igual ou menor a 44 mm, conforme prevê a norma americana NIJ 0101.04 (2000).

### 3.2.4.2 ENSAIO DE VELOCIDADE RESIDUAL

No ensaio de velocidade residual foi medida a velocidade do projétil antes e após o impacto da cerâmica  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5+\text{Y}_2\text{O}_3$  (FIG. 3.25) e com o auxílio do radar Doppler. Com os dados fornecidos pelo Doppler, foi possível calcular a energia do projétil e estimar a velocidade limite, utilizando a equação EQ 3.4, onde  $E_{abs}$  é a energia absorvida;  $m$  é a massa do projétil;  $V_i$  e  $V_r$  são as velocidades inicial e residual do projétil. Além disso, foram ensaiados oito corpos de prova da cerâmica.

$$E_{abs} = \frac{1}{2}m(V_i^2 - V_r^2) \quad \text{EQ 3.4}$$



**FIG. 3.25** Dispositivo de fixação da cerâmica no ensaio de velocidade residual.

### 3.2.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Após o ensaio balístico foi realizada avaliação microscópica dos fragmentos com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) FEI Quanta FEG 250 (FIG. 3.26), utilizando elétrons secundários. A análise foi realizada no IME.



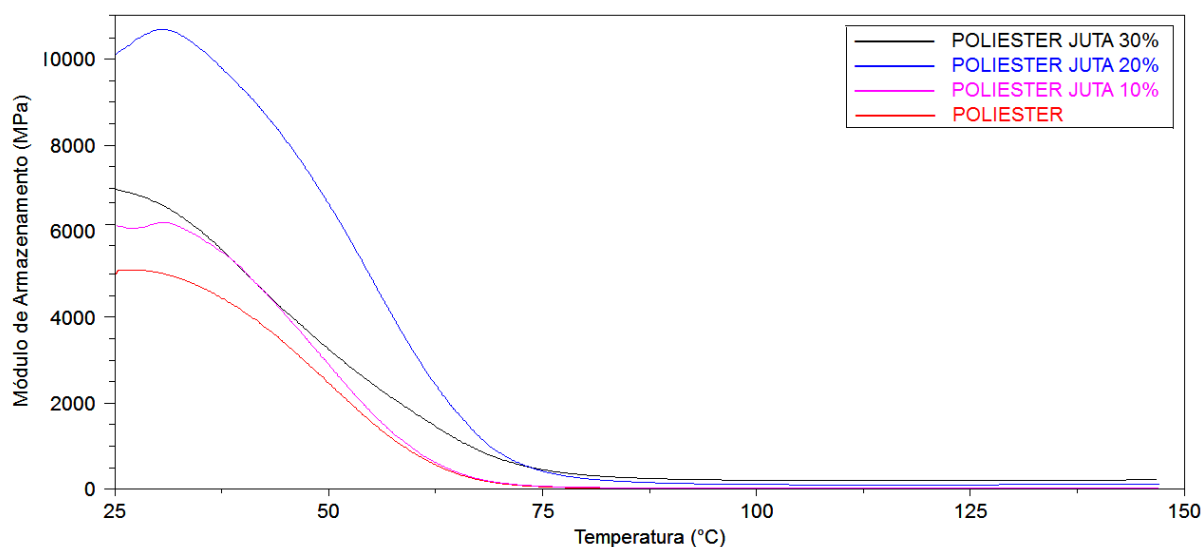
**FIG. 3.26 Microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta FEG 250.**

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISE TÉRMICA

#### 4.1.1 ANÁLISE DINÂMICO-MECÂNICA (DMA)

Na FIG 4.1 são apresentadas as curvas referentes ao módulo de armazenamento ( $E'$ ) da resina poliéster e os dos compósitos poliéster-juta.



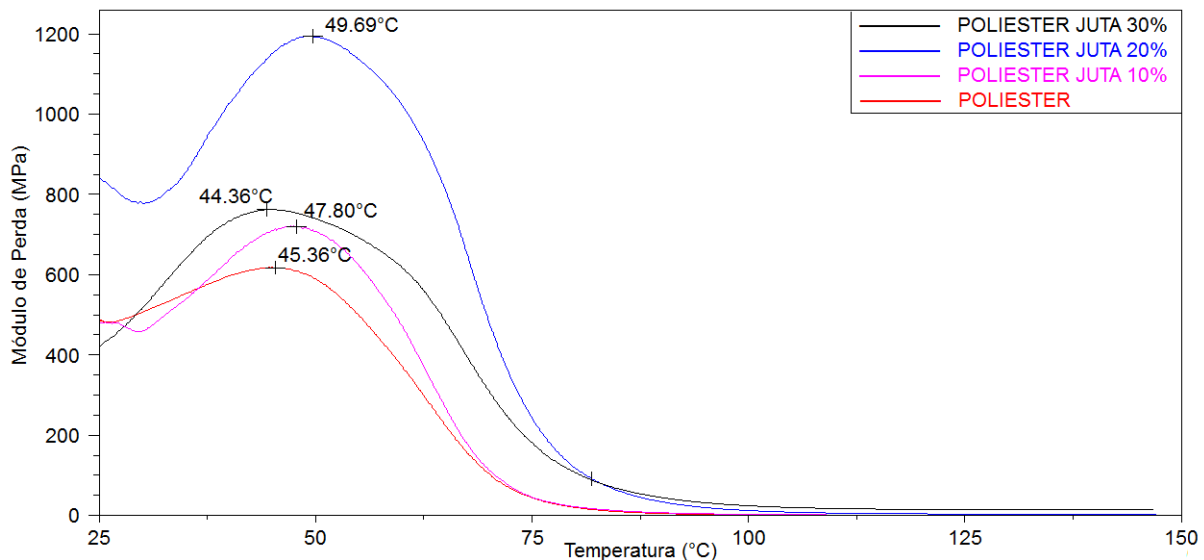
**FIG. 4.1** Curvas do módulo de armazenamento para resina poliéster e os compósitos poliéster-juta.

Conforme mostrado na FIG. 4.1, observa-se uma tendência de aumento no módulo de armazenamento ( $E'$ ) com a incorporação do tecido de juta ( $6120 < E' < 10130$  MPa) na matriz poliéster quando comparado com a resina pura ( $E' = 4960$  MPa), em temperatura ambiente. Essa propriedade representa a componente elástica da rigidez viscoelástica do material, sendo a energia mecânica que pode ser armazenada na forma de energia elástica ou potencial (FELISBERTI e CASSU, 2005). Com o aumento da temperatura, observa-se uma redução dessa propriedade, fato esse já esperado, conforme observado por outros autores que trabalharam com



compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas (CÂNDIDO, 2014; DRELICH *et al.*, 2016; PEREIRA, 2017; NASCIMENTO, 2017)

Na FIG 4.2 são apresentadas as curvas referentes ao módulo de perda ( $E''$ ) da resina poliéster e os dos compósitos poliéster juta.

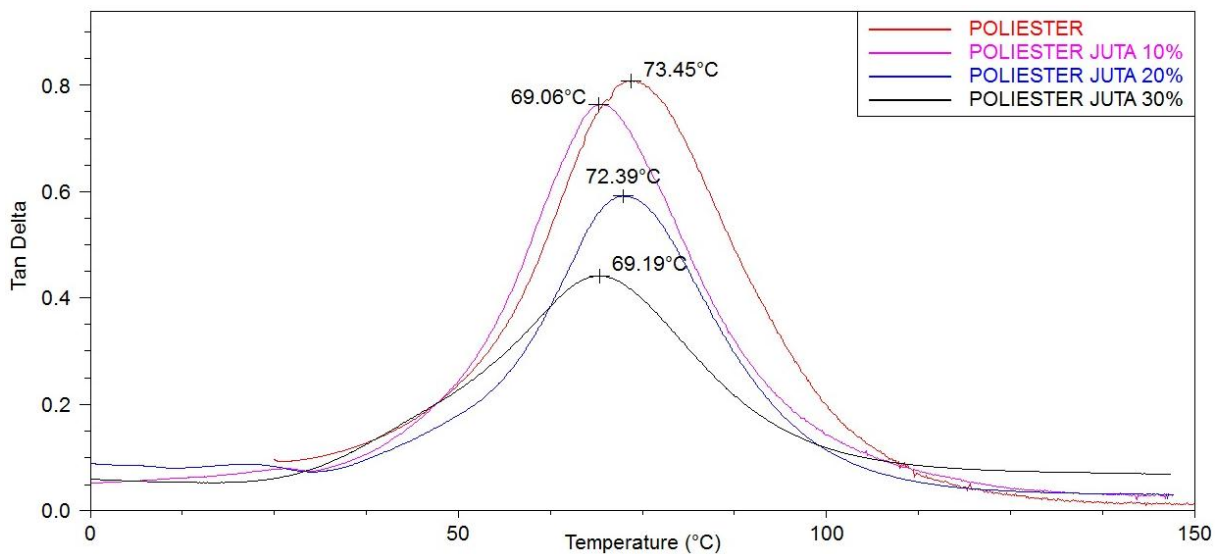


**FIG. 4.2** Curvas do módulo de perda para resina poliéster e os compósitos poliéster-juta.

Conforme mostrado na FIG. 4.2, observa-se que a incorporação do tecido de juta na matriz poliéster aumenta o módulo de perda ( $E''$ ) do material. Essa propriedade é diretamente proporcional ao calor dissipado por ciclo do material, sendo essa dissipação de calor atribuída vibração da cadeia principal e pela interação interfacial entre a matriz poliéster e fibra de juta. O maior valor de dissipação de calor, também chamado de pico de relaxação (FELISBERTI e CASSU, 2005; MOHANTY *et al.*, 2006), é alcançado neste material quando a matriz poliéster encontra-se na faixa da temperatura de transição vítrea.

Comparando a resina poliéster com os compósitos poliéster-juta, observa-se que a temperatura do pico de relaxação  $\alpha$  entre esses materiais é próxima (variando de 45,36° a 49,69 °C), mostrando que a incorporação do tecido de juta e sua interação interfacial com a matriz poliéster não alteram de modo significativo a temperatura de pico de relaxação do material, fato esse comum para compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas (CÂNDIDO, 2014; NASCIMENTO, 2017).

Na FIG 4.3 são apresentadas as curvas referentes à tangente delta ( $\tan \delta$ ) da resina poliéster e os dos compósitos poliéster-juta.



**FIG. 4.3** Curvas de tangente delta da resina poliéster e dos compósitos poliéster-juta.

A propriedade de tangente delta representa a temperatura de transição vítrea bem como o amortecimento estrutural interno do material; conforme mostrado na FIG. 4.3. Observa-se que a incorporação do tecido de juta na matriz poliéster não alterou de forma significativa a temperatura de transição vítrea do compósito. No entanto, houve uma redução do valor do amortecimento interno da matriz poliéster, fato esse evidenciado por CÂNDIDO (2014).

