

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

RENATO BATISTA DA CRUZ

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE  
BLINDAGEM MULTICAMADAS COM COMPOSITOS DE EPÓXI  
REFORÇADOS COM FIBRAS OU PLAQUETAS DE BAMBU

Rio de Janeiro

2015

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**RENATO BATISTA DA CRUZ**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE BLINDAGEM  
MULTICAMADAS COM COMPOSITOS DE EPÓXI REFORÇADOS COM FIBRAS  
OU PLAQUETAS DE BAMBU**

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

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

Rio de Janeiro

2015

© 2015

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ      CEP: 22290-270

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

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

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do autor e dos orientadores.

S....	Cruz, Renato Batista. Avaliação do comportamento balístico de blindagem multicamadas com compósitos de epóxi reforçados com fibras ou plaquetas de bambu / Renato Batista da Cruz – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2015. 115 f. : il. Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, 2015. 1.
-------	--

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

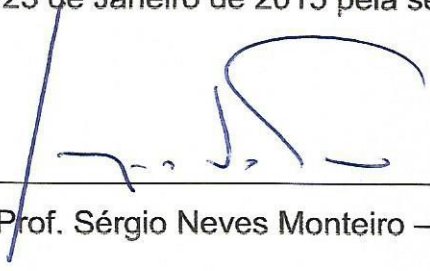
**RENATO BATISTA DA CRUZ**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE BLINDAGEM  
MULTICAMADAS COM COMPOSITOS DE EPÓXI REFORÇADOS  
COM FIBRAS OU PLAQUETAS DE BAMBU**

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


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

Aprovada em 23 de Janeiro de 2015 pela seguinte Banca Examinadora:



---

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



---

Prof. André Bén-Hur da Silva Figueiredo - D.C., IME



---

Prof. Jean Igor Margem – D.Sc., ISE-CENSA

Rio de Janeiro

2015

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela dádiva da vida, pelas oportunidades, por conceder sabedoria e discernimento necessários à realização deste trabalho. A Ele o poder, a honra e a glória.

À minha esposa Bruna Madeira Araújo da Cruz, por estar sempre ao meu lado, por nunca me deixar desistir ou fraquejar, pelo seu amor e carinho. Aos meus pais, Victor Neto da Cruz e Isabel Batista da Cruz, pela vida, pelo amor e orientação em todos os momentos da minha vida. A minha irmã, Izabela Batista da Cruz, pela amizade, pelo incentivo e apoio.

Aos amigos feitos na pós-graduação, pela amizade e bons momentos, em especial ao grupo de fibras naturais, Fernanda Santos, Cap Thiago Milanezi, Verônica Scarpini pelo ajuda, pelo companheirismo e atenção nos momentos complicados.

Agradeço também a todos os professores do Instituto Militar de Engenharia (IME), pelos ensinamentos e conhecimentos passados. Ao prof. Sérgio Neves Monteiro, pela dedicação, pela confiança e zelo na orientação deste trabalho.

Ao CAEx, por disponibilizar instalações e pessoas qualificadas para a realização dos ensaios balísticos, em especial ao Ten Cel Malizia, Cap D'Megeon, Sgt Santiago, Sgt Furiati, Sgt Marcelo Alves e ao Sgt Machado, que me auxiliaram diretamente na realização dos testes.

Agradeço toda a paciência e disposição do Cap Édio, na realização dos ensaios balísticos.

Ao Joel, pelas análises dos MEV.

Ao professor Flávio Silva, da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ) que cedeu as amostras de bambu gigante, para que fossem retiradas as fibras e confeccionadas a plaquetas, além de indicar um de seus orientados João Krause, que me emprestou a máquina de desengrosso para conseguir a espessura requerida das plaquetas, o que foi imprescindível para a realização desta dissertação.

A CAPES pelo incentivo financeiro para o desenvolvimento desse trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS .....	11
LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS.....	12
1. INTRODUÇÃO.....	16
1.2. Justificativa do trabalho .....	19
1.3. Objetivo do estudo.....	20
1.3.1. Objetivo geral.....	20
1.3.2. Objetivos específicos .....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	22
2.1. Balística .....	22
2.2. Blindagem.....	24
2.3. Sistema multiblindagem.....	25
2.4. Comportamento dinâmico dos materiais.....	27
2.4.1. Interação e reflexão de ondas de choque.....	34
2.5. Fibras.....	37
2.5.1. Fibras vegetais.....	38
2.5.2. Bambu .....	41
2.5.3. Produção do bambu.....	43
2.5.3. Bambu <i>Dendrocalamus giganteus</i> .....	45
2.6. Polímeros.....	47
2.6.1. Resina epóxi.....	49
2.7. Compósitos.....	50
2.7.1. Compósitos de matriz polimérica com fibras naturais.....	50
2.8. Cerâmicas.....	52
2.8.1. Conceitos gerais .....	52
2.8.2. Alumina ( $Al_2O_3$ ).....	53
2.8.3. Alumina ( $Al_2O_3$ ) aditivada com nióbia ( $Nb_2O_5$ ).....	53
2.8.4. Cerâmicos como proteção balística .....	54