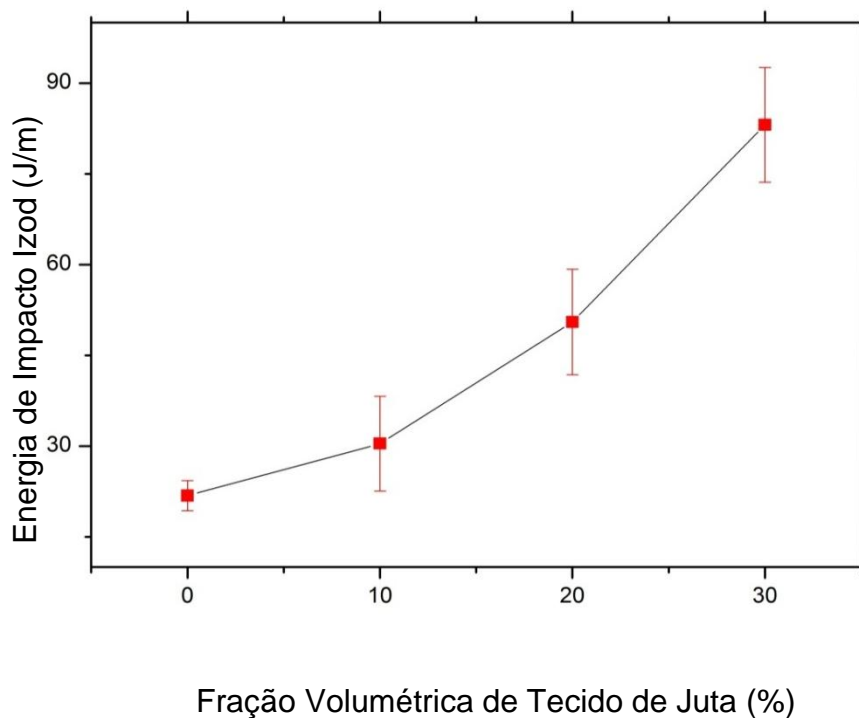
## 4.2 ENSAIOS MECÂNICOS

### 4.2.1 ENSAIO DE IMPACTO IZOD

Os resultados referentes ao ensaio de impacto Izod dos compósitos poliéster-juta são apresentados na TAB. 4.1. A partir da obtenção desses valores, foi possível plotar o gráfico (FIG. 4.4) relacionando a energia absorvida do compósito em função fração volumétrica de tecido de juta inserido na matriz poliéster.

**TAB. 4.1 Energia de Impacto Izod referente aos compósitos poliéster-juta.**

Fração Volumétrica de Tecido de Juta (%)	Energia de Impacto Izod (J/m)
0	$21,8 \pm 2,5$
10	$30,4 \pm 7,8$
20	$50,5 \pm 8,7$
30	$83,1 \pm 9,5$



**FIG.**

**4.4 Energia impacto Izod versus fração volumétrica de tecido de juta.**

A partir dos resultados apresentados na TAB. 4.1 e FIG. 4.4, foi possível observar que a incorporação de tecido de juta na matriz poliéster aumentou a resistência ao impacto Izod de 21,1 J/m (resina pura) até 83,1 J/m (30 vol. % de tecido de juta).

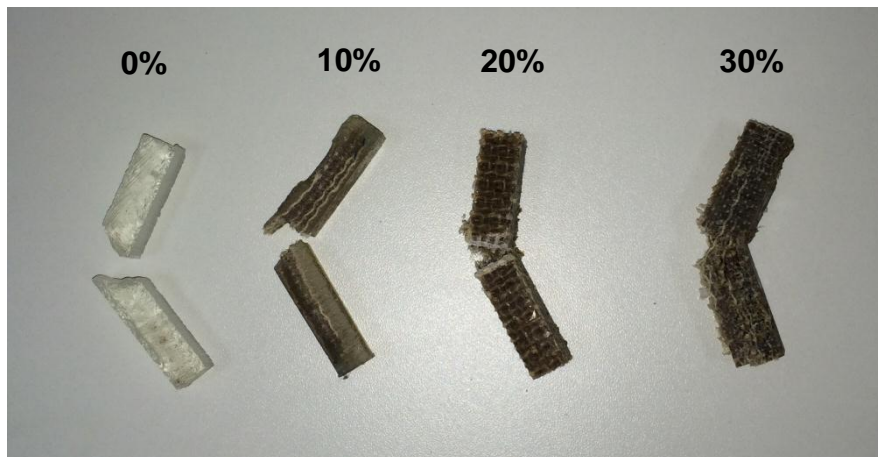
Através do ensaio impacto Izod, PEREIRA *et al.* (2017) e BRAGA *et al.* (2017c) analisaram a influência do tecido de fique e curauá em compósitos de matriz poliéster e evidenciaram que com o aumento da fração volumétrica de tecido de fique (PEREIRA *et al.*, 2017) e curauá (BRAGA *et al.*, 2017c) a tenacidade dos compósitos aumentaram, evidenciando também uma baixa dispersão (desvio padrão) dos resultados obtidos.

Foi possível observar que o aumento da energia de impacto do compósito poliéster em função da fração volumétrica de tecido de juta foi quase quadrático. Além disso, houve uma baixa dispersão dos resultados, mostrando assim, uma boa homogeneidade e distribuição do tecido de juta e a matriz poliéster, como fica evidenciado através dos parâmetros de Weibull (módulo de Weibull), que são mostrados na TAB.4.2.

**TAB. 4.2 Parâmetros de Weibull dos valores de energia absorvida dos compósitos poliéster-juta.**

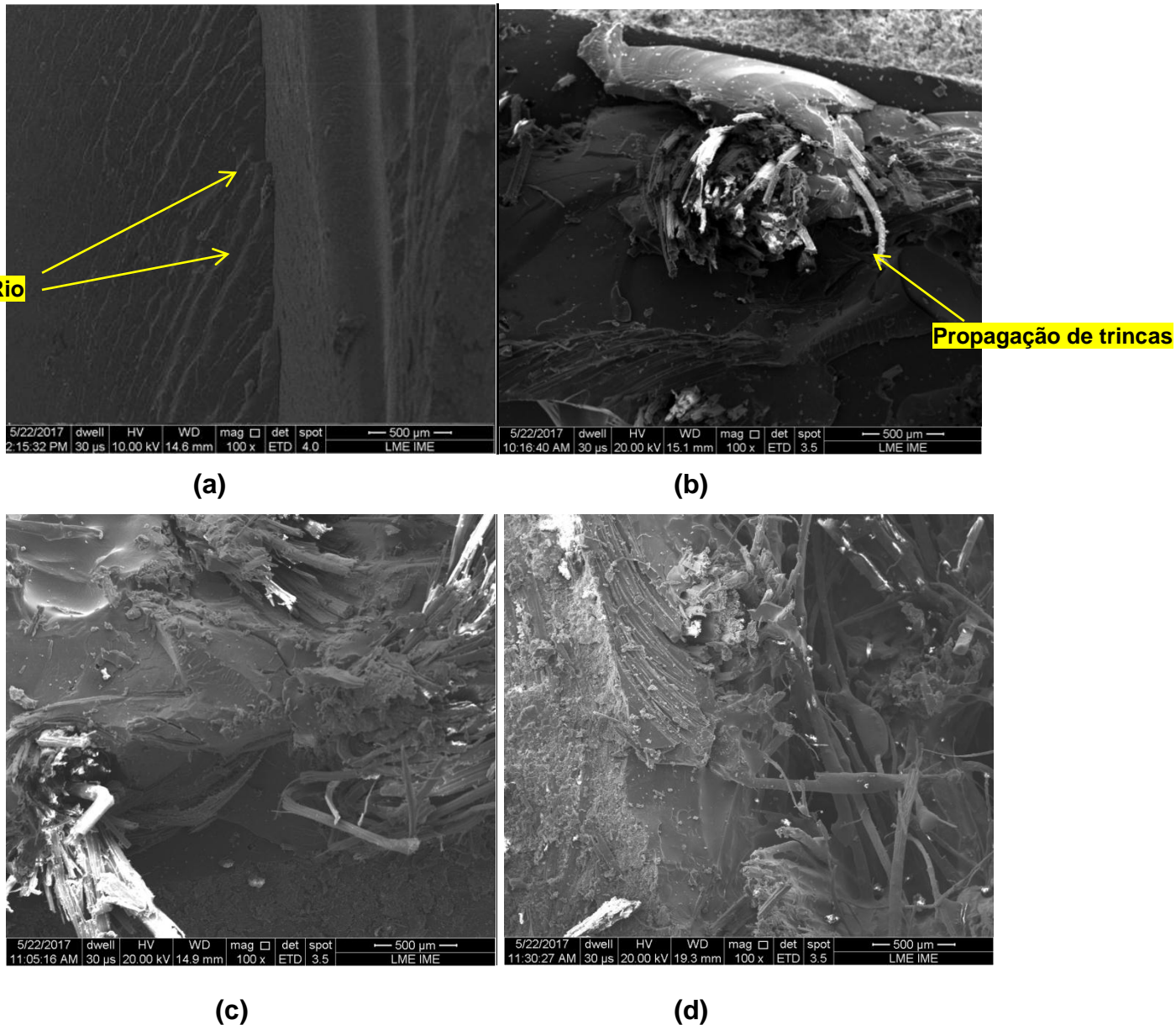
Fração Volumétrica de Tecido de Juta (%)	Módulo de Weibull ( $\beta$ )	Energia de Impacto Izod Característica ( $\theta$ )	Coefficiente de Correlação ( $R^2$ )	Energia de Impacto Izod Média (J/m)
0	8,35	23,8	0,9528	21,8 $\pm$ 2,5
10	6,41	33,7	0,9254	30,4 $\pm$ 7,8
20	7,32	55,1	0,9128	50,5 $\pm$ 8,7
30	8,21	87,3	0,9192	83,1 $\pm$ 9,5

Na FIG. 4.5 são mostrados os corpos de prova rompidos após o impacto Izod que a influência da incorporação de tecido de juta na matriz poliéster causa um comportamento de fratura distinto do compósito em comparação com o poliéster puro (0 vol.% tecido de juta). A resina pura e o compósito de poliéster reforçado com 10 vol.% foram fraturados facilmente após a passagem do martelo de Izod, enquanto que as frações de tecido de juta de 20 e 30 vol.% resistiram ao impacto, não sendo completamente rompidos, não validando os resultados segundo a norma, sendo os mesmos somente de caráter qualitativo.



**FIG. 4.5 Aspecto macroscópico dos compósitos poliéster-juta e da resina poliéster.**

Com auxílio do microscópio eletrônico de varredura, foi possível compreender, na superfície de fratura (FIG. 4.6), os mecanismos de absorção de energia que levaram ao aumento na tenacidade dos compósitos poliéster-juta.



**FIG. 4.6 MEV da resina poliéster (a) e dos compósitos poliéster-juta: (b) 10 vol.%, (c) 20 vol.% e (d) 30 vol. % de tecido de juta.**

O aspecto da fratura (FIG. 4.6a) é típico da matriz polimérica frágil de poliéster (CÂNDIDO, 2014; BOLZAN, 2016), ou seja, áreas rugosas e marcas de rio. Foi possível observar, também, que parte esquerda (FIG 4.6a) corresponde à

propagação da fissura por impacto transversal do martelo de Izod, a partir do entalhe do corpo de prova correspondente a parte direita da imagem.

A incorporação de tecido de juta (FIGs. 4.6b, 4.6c e 4.6d) em compósitos de matriz de poliéster altera a propagação de trincas que foi a propagação de trincas transversais (resina pura) à propagação longitudinal de trincas na interface entre a matriz de tecido de juta poliéster devido à fraca adesão entre a matriz poliéster e tecido de juta.

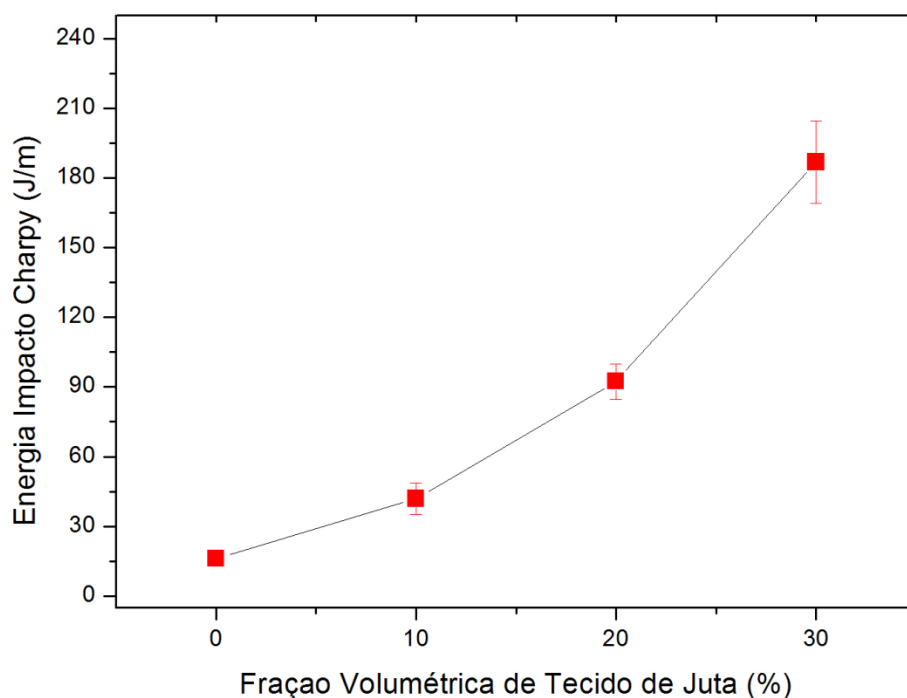
Isso pode ser explicado devido ao caráter hidrofílico do tecido de juta e contribuindo para o aumento na resistência à energia de impacto, sendo este comportamento característico de compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas (BLEDZKI e GASSAN, 1999; MOHANTY *et al.*, 2000; SATYANARAYANA *et al.*, 2007, MONTEIRO *et al.*, 2009; FARUK *et al.*, 2012; DA SILVA, 2014c).

#### 4.2.2 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

Os resultados referentes ao ensaio de impacto Charpy dos compósitos poliéster-juta são apresentados na TAB. 4.3. A partir da obtenção desses valores, foi possível plotar o gráfico (FIG. 4.7) relacionando a energia absorvida pelo compósito em função fração volumétrica de tecido de juta inserido na matriz poliéster.

**TAB. 4.3 Energia de Impacto Charpy referente aos compósitos poliéster-juta.**

Fração Volumétrica de Tecido de Juta (%)	Energia de Impacto Charpy (J/m)
0	16,2 ± 1,3
10	40,2 ± 6,6
20	92,9 ± 6,3
30	173,8 ± 17,6



**FIG.4.7 Energia de impacto Charpy versus quantidade de tecido de juta.**

A partir dos resultados apresentados na TAB. 4.3 e FIG. 4.7, foi possível observar que a incorporação de tecido de juta na matriz poliéster aumentou a resistência ao impacto do compósito de modo que, ao comparar resina poliéster sem reforço (16,1 J/m) com o compósito poliéster-juta com 30 vol. % de tecido de juta (186,8 J/m) houve um acréscimo em mais de dez vezes na absorção de energia de impacto Charpy. Outro fator a ser destacado está relacionado no aspecto quase linear no aumento da absorção de energia com o aumento na fração volumétrica de tecido de juta, bem como a baixa dispersão dos resultados, mostrando assim, uma boa homogeneidade e distribuição do tecido de juta e a matriz poliéster.

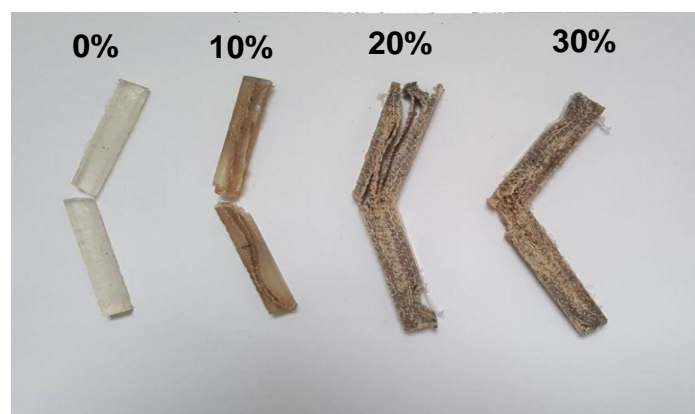
Na TAB. 4.4 são mostrados os resultados de Weibull referentes ao ensaio de impacto Charpy. Analisando o módulo de Weibull ( $\beta$ ) que representa o grau de dispersão dos resultados obtidos, os valores de energia absorvida obtidos para os compósitos poliéster-juta e a resina pura apresentaram baixa dispersão dos resultados (baixo desvio padrão), conseqüentemente apresentaram um alto valor para o módulo de Weibull. Quanto maior o valor desse parâmetro, mais próximo é o valor de energia de impacto Charpy característica ( $\theta$ ) do valor médio de energia de impacto Charpy.



**TAB. 4.4 Parâmetros de Weibull dos valores de energia absorvida dos compósitos poliéster-juta.**

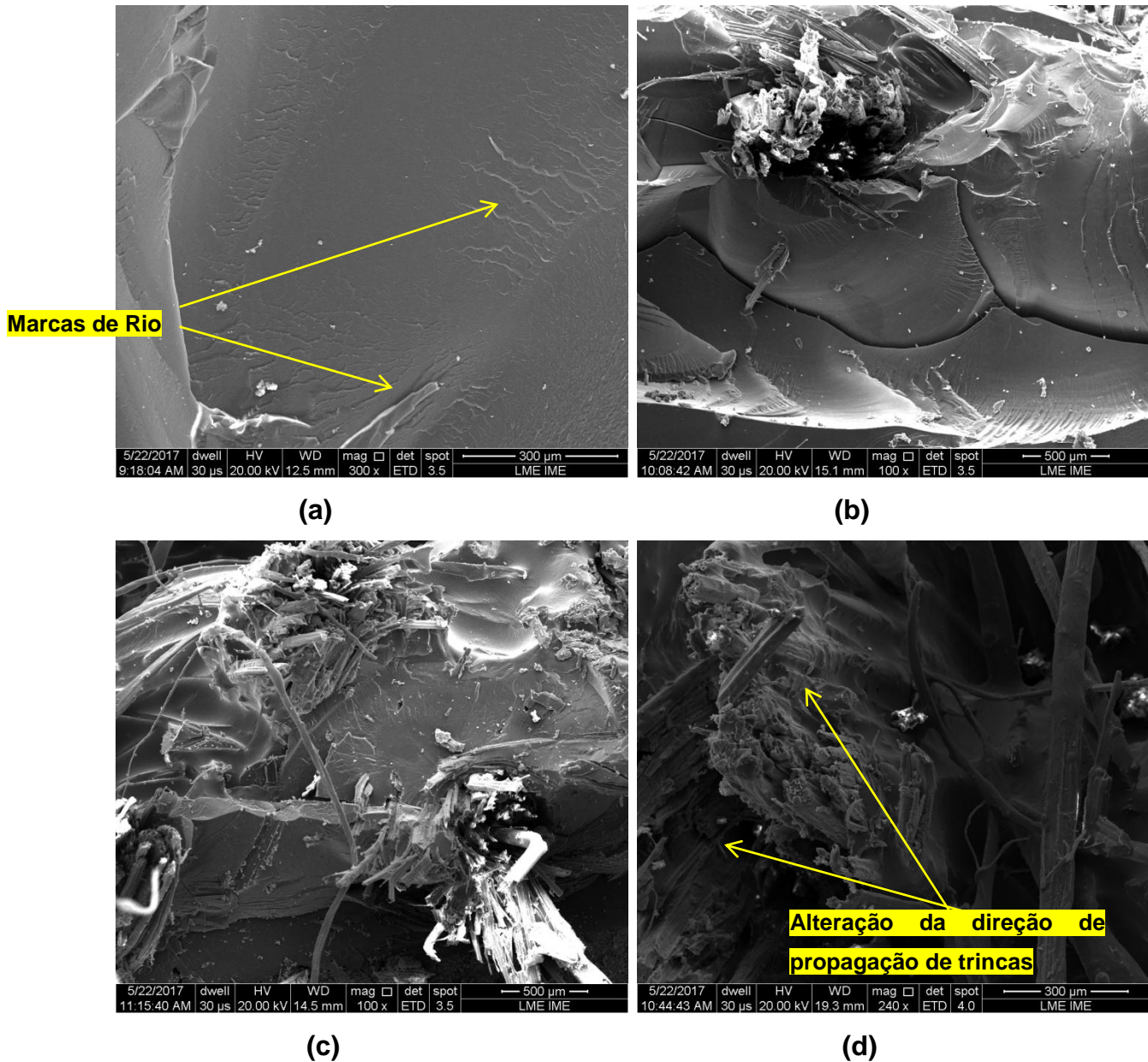
Fração Volumétrica de Tecido de Juta (%)	Módulo de Weibull ( $\beta$ )	Energia de Impacto Charpy Característica ( $\theta$ )	Coefficiente de Correlação ( $R^2$ )	Energia de Impacto Charpy Médio (J/m)
0	12,35	16,8	0,8728	16,2 ± 1,3
10	7,141	42,7	0,9464	40,2 ± 6,6
20	14,32	96,1	0,9370	92,9 ± 6,3
30	9,883	181,3	0,9674	173,8 ± 17,6

Na FIG. 4.8 são mostradas as imagens macroscópicas dos corpos de prova da resina poliéster pura e dos compósitos poliéster-juta após o ensaio de impacto Charpy. Foi possível observar que as amostras de resina pura (0% de tecido de juta) e do compósito poliéster reforçado com 10 vol.% de tecido romperam de maneira transversal seguindo a direção do martelo de ensaio de Charpy, ou seja, houve propagação de trincas na seção transversal das amostras. Já para os compósitos reforçados com 20 vol. % e 30 vol.% de tecido de juta, as amostras não romperam por completo, não validando os resultados segundo a norma, sendo os mesmos somente de caráter qualitativo. Foi possível observar que as amostras começaram a romper de maneira transversal, porém devido à quantidade de tecido e a boa resistência mecânica da fibra de juta (MONTEIRO *et al.*, 2011) ocorreu uma alteração na direção de propagação de trincas, mudando da direção transversal para longitudinal na interface tecido/poliéster. Essa mudança de direção contribuiu para o aumento da tenacidade do compósito poliéster-juta.



**FIG. 4.8 Aspecto macroscópico da resina poliéster e dos compósitos poliéster-juta após o ensaio de impacto Charpy.**

Na FIG 4.9 são mostradas as imagens obtidas do MEV referentes às superfícies de fratura dos compósitos, sendo possível compreender os mecanismos de absorção de energia dos compósitos poliéster-juta.



**FIG. 4.9 MEV da resina poliéster (a) e dos compósitos poliéster-juta: (b) 10 vol. %, (c) 20 vol. % e (d) 30 vol. % de tecido de juta.**

Através da FIG 4.9a, foi possível observar que as trincas se propagaram em sentido transversal a partir do entalhe da resina poliéster, formando “marcas de rio” que é um aspecto característico da fratura de resina termorrígida (matriz poliéster). Essa característica também foi constatada também outros autores (CÂNDIDO, 2014;

SILVA, 2014b; BOLZAN, 2016). Na FIG. 4.9b, foi possível observar que a propagação de trinca contornou o tecido de juta, de forma que o houve um aumento na resistência do compósito poliéster-juta reforçado com 10% de tecido, porém não impedindo o rompimento do corpo de prova, conforme observado na FIG. 4.8.

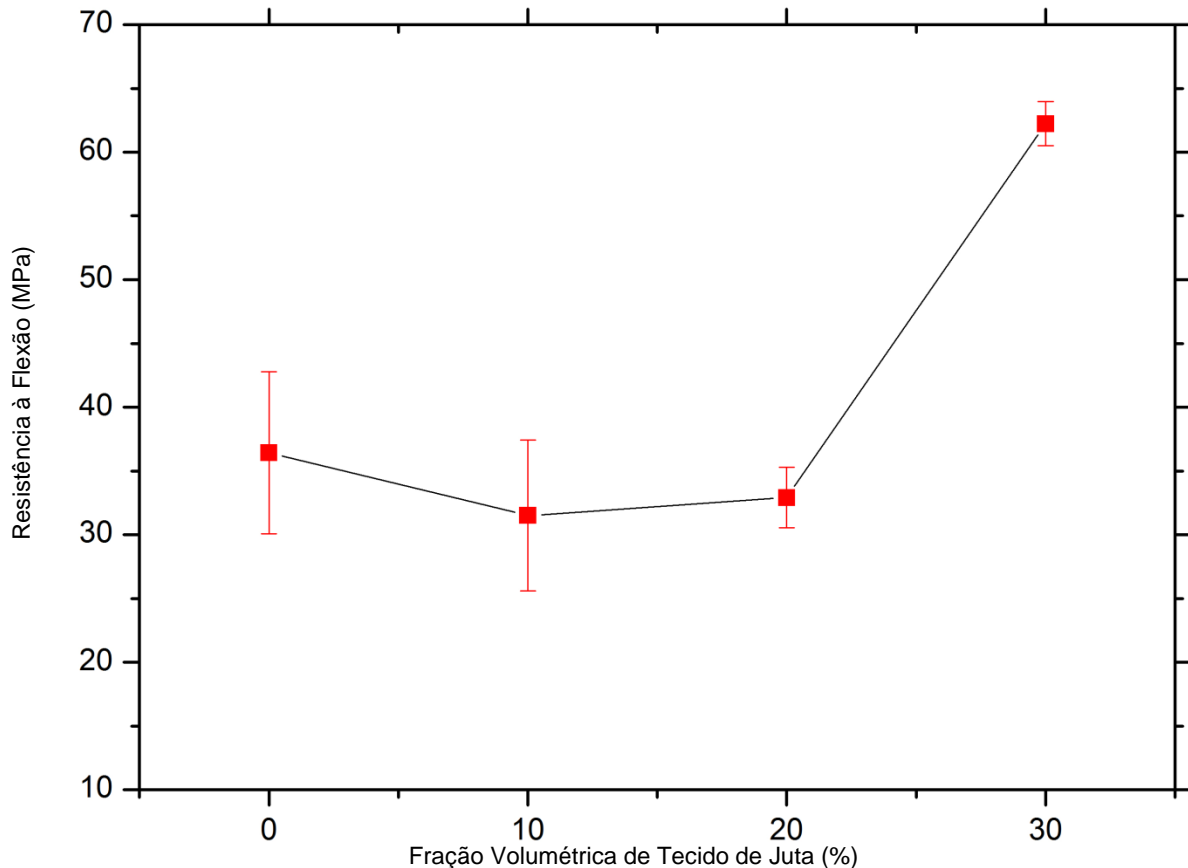
Nas FIG 4.9c e FIG 4.9d, foi possível observar uma maior área de propagação de trinca na região de fratura dos compósitos reforçados com 20 e 30 vol.% de tecido de juta, decorrente de uma maior energia de impacto para romper os corpos de prova. Observou-se, também, que devido a maior resistência do compósito poliéster-juta, ocorreu uma mudança na direção de propagação da trinca nos compósitos mudando de transversal para longitudinal, na região de interface entre o tecido de juta e matriz poliéster, indicando assim, uma baixa resistência interfacial do compósito. Esse efeito pode ser explicado devido à natureza hidrofílica do tecido de juta e da natureza hidrofóbica da matriz poliéster, conforme constatado por MONTEIRO *et al.* (2011).

#### 4.2.3 ENSAIO DE FLEXÃO

Os resultados referentes ao ensaio de flexão dos compósitos poliéster-juta são apresentados na TAB. 4.5, onde a partir desta foi possível plotar o gráfico (FIG. 4.10), relacionando a resistência à flexão com compósito em função fração volumétrica de tecido de juta inserido na matriz poliéster.

**TAB. 4.5 Resistência à flexão referente à resina poliéster e aos compósitos poliéster-juta.**

Fração Volumétrica de Tecido de Juta (%)	Resistência à Flexão (MPa)
0	36,28 ± 6,35
10	31,23 ± 5,91
20	32,92 ± 2,38
30	62,25 ± 1,73



**FIG.4.10 Resistência à flexão versus fração volumétrica de tecido de juta.**

Inicialmente, observa-se que com a adição de 10 e 20 vol. % de tecido juta na matriz poliéster, a resistência à flexão do compósito reduziu quando comparado a resina pura. Contudo, os valores do desvio padrão para essas três composições (0, 10 e 20 vol.% de tecido de juta) comprometem o grau de certeza no que diz respeito se o tecido de juta atuou como reforço na matriz, podendo eles apresentar valores de resistência à flexão estatisticamente iguais.~

A adição de 30 vol.% de tecido de juta na matriz poliéster aumentou de forma significativa (36 MPa para 62 MPa) a resistência à flexão do compósito, o que mostra que o tecido de juta atuou como bom reforço a matriz, principalmente em virtude dos mecanismos de fratura das fibras de juta tais como rompimento ou desfibrilamento das fibras, bem como seu descolamento das mesmas da matriz poliéster.

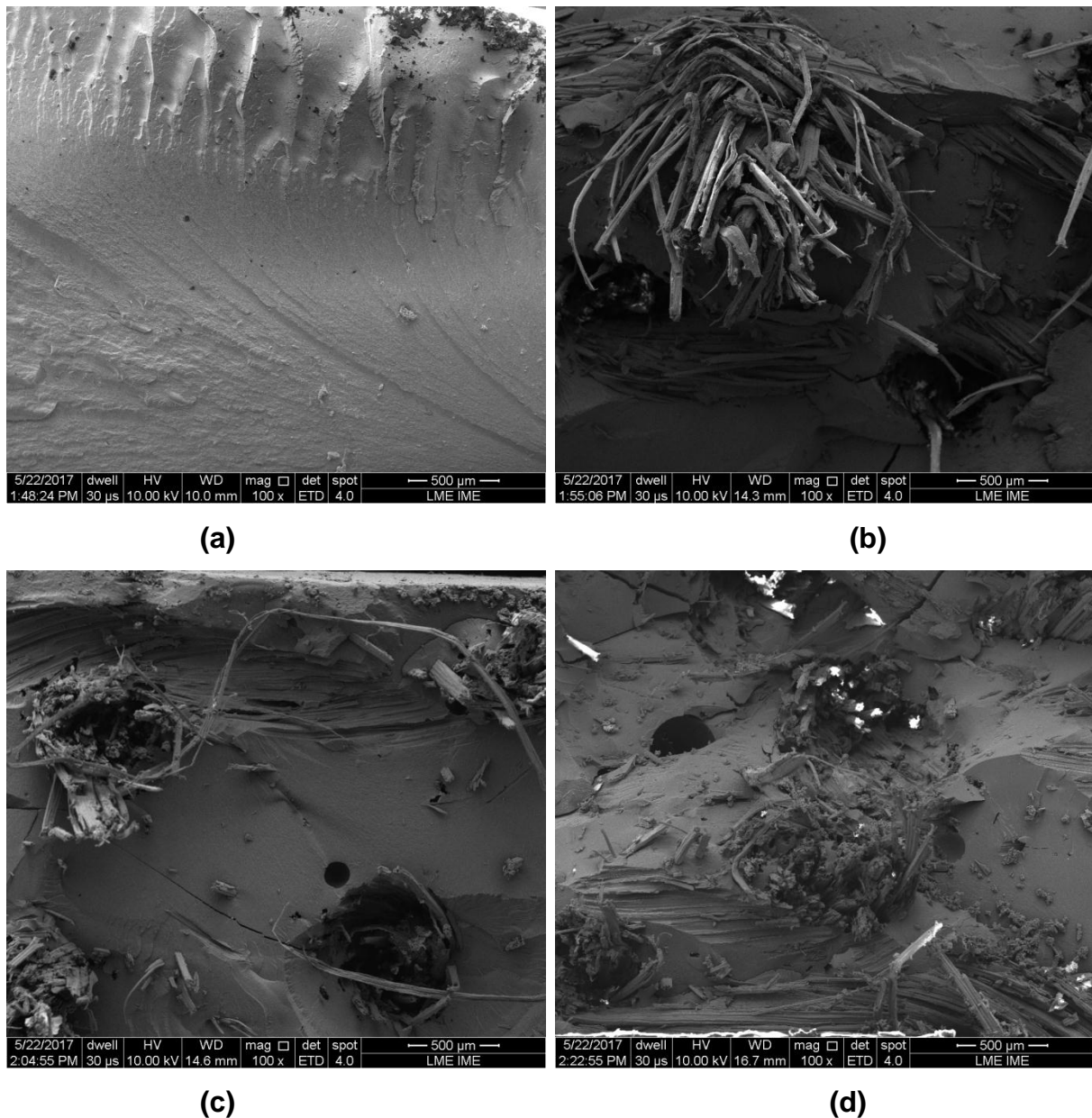
Na FIG. 4.11 são mostrados os corpos de prova fraturados dos compósitos poliéster-juta e poliéster puro. Nessa figura, podem ser observados os diferentes tipos de fratura indo de uma fratura frágil do poliéster puro que se rompeu em diferentes regiões quando o material atingiu os valores máximos de resistência à

flexão, até um tipo de fratura mais concentrada no ponto de ação do cutelo apresentada nos compósitos poliéster-juta, o que indica que a adição de tecido de juta na matriz poliéster concentrou o fratura em uma região específica do corpo de prova, evidencia essa, semelhante a apresentada por outros autores que trabalharam com compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais lignocelulósicas (NASCIMENTO, 2017; SIMONASSI, 2017).



**FIG. 4.11** Aspecto macroscópico dos corpos de prova de flexão rompidos dos compósitos poliéster-juta e poliéster puro.

Na FIG. 4.12 são mostradas as imagens obtidas do MEV das regiões fraturadas da resina poliéster e dos compósitos poliéster-juta após o ensaio de flexão.

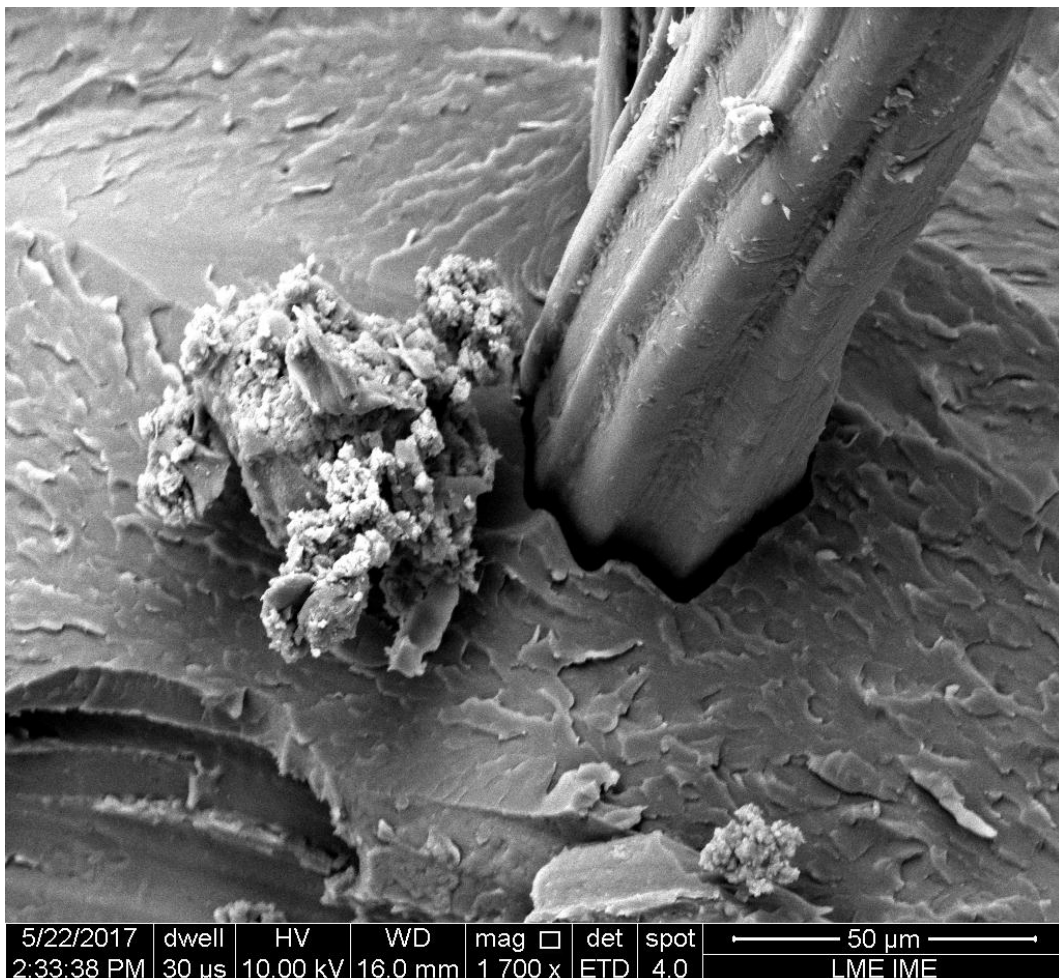


**FIG. 4.12 MEV da resina poliéster (a) e dos compósitos poliéster-juta: (b) 10 vol. %, (c) 20 vol. % e (d) 30 vol. % de tecido de juta.**

A partir das imagens obtidas no MEV (FIG. 4.12), foi possível observar que tanto a resina poliéster quanto os compósitos poliéster-juta apresentaram muitas áreas rugosas, de maneira que ao aumentar a quantidade de fração volumétrica de tecido de juta, as áreas rugosas aumentaram, obtendo-se maior resistência à flexão, principalmente no compósito reforçado com 30 vol. % de tecido de juta.



Foi possível observar, também, o descolamento do tecido de juta da matriz poliéster (FIG. 4.13), devido à baixa resistência interfacial poliéster/juta, sendo essa região um concentrador de tensão, a partir da qual as trincas propagaram até a ruptura do compósito, como pode ser observado em uma imagem ampliada (1700x) do compósito poliéster-juta evidenciando o mecanismo de descolamento do compósito. Essa fraca resistência interfacial pode ser explicada devido à característica hidrofílica do tecido de juta e à característica hidrofóbica da resina poliéster.



**FIG. 4.13 MEV do compósito poliéster-juta reforçado com 30 vol.% de tecido de juta.**

### 4.3 ENSAIOS BALÍSTICOS

#### 4.3.1 ENSAIOS BALÍSTICOS – COLETE BALÍSTICO

Nas FIG. 4.14 e FIG. 4.15 são mostrados o colete balístico, tendo como material de proteção à blindagem multicamada com a segunda formada pelo compósito polimérico reforçado com 30 vol.% de juta antes e após o disparo dos seis tiros. Os disparos foram realizados em regiões específicas do colete (FIG. 4.14), conforme a NIJ 0101.04 (2000).



**FIG. 4.14 Colete balístico antes dos disparos de munição 7,62 mm.**



**FIG. 4.15 Colete balístico após os disparos de munição 7,62 mm.**



Após o primeiro disparo (FIG. 4.16), foi verificada uma velocidade de impacto de 839 m/s, onde foi verificada também a profundidade de indentação média de 25,2 mm. Além disso, outro ponto importante analisado foi a integridade da blindagem multicamada, que permaneceu inalterada, principalmente a camada do compósito reforçado com o tecido de juta, mostrando que a fibra de juta na configuração de tecido, as regiões de encontro dos fios da trama proporcionaram distribuição de tensões em varias frentes de trincas de delaminação, aumentando energia de absorção de impacto.

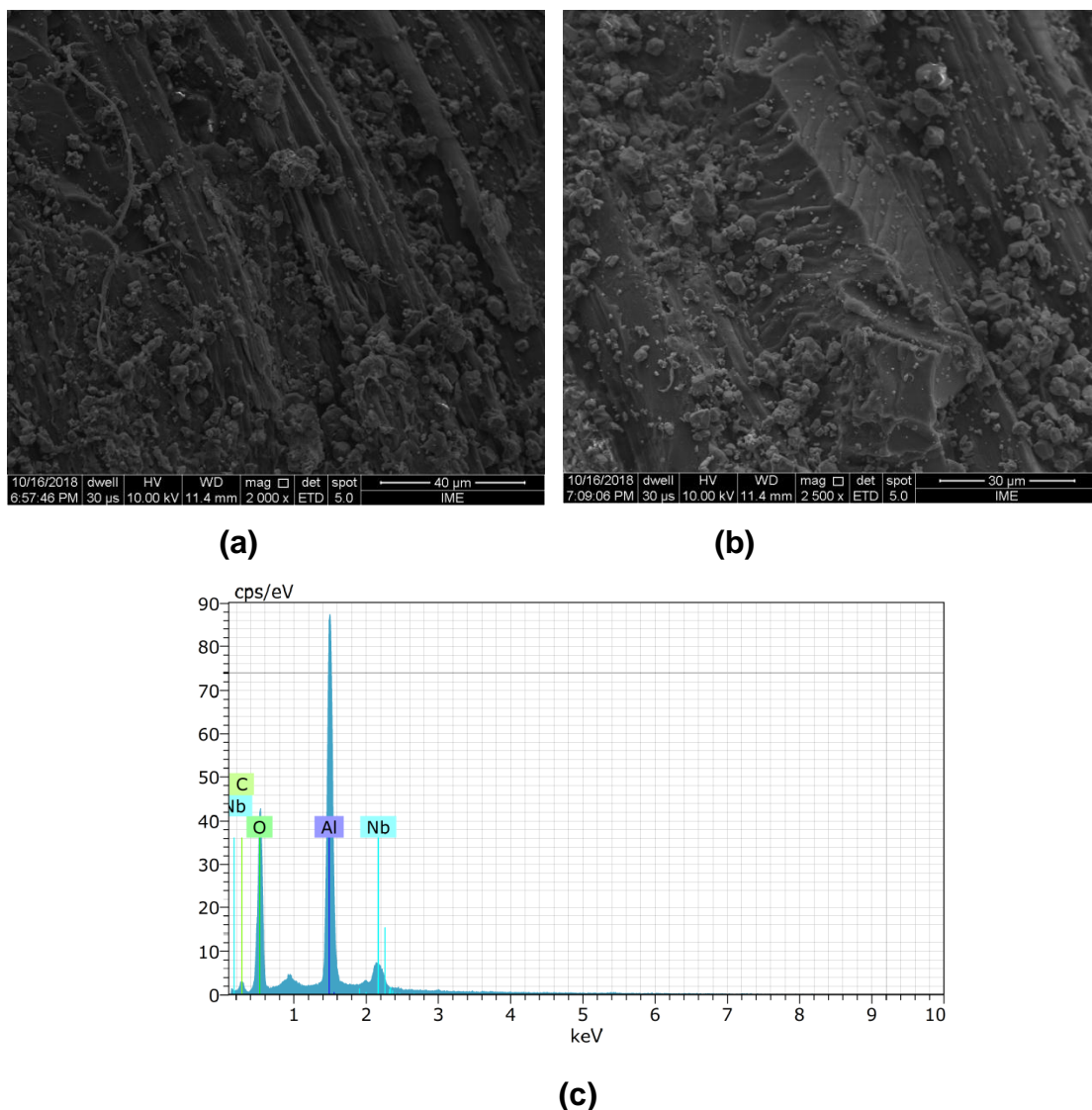
Caso o compósito não permanecesse íntegro, não seria possível realizar os outros cinco disparos visto que os disparos subsequentes teriam uma profundidade superior a 44 mm. Outro ponto a ser destacado foi a integridade do mosaico cerâmico que permaneceu íntegro, sendo somente destruída a cerâmica que resistiu ao impacto do projétil, ainda mais porque essa camada é responsável por absorver grande parte da energia provida do projétil, em torno de 55% (DA SILVA, 2014b).

Os disparos restantes foram seguidos, onde foram anotadas as suas velocidades de impacto. Em seguida, foi medida a profundidade de indentação na plastilina referente ao disparo do projétil que teve a maior velocidade de impacto, valor esse equivalente a 851,3 m/s, apresentando um valor médio de indentação de 20,2 mm, valor inferior ao estipulado pela norma NIJ 0101.04 (44 mm). Além disso, não houve penetração dos projéteis no colete balístico.



**FIG. 4.16 Colete balístico após o primeiro disparo.**

Após o ensaio balístico de deformação na plastilina, alguns fragmentos do compósito foram coletados para serem analisados através do MEV. Na FIG. 4.17 são mostradas imagens referentes ao compósito poliéster-juta. Na FIG. 4.17a é mostrada a superfície de fratura do material, observa-se que esta região ficou coberta por partículas cerâmicas (FIG. 4.17c), indicando que o compósito absorveu energia cinética dos fragmentos através do mecanismo de incrustação mecânica através das forças eletrostáticas ou forças de ligação secundárias, como a de Van der Waals. Esse mecanismo é característico dos compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas quando aplicadas como camada intermediária da blindagem multicamada (BRAGA *et al.*, 2018; ASSIS *et al.*, 2018).



**FIG. 4.17** Micrografia por MEV: (a) e (b) Partículas Cerâmicas na superfície do compósito (2000x e 2500x); (c) Espectro de EDS de um dos fragmentos cerâmicos.

Além disso, foi possível observar na região de fratura da matriz polimérica marcas de rio, sendo esse um mecanismo de fratura frágil característico em resinas termofixas (BOLZAN, 2016; NASCIMENTO, 2017; BRAGA *et al.*, 2018), atuando como um mecanismo de aumento na absorção de energia do colete.

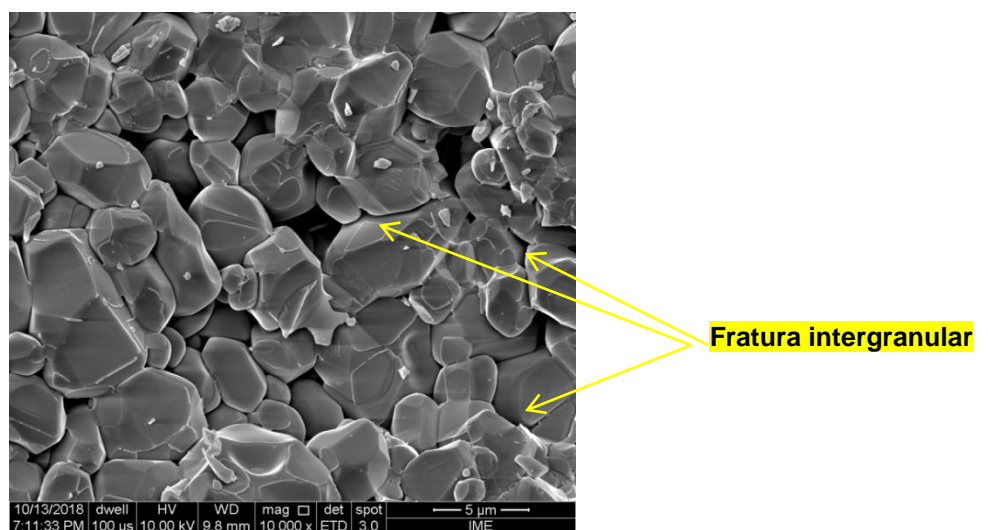
Um fator complicador deste colete está relacionado com a sua massa, tendo a camada do compósito uma massa em torno de 1050 gramas e a camada cerâmica uma massa de 3105 gramas; materiais utilizados para transformar um colete nível IIIA para um colete nível III com uma massa em torno de 4155 gramas. Esse valor é relativamente alto quando comparado com colete tendo o polietileno de ultra-alto peso molecular (Dyneema®) que apresenta uma massa em torno de 2220 gramas (FEIJÓ, 2002; DESHPANDE *et al.*, 2014)

#### 4.3.2 ENSAIOS BALÍSTICOS – BLINDAGEM MULTICAMADA COM CERÂMICA $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5$ COM 7 MILÍMETROS

Na FIG. 4.18 é mostrado o corpo de prova após o impacto do projétil. Foi possível observar que em todos os ensaios balísticos para essa configuração do corpo de prova, a pastilha cerâmica foi completamente destruída, sendo que o mecanismo de fratura deste material foi predominantemente intergranular, fato esse ocorrido principalmente devido à adição da nióbia. Esse mecanismo de fratura intergranular pode ser observado na imagem FIG. 4.19, fenômeno bem descrito por GOMES *et al.* (2014).

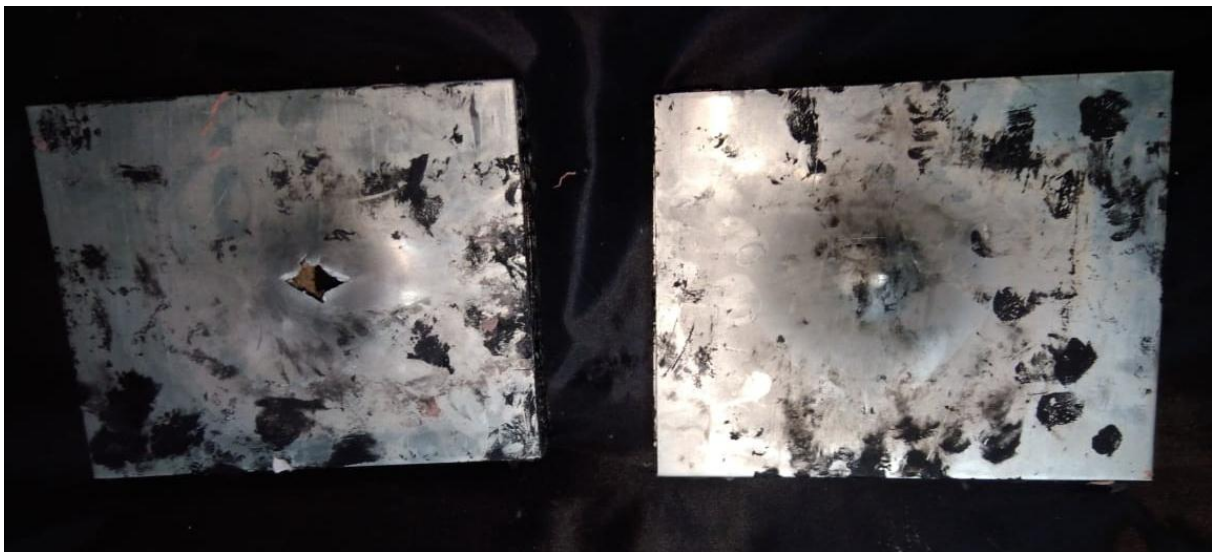


**FIG. 4.18 Sistema de blindagem multicamada após o disparo da munição de calibre 7,62x51 mm.**



**FIG. 4.19 Imagem microscópica da cerâmica fraturada: 10000X.**

Conforme observado na FIG. 4.19, os sistemas de blindagem contendo como camada intermediária o compósito poliéster reforçado com 30 vol.% de tecido de juta apresentaram perfuração do projétil, não havendo fragmentação dos compósitos. Além disso, foram observadas trincas (delaminação) que se estenderam até a borda do compósito. Na FIG. 4.20 são mostrados os corpos de prova após o evento balístico, sendo possível observar que corpos de prova houve a perfuração da placa de alumínio, mostrando que a redução da espessura da camada cerâmica para 7 milímetros não foi benéfica para o desempenho e integridade da blindagem multicamada.



**FIG. 4.20 Blindagem multicamada com compósito poliéster-juta (30 vol.%) ensaio balístico – vista traseira dos corpos de prova.**



Dos corpos de prova que não foram perfurados pelo projétil, foi realizada a medida da profundidade de indentação na plastilina (FIG. 4.21), apresentando uma profundidade média em torno de 45 milímetros, não atendendo assim as especificações da norma NIJ 0101.04 (2000), para o projétil com velocidade média de impacto de 847,32 m/s.



**FIG. 4.21 Profundidade causada na plastilina após o ensaio balístico.**

O principal objetivo para a realização desse teste foi reduzir o peso da blindagem multicamada, visto que com a redução da espessura da camada cerâmica de 10 milímetros para 7 milímetros, a blindagem multicamada teve uma redução de peso de 4155 gramas para 3215 gramas, representando uma redução do peso em torno de 22%. Esse fato seria de grande interesse, principalmente quando aplicar esse sistema em colete balístico.

Na TAB. 4.6 são mostrados os valores de indentação média da blindagem multicamada do presente trabalho e das blindagens multicamada, tendo a camada cerâmica com uma espessura de 10 milímetros. Observa-se que com a redução espessura cerâmica, o valor da profundidade de indentação aumentou quase que o dobro, quando comparado com o tecido de aramida (45,12 mm e 22,67 mm).

A diferença fica ainda mais evidente quando comparado com a blindagem multicamada do trabalho de ASSIS *et al.* (2018), que trabalhou com Poliéster-juta, tendo a camada cerâmica com 10 milímetros de espessura, indicando que a cerâmica é a grande responsável em absorver a energia cinética do projétil.

**TAB. 4.6 Valores de Indentação média das blindagens multicamada.**

Blindagem Multicamada	Indentação Média (mm)	Referências
Poliéster-Juta (7 mm)	45,12	*PT
Aramida (10 mm)	22,67	DA LUZ <i>et al.</i> , 2015
Epóxi-Juta (10mm)	20,67	DA LUZ <i>et al.</i> , 2015
Epóxi-Sisal (10mm)	18,17	ARAÚJO, 2015
Poliéster-Sisal (10mm)	24,30	BOLZAN, 2016
Epóxi-Rami (10mm)	17,00	MONTEIRO <i>et al.</i> , 2016b
Epóxi-Malva (10mm)	21,41	NASCIMENTO, 2017
Poliéster-Fique (10mm)	15,00	PEREIRA <i>et al.</i> , 2018
Poliéster-Juta (10mm)	17,80	ASSIS <i>et al.</i> , 2018

\*PT = Presente Trabalho

### 4.3.3 ENSAIOS BALÍSTICOS – BLINDAGEM MULTICAMADA COM CERÂMICA $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5+\text{Y}_2\text{O}_3$

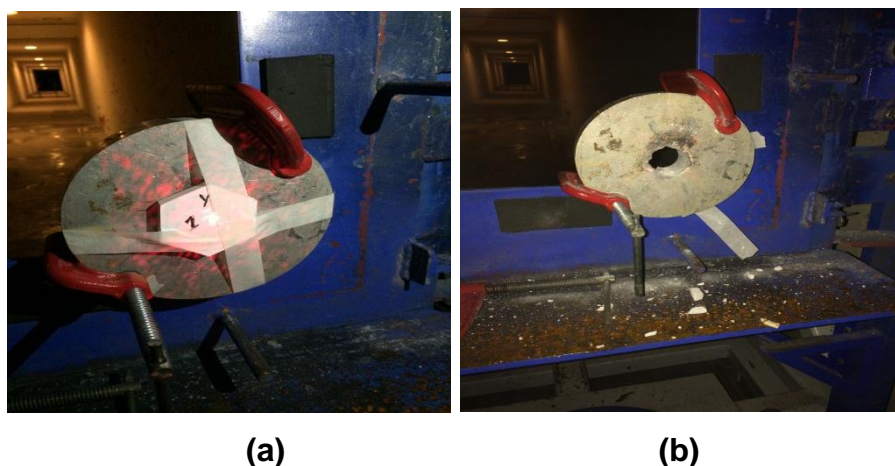
#### 4.3.3.1 ENSAIO DE VELOCIDADE RESIDUAL NA CERÂMICA $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5+\text{Y}_2\text{O}_3$

As propriedades de densidade, densificação e retração linear das pastilhas cerâmicas são mostradas na TAB. 4.7, sendo possível verificar a eficácia do processamento. Os valores obtidos dessas propriedades são equiparáveis aos resultados obtidos por CABRAL (2011), o que mostra que a metodologia seguida foi bem executada.

**TAB. 4.7 Propriedades das cerâmicas sinterizadas.**

Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Retração Linear (%)	Densificação (%)
$3,60 \pm 0,08$	$16,21 \pm 1,14$	$89,91 \pm 1,96$

Com objetivo de verificar a eficiência de proteção balística da cerâmica  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5+\text{Y}_2\text{O}_3$  foi realizado o ensaio de velocidade residual (FIG. 4.22), que a partir do radar Doppler, foi possível determinar a energia absorvida dessa camada, bem como estimar a limite que a cerâmica pode suportar.



**FIG. 4.22 Ensaio de velocidade residual nas cerâmicas  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5+\text{Y}_2\text{O}_3$ : (a) Antes e (b) após o impacto do projétil.**



Na TAB. 4.8 são mostrados os valores referentes ao ensaio de velocidade residual para a cerâmica  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5+\text{Y}_2\text{O}_3$ , bem como o resultado da cerâmica  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5$  que é utilizada frequentemente por outros autores (NASCIMENTO, 2017, DA LUZ, 2018; BRAGA, 2018; ASSIS *et al.*, 2018; PEREIRA *et al.*, 2018) para fins comparativos.

**TAB. 4.8 Valores das velocidades médias de impacto e residual, energia absorvida e velocidade limite das cerâmicas.**

Materiais	$V_i$ (m/s)	$V_r$ (m/s)	$E_{\text{abs}}$ (J)	$\%E_{\text{abs}}$	$V_L$ (m/s)	Referência
$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5+\text{Y}_2\text{O}_3$	$840,6 \pm 5,33$	$752,52 \pm 8,42$	700,48	19,96	380,03	*PT
$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5$	$847,52 \pm 5,51$	$566,67 \pm 4,32$	1920,41	55,10	629,25	DA SILVA, 2014b

\*PT: Presente trabalho.

Com base na TAB. 4.8, observa-se que a cerâmica  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5$  foi quem mais dissipou energia cinética proveniente do projétil, em torno de 55,1%, quando comparada à cerâmica  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5+\text{Y}_2\text{O}_3$  que dissipou uma quantidade de energia cinética em torno de 20%.

Uma possível explicação de a cerâmica  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5+\text{Y}_2\text{O}_3$  apresentar menor resistência balística está no fato que nessa cerâmica existe uma menor quantidade de fase de niobato de alumínio ( $\text{AlNbO}_4$ ), visto que o nióbio tem uma maior afinidade pelo ítrio, durante o processo de sinterização dos pós, formando assim, o niobato de ítrio ( $\text{YNbO}_4$ ), conforme estudado por CABRAL *et al.* (2018).

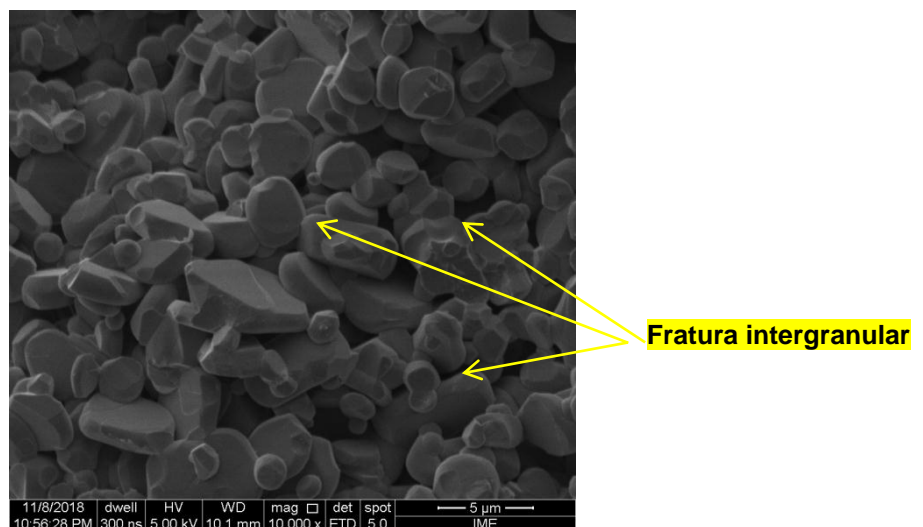
O niobato de alumínio forma-se preferencialmente nos contornos de grão da alumina, ocasionando uma fratura intergranular durante o impacto do projétil, o que aumenta a resistência balística da cerâmica (GOMES *et al.*, 2014). Além disso, a cerâmica  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5+\text{Y}_2\text{O}_3$  apresenta maior densificação que a cerâmica  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5$  (89% e 83%), e segundo MEYERS (1994), a presença de poros é um mecanismo importante na absorção de energia cinética do projétil.

#### 4.3.3.2 BLINDAGEM MULTICAMADA – DEFORMAÇÃO NA PLASTINA

Na FIG. 4.23 é mostrado o corpo de prova após o impacto do projétil. Foi possível observar que em todos os ensaios balísticos para essa configuração do corpo de prova, a pastilha cerâmica foi completamente destruída, sendo que o mecanismo de fratura deste material foi predominantemente intergranular, fato esse ocorrido principalmente devido à adição da nióbia, formando niobato de alumínio e niobato de ítrio nos contornos de grão da alumina. Esse mecanismo de fratura intergranular pode ser observado na imagem FIG. 4.24.



**FIG. 4.23 Sistema de blindagem multicamada após o disparo da munição de calibre 7,62x51 mm.**



**FIG. 4.24 Imagem microscópica da cerâmica fraturada: 10000X.**

Conforme observado na FIG. 4.23, novamente, as blindagem contendo como camada intermediária o compósito poliéster-juta (30 vol. %) apresentaram perfuração do projétil, sendo observadas trincas (delaminação) que se estenderam até a borda do compósito, apresentando essa blindagem uma profundidade de indentação média em torno de 47 milímetros.

Esse alto valor de profundidade pode ser explicado devido ao fato da cerâmica  $Al_2O_3+Nb_2O_5+Y_2O_3$  apresentar uma resistência balística inferior à cerâmica  $Al_2O_3+Nb_2O_5$ , comprometendo assim a integridade e o desempenho da blindagem, não sendo está aprovadas segundo as especificações da norma NIJ 0101.04 (2000). Na TAB. 4.9 são mostrados os valores de indentação média da blindagem multicamada do presente trabalho e das blindagens multicamada, ambas com a camada cerâmica com uma espessura de 10 milímetros.

**TAB. 4.9 Valores de Indentação média das blindagens multicamada.**

Blindagem Multicamada	Indentação Média (mm)	Referências
Poliéster-Juta ( $Al_2O_3+Nb_2O_5+Y_2O_3$ )	47,28	*PT
Aramida ( $Al_2O_3+Nb_2O_5$ )	22,67	DA LUZ <i>et al.</i> , 2015
Epóxi-Juta ( $Al_2O_3+Nb_2O_5$ )	20,67	DA LUZ <i>et al.</i> , 2015
Epóxi-Sisal ( $Al_2O_3+Nb_2O_5$ )	18,17	ARAÚJO, 2015
Poliéster-Sisal ( $Al_2O_3+Nb_2O_5$ )	24,30	BOLZAN, 2016
Epóxi-Rami ( $Al_2O_3+Nb_2O_5$ )	17,00	MONTEIRO <i>et al.</i> , 2016b
Epóxi-Malva ( $Al_2O_3+Nb_2O_5$ )	21,41	NASCIMENTO, 2017
Poliéster-Fique ( $Al_2O_3+Nb_2O_5$ )	15,00	PEREIRA <i>et al.</i> , 2018
Poliéster-Juta ( $Al_2O_3+Nb_2O_5$ )	17,80	ASSIS <i>et al.</i> , 2018

\*PT = Presente Trabalho

## 5 CONCLUSÕES

- 1) A partir do ensaio de DMA foi possível observar que os módulos de armazenamento e perda aumentaram com o aumento da fração volumétrica de tecido de juta; já as temperaturas de transição vítrea, estimado pelo pico da curva da tangente delta para os compósitos poliéster-juta e a resina poliéster apresentaram valores próximos de 70°C;
- 2) A partir ensaios de impacto Charpy e Izod, foi observado que a energia de impacto dos compósitos aumentou com o aumento da fração volumétrica do tecido de juta em comparação a resina poliéster. Os compósitos reforçados com 30 vol.% de tecido de juta apresentaram os maiores valores: 83,1 J/m (Izod) e 173,8 J/m (Charpy);
- 3) Através do ensaio de flexão nos compósitos e na resina poliéster, observou que, estatisticamente, somente o compósito reforçado com 30 vol.% de juta apresentou valor de resistência à flexão superior a resina poliéster: 62,25 MPa e 36,28 MPa;
- 4) Analisando o desempenho do colete balístico, utilizando a blindagem multicamada, o colete atendeu as especificações da norma NIJ 0101.04, ou seja, as profundidades de indentações foram inferiores a 44 mm, bem como a integridade do colete permaneceu coesa após os 6 disparos de munições 7,62 x 51 mm;
- 5) A blindagem multicamada, formada pela camada frontal a cerâmica  $Al_2O_3+Nb_2O_5$  com espessura de 7 mm, camada intermediária o compósito poliéster-juta (30 vol.%) e última camada forma pela placa de alumínio 5052 H34, não atendeu as especificações da norma NIJ 0101.04, ou seja, apresentaram profundidades de indentações superiores a 44 mm;
- 6) A blindagem multicamada supracitada apresentou valor de profundidade de indentação da plastilina superior às blindagens multicamada tradicionais quanto a espessura (10 mm para cerâmica  $Al_2O_3+Nb_2O_5$ ; 10 mm para o

compósito polimérico reforçado com fibras lignocelulósicas ou o tecido de aramida e placa de alumínio 5052 H34).

- 7) Através do ensaio de velocidade residual, constatou-se que a cerâmica  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5+\text{Y}_2\text{O}_3$  apresentou uma resistência balística inferior a  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5$ , possivelmente devido a menor formação de niobato de alumínio ( $\text{AlNbO}_4$ ) e a maior densificação;
- 8) A blindagem multicamada tradicional, quanto às espessuras das camadas, formada pela camada frontal a cerâmica  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5+\text{Y}_2\text{O}_3$ , camada intermediária o compósito poliéster-juta (30 vol.%) e última camada formada pela placa de alumínio 5052 H34, não atendeu as especificações da norma americana NIJ 0101.04, ou seja, apresentaram profundidades de indentações superiores a 44 mm;
- 9) Com auxílio das imagens obtidas no MEV, foi possível observar nas superfícies fraturadas do material cerâmico tanto  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5+\text{Y}_2\text{O}_3$  quanto  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Nb}_2\text{O}_5$  foram predominantemente intergranular, o que auxiliou na dissipação da energia cinética do projétil. Já na camada intermediária, foi possível observar os mecanismos de absorção da energia cinética residual do impacto balístico, tais como: incrustação mecânica das partículas cerâmicas no compósito e ruptura frágil da matriz poliéster.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Otimizar a espessura do compósito poliéster-juta utilizando o modelo proposto por BRAGA (2018);
- Fazer um estudo cinético de cura da resina e do compósito poliéster-juta segundo a norma ASTM E698;
- Verificar a influência de maiores frações volumétricas do tecido de juta, tanto nas propriedades mecânicas e térmicas quanto das propriedades de resistência balística;
- Verificar as propriedades elásticas da cerâmica  $Al_2O_3+Nb_2O_5+Y_2O_3$ ;
- Fazer um estudo do comportamento dinâmico da blindagem multicamada tendo como camada frontal a cerâmica  $Al_2O_3+Nb_2O_5+Y_2O_3$ , a camada intermediária o compósito poliéster-juta e como última camada a placa de alumínio 5052 H34.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABERNETHY, R. B.; BRENEMAN, J. E.; MEDLIN, C.H.; REINMAN, G.L. **Weibull Analysis Handbook**. Disponível em: [www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a143100.pdf](http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a143100.pdf).>. 1983.
- ABNT NBR 15000. **Blindagens para impactos balísticos - classificação e critérios de avaliação**, 2005.
- ALVES, C.; FERRÃO, P.M.C.; SILVA, A.J.; REIS, L.G.; FREITAS, M.; RODRIGUES, L.B.; ALVES, D.E. **Ecodesign of Automotive Components Making Use of Natural Jute Fiber Composites**. Journal of Cleaner Production. Vol. 18, p. 313-327. 2010
- ATLAS DA VIOLÊNCIA 2017. Disponível em: <[http://ipea.gov.br/porta1/images/170602\\_atlas\\_da\\_violencia\\_2017.pdf](http://ipea.gov.br/porta1/images/170602_atlas_da_violencia_2017.pdf)>. Acesso em: 05 Fev 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. D 6110 – **Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics**. Pennsylvania: ASTM, 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. D 4065. **Determination of Dynamic Mechanical Properties of Plastics**. New York. 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D256: **Standard Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**, West Conshohocken, PA, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D790: **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**, West Conshohocken, PA, 2015.
- ARAÚJO, B.M. **Avaliação do Comportamento Balístico de Blindagem Multicamada com Compósito de Epóxi Reforçado com Fibra de Sisal**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2015.
- 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.

- ASSIS, F.S; PEREIRA, A.C.; MONTEIRO, S.N.; FERREIRA, C.L.; JÚNIOR, E.P.L.; WEBER, R.P. **Performance of Plain Woven Jute Fabric-Reinforced Polyester Matrix Composite in Multilayered Ballistic System**. Polymers. Vol. 10, p. 230-239. 2018.
- ASSIS, F.S; PEREIRA, A.C.;FILHO, F.C.G.; JÚNIOR, E.P.L; MONTEIRO, S.N.; WEBER, R.P. **Performance of Jute Non-Woven Mat Reinforced Polyester Matrix Composite in Multilayered Armor**. Journal of Materials Research and Technology. 2018b.
- BHATNAGAR, A. **Lightweight Ballistic Composites: Military and Law-Enforcement Applications**. 1ª ed. Woodhead. 2006.
- BLEDZKI, A.K.; GASSAN J. **Composites reinforced with cellulose-based fibers**. Progress in Polymer Science. Vol. 4, p. 221-274. 1999.
- BOLZAN, L.T. **Avaliação do Comportamento Balístico de um Sistema de Blindagem Multicamadas 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.
- BRAGA, F.O.; LIMA JR, E.P.; LIMA, E.S.; MONTEIRO, S.N. **The Effect of Thickness on Aramid Fabric Laminates Subjected to 7.62 mm Ammunition Ballistic Impact**. Materials Research-Ibero-american Journal of Materials,vol. 20, p. 676-680. 2017c.
- BRAGA, F.O.; AZEVEDO, T.O.; BRAGA, W.S.; LAVATORI, A.A.G.; LOPES, P.H.L.M.; CONCEIÇÃO, M.O.T.; MONTEIRO, S.N. **Avaliação Microestrutural de uma Liga de Alumínio 5052 H34 Utilizada em Blindagem Multicamada**. In: 72º Congresso Anual Do Congresso Anual Da Associação Brasileira De Metalurgia E Materiais – ABM, São Paulo, SP, Brasil, vol. 72, p. 1165-1176. 2017b.
- BRAGA, F.O.; SIMONASSI, N.T.; CABRAL, A.C.; MONTEIRO, S.N.; DE ASSIS, F.S. **Tensile and Impact Properties of Two Fiber Configurations for Curaua Reinforced Composites**. The Minerals, Metals & Materials Series. 1ed.: Springer International Publishing, vol. 1 , p. 429-436. 2017c.
- BRAGA, F.O.; MILANEZI, T.L.; MONTEIRO, S.N.; LOURO, L.H.L.; GOMES, A.V., LIMA JR, E.P. **Ballistic Comparison Between Epoxy-Ramie and Epoxy-Aramid Composites in Multilayered Armor Systems**. Journal of Materials Research and Technology. 2018.
- BRAGA, F.O. **Configuração Otimizada de Blindagem Balística Multicamada com Cerâmica Frontal e Compósitos de Aramida ou Tecido de Curauá**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2018.
- BRYDSON, J.A. **Plastics Materials**. 7ª ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. 1999.



- CABRAL, R.F. **Produção do Compósito Bifásico  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -YAG Aditivado com Niobatos**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2011.
- CABRAL, R.F., CAMPOS, J.B.; SILVA, C.E.V; FONSECA, G.M.; LIMA, W.N.; LIMA, E.S. **Formação da Fase  $\text{YNbO}_4$  na Sinterização do Compósito Alumina-YAG com  $\text{Nb}_2\text{O}_5$** . Cadernos Unifoa, Vol. 36, p. 29-35. 2018.
- CALLISTER, JR.; W.D.; RETHWISCH, D.G. **Materials science and engineering: An Introduction**. 9 ed. Hoboken: Wiley. 2014.
- CANDIDO, V.S. **Caracterização e Propriedades de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Bagaço de Cana-de-Açúcar**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2014.
- CARVALHO, E.A. **Avaliação da influência do fator de localização e rank mediano no valor do módulo de Weibull em materiais frágeis**. In: 62º Congresso Anual Do Congresso Anual Da Associação Brasileira De Metalurgia E Materiais – ABM, Vitória, ES, Brasil, P. 1-10. 2007.
- CASTANHAL DO PARÁ. Disponível em: <<http://www.castanhal.com.br/a-juta.html>>. Acesso em: 16 Ago 2017.
- 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.
- CHAWLA, K. K. **Composites Materials**, New York. Springer-Verlag. 1993
- DA CRUZ, R.B. **Avaliação do Comportamento Balístico de Blindagem Multicamadas com Compósitos de Epóxi Reforçados com Fibras de Bambu**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2015.
- DA LUZ, F.S.; MONTEIRO, S.N. LOURO, L.H.L.; LIMA JR, E.P. **Ballistic Test of Multilayered Armor with Intermediate Epoxy Composite Reinforced with Jute Fabric**. . Materials Research-Ibero-american Journal of Materials, Vol. 18, p. 170-177. 2015.
- DA LUZ, F.S. **Avaliação das Fibras de Coco e PALF como reforços de Compósitos Epoxídicos Empregados em Sistemas de Blindagem Multicamada**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2018.
- DA SILVA, M.V.; STAINER, D.; AL-QURESHI, H.A.; HOTZA, D. **Blindagens Cerâmicas para Aplicações Balísticas: Uma Revisão**. Cerâmica, Vol. 60, p. 323-331. 2014.

- DA SILVA, L.C. **Comportamento Balístico de Compósitos Epóxi-Fibra Natural em Blindagem Multicamada**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2014b.
- DA SILVA, I. L. A. **Propriedades e Estruturas de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Contínuas de Juta**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências de Materiais na Universidade Estadual do Norte Fluminense. 2014c.
- DESHPANDE, V.S.; O'MASTA, M.R.; WADLEY, H.N.G. **Mechanisms of Projectile Penetration in Dyneema® Encapsulated Aluminum Structures**. International Journal of Impact Engineering, Vol. 74, p. 16-35. 2014.
- DHOLAKIYA, B. **Unsaturated Polyester Resin for Specialty Applications Polyester**. SALEH, E.H. (Ed.), InTech. (2012). Disponível em: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/39416.pdf>>. Acesso em: 3 de Ago de 2017.
- DRELICH, J. W.; MONTEIRO, S.N.; CANDIDO, V.S.; BRAGA, F.O.; BOLZAN, L.T.; WEBER, R.P. **Sugarcane Bagasse Waste in Composites for Multilayered Armor**. European Polymer Journal, Vol. 78, p. 173-185. 2016.
- EMBRAPOL. Disponível em: <<http://www.embrapol.com.br/resina.htm>>. Acesso em: 3 Ago 2017.
- FARUK, O.; BLEDZKI, A.K.; FINK, H. SAIN, M. **Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010**. Progress in Polymer Science, nº 37, p.1552-1596. 2012.
- FARUK, O.; BLEDZKI, A.K.; FINK, H. SAIN, M. **Progress report on natural fiber reinforced composites**. Macromolecular Materials and Engineering, 299, p. 9-26. 2014.
- FEIJÓ, D. **Polímeros do Futuro – Tendências e Oportunidades**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, Vol. 12, p. 1-20. 2002.
- FELISBERTI, M.I.; CASSU, S.N. **Comportamento Dinâmico-Mecânico e Relaxações em Polímeros e Blendas Poliméricas**. Química Nova, Vol. 28, p. 255-263. 2005
- GOMES, A.V.; TRINDADE, W.; DA SILVA, M.H.P; CHAGAS, C.F.; LOURO, L.H.L. **Processing and Properties of Niobia-Doped Alumina Sintered at 1400°C**. Materials Science Forum, Vol. 789-799, p. 677-681. 2014.
- HOSUR, M. V.; VAIDYA, U. K.; ULVEN, C.; JEELANI, S. **Performance of stitched/unstitched woven carbon/epoxy composites under high velocity impact loading**. Composite Structures, v.64, p.455-466. 2004.

- JOHN, M.J.; THOMAS, S. **Biofibres and Biocomposites.** *Carbohydrate Polymers*, Vol. 71, p. 343-364. 2008.
- JESUS, P.R.R. **Efeitos da Adição do Fluoreto de Lítio na Densificação da Alumina Aditivada com 4% em Peso de Nióbia.** Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2016.
- KALIA, S.; KAITH, B.S.; KAUR, I. (Eds.). **Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites.** 1<sup>a</sup> ed. New York: Springer. 2011.
- KARTHIKEYAN, K.; YU, B.; DESHPANDE, V.; FLECK H.A. **Perforation Resistance of CFRP Beams to Quasi-Static and Ballistic Loading: The Role of Matrix Strength.** *Int J Impact Eng*, Vol. 108, p. 389-401. 2017.
- LACH, D.E. **Developments and Applications of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastics**, New York: Van Nostrand Reinhold Co, 576-588p. 1998.
- MEDVEDOVSKI, E. **Ballistic Performance of Armour Ceramics: Influence of Design and Structure.** Part 2. *Ceramics International*. Vol. 36, p. 2117-2127. 2010.
- MEYERS, M.A. **Dynamic behavior of materials.** New York: John Wiley & Sons, 1994.
- MOHANTY, A.K.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. **Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview.** *Macromol. Mater. Eng.* Vol. 276-277, Issue 1, p. 1– 24, Wiley, Weinheim, 2000.
- MOHANTY, A.K.; MISRA, M.; DRZAL, L.T. **Sustainable bio-composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials world.** *J. Polym. Environ.* Vol. 10, p. 19-26. 2002.
- MOHANTY, A.K.; MISRA, M.; DRZAL, L.T. (eds). **Natural fibers, Biopolymers and Biocomposites.** New York, Taylor & Francis. 2005.
- MOHANTY,S.; VERMA, S.K.; NAYAK, S.K. **Dynamic Mechanical and Thermal Properties of MAPE Treated Jute/HDPE Composites.** *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 66, p. 538-547. 2006.
- MONTEIRO, S.N.; LOPES, F.P.D.; FERREIRA, A.S.; NASCIMENTO, D.C.O. **Natural fiber polymer matrix composites: cheaper, tougher and environmentally friendly.** *JOM*. Vol. 61, p.17-22. 2009.
- MONTEIRO, S.N.; LOPES, F.P.D.; BARBOSA, A.P.; BEVITORI, A.B.; SILVA, I.L.; COSTA, L.L. **Natural Lignocellulosic Fibers as engineering materials: an overview.** *Metallurgical and Materials Transactions. A.* Vol. 42, p. 2963-2974. 2011.

- MONTEIRO, S.N.; CALADO, V.; RODRIGUEZ, R.J.S.; MARGEM, F.M. **Thermogravimetric behavior of natural fibers reinforced polymer composites - An overview.** Materials Science & Engineering A. Vol. 557, pp. 17-28, 2012.
- MONTEIRO, S.N.; CALADO, V.; RODRIGUEZ, R.J.S.; MARGEM, F.M. **Thermogravimetric Stability of Polymer Composites Reinforced with Less Common Lignocellulosic Fibers – An Overview.** Journal of Materials Research and Technology; 1(2): pp.117-126, 2012b.
- MONTEIRO, S.N.; LIMA JR, E.P.; LOURO, L.H.L., SILVA, L.C.; DRELICH, J.W. **Unlocking function of aramida fibers in multilayered ballistic armor.** Accept for publication un Metallurgical and Materials Transactions A, November, 2014.
- MONTEIRO, S.N.; LIMA JR, E.P.; LOURO, L.H.L.; GOMES, A.V.; CHAGAS, C.F.M.; CALDEIRA, A.B. **How effective is a convex  $Al_2O_3-Nb_2O_5$  ceramic armor?** Ceramics International. 2016.
- MONTEIRO, S.N.; MILANEZI, T.L.; LOURO, L.H.L.; GOMES; A.V.; DRELICH; J.W.; LIMA JR, E.P. **Novel ballistic ramie fabric composite competing with Kevlar™ multilayered armor.** Materials and Design. Vol. 96, p. 263-269. 2016b.
- MORYE, S.S.; HINE, P.J.; DUCKETT, R.A.; CARR, D.J.; WARD, I.M. **Modelling of the Energy Absorption by Polymer Composites Upon Ballistic Impact.** Composites Science and Technology, Vol. 60, p. 2631-2642. 2000.
- NASCIMENTO, L.F.C. **Caracterização do Compósito 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.
- O'CONNOR, P.D.T.; KLEYNER, A. **Practical Reliability Engineering.** 5a ed. Chinchester: John Wiley & Sons. 2012.
- PEREIRA, A.C. **Propriedades e Estrutura de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras e Tecido de Figue.** Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2017.
- PEREIRA, A.C.; MONTEIRO, S.N.; ASSIS, F.S.; COLORADO, H.A. **Izod Impact Tests in Polyester Matrix Composites Reinforced with Figue Fabric.** The Minerals, Metals & Materials Series. 1ed.: Springer International Publishing, vol. 1, p. 365-372. 2017.
- PICKERING, K.L.; ARUAN EFENDY, M.G.; LE, T.M. **A Review of Recent Developments in Natural Fibre Composites and Their Mechanical Performance.** Com. Part A. Vol. 83, p. 98-112. 2016.

- RATNA, D. **Handbook of Thermoset Resins**. 1ª ed Shawbury: Smithers Rapra. 2009.
- SANTOS, J.L. **Comportamento Balístico de Componente Cerâmico à Base de  $Al_2O_3-Nb_2O_5-LiF$  em Blindagem Multicamada**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2016.
- SATYANARAYANA, K.G.; GUIMARÃES, J.L.; WYPYCH, F. **Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications**. Composites: Part A, v. 38, p. 1694-1709. 2007.
- SATYANARAYANA, K.G.; ARIZAGA, G.C.; WYPYCH, F. **Biodegradable composites based on lignocellulosic fiber: an overview**. Progress in Polymer Science. Vol. 34, p. 982-1021. 2009.
- SIMONASSI, N.T. **Resistência à Tração de Compósitos de Matriz Polimérica Reforçados com Fibras Naturais de Curauá de Alto Desempenho**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2017.
- SÔNIA, V. **Estatística Experimental**. 2ª ed. Editora Atlas S.A. 1999
- TRINDADE, W. **Influência da Geometria e da Microestrutura no Comportamento Dinâmico da Alumina Aditivada com Nióbia**. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia. 2012.
- TRINDADE, W.; GOMES, A. V.; LOURO, L.H.L. **Elaboração de uma Nova Rota de Eliminação de Ligante da Cerâmica de Alumina**. Revista Militar de Ciência & Tecnologia. Vol. 4, p. 71-79. 2013.
- VIEIRA, M.C.O. **Ensaio Destrutivos de Tubos Poliméricos Reforçados Internamente com Aço**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas na Universidade de Brasília. 2010.
- WAMBUA, P.; VANGRIMDE, B.; LOMOV, S.; VERPOEST, I. **The Response of Natural Fibre Composites to Ballistic Impact by Fragment Simulating Projectiles**. Composite Structures, Vol. 77, p. 232–240. 2007.
- WANG, L.; KANESALINGAM, S.; NAYAK, R.; PADHYE, R. **Recent trends in Ballistic Protection**. Textiles and Light Industrial Science and Technology (TLIST), Vol. 3. P. 37-47. 2014.
- ZUKAS, J.A.; NICHOLAS, T.; SWIFT, H.F.; GRESZCZUK, L.B.; CURRAN, D.R. **“Impact dynamics”**. 1º editioned, New York: John Wiley & Sons, 1982.