2.9.	Distribuição de Weibull .....	55
3.	MATERIAIS E MÉTODOS. ....	57
3.1.	Aspectos gerais .....	57
3.2.	Especificações dos materiais utilizados .....	57
3.2.1.	Polietileno glicol (PEG) .....	57
3.2.2.	Alumina e nióbia .....	58
3.2.3.	Fibras e plaquetas de bambu .....	59
3.2.4.	Resina epóxi e endurecedor .....	60
3.2.5.	Plastilina .....	61
3.2.6.	Placa de alumínio .....	62
3.3.	Fabricação das pastilhas cerâmicas.....	62
3.3.1	Aspectos gerais .....	62
3.3.2.	Obtenção do pó .....	64
3.3.2.	Prensagem do material verde .....	65
3.3.3.	Sinterização .....	66
3.3.4.	Cálculo de retração linear e densificação das placas cerâmicas.....	68
3.4.	Confecção das placas de compósito bambu-epóxi .....	68
3.5.	Montagem dos sistemas de blindagens multicamadas .....	73
3.6.	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	74
3.7.	Ensaio balístico.....	76
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO. ....	81
4.1.	Análise do processo de fabricação dos corpos cerâmicos .....	81
4.2.	Resultados dos ensaios balísticos das blindagens multicamadas .....	82
4.3.	Interação das ondas de choque nas blindagens multicamadas.....	88
4.4.	Resultados dos ensaios individuais das camadas dos sistemas de blindagens .....	91
4.5.	Análise das micrografias obtidas no MEV.....	95
4.6.	Relação de custos .....	99
5.	CONCLUSÕES.....	101

6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	103
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104



## LISTA DE FIGURAS

FIG. 2.1 - Níveis de blindagens segundo a norma ABNT NBR 15000.....	24
FIG. 2.2 – Esquema de uma blindagem multicamadas.....	27
FIG. 2.3 - Curva tensão versus deformação em um material dúctil (MEYERS, 1994).....	29
FIG. 2.4 – Ilustração da propagação de região comprimida em um pistão de gás: (a) Antes do choque; (b) Após um tempo $t_1$ ; (c) Após um tempo $t_2 > t_1$ . Adaptado Meyers, 1994.....	30
FIG. 2.5 – Curva da probabilidade de penetração (ZUKAS, 1982).....	33
FIG. 2.6 – Transferência da onda de choque de um meio com baixa impedância para um meio com alta impedância: (a) gráfico pressão versus velocidade de partícula; (b) perfis de pressão. Adaptado de Meyers, 1994.....	36
FIG. 2.7 – Transferência da onda de choque de um meio com alta impedância para um meio com baixa impedância: (a) gráfico pressão versus velocidade de partícula; (b) perfis de pressão. Adaptado de Meyers, 1994.....	37
FIG. 2.8 – Microestrutura de uma fibra.....	40
FIG. 2.9 – Distribuição geográfica do bambu.....	41
FIG. 2.10 – Partes da planta do bambu.....	42
FIG. 2.11 – Espécie <i>Dendrocalamus giganteus</i> .....	45
FIG. 2.12 – Grupo paquimorfo ou simpodial (entouceirante).....	46
FIG. 3.1– Espécie <i>Dendrocalamus Giganteus</i> (a) Fibras do bambu; e (b) Plaquetas do bambu.....	60
FIG. 3.2 – Resina epóxi e o endurecedor.....	61
FIG. 3.3 – (a) Massa de modelar CORFIX; (b) Suporte de tiro totalmente preenchido com a plastilina.....	61
FIG. 3.4 – Placa de Alumínio.....	62
FIG. 3.5 – Moinho de bolas Marconi modelo MA 500.....	63
FIG. 3.6 – Forno INTI modelo FE 1700.....	63
FIG. 3.7 – Estufa ELKA .....	65

FIG. 3.8 – Matriz de compactação.....	66
FIG. 3.9 – Prensa 30 Ton Motorizada – NOWAK.....	66
FIG. 3.10 – Pastilhas cerâmicas sinterizadas.....	67
FIG. 3.11 – Matriz metálica sendo untada com graxa.....	69
FIG. 3.12 – Matriz metálica sendo envolvida com filme PVC.....	69
FIG. 3.13 – Matriz de aço utilizada para confecção das placas compósitas.....	70
FIG. 3.14 – Confecção da placa compósita de plaquetas de bambu.....	71
FIG. 3.15 – Prensagem da matriz.....	72
FIG. 3.16 – Compósito de epóxi com fibra de bambu.....	72
FIG. 3.17 – Compósito de epóxi com plaquetas de bambu.....	73
FIG. 3.18 – Cola ULTRA FLEX cura rápida.....	74
FIG. 3.19 – Microscópico eletrônico de Varredura – Modelo QUANTA FEG 250.....	75
FIG. 3.20 – Equipamento de deposição de filme de alto vácuo.....	76
FIG. 3.21 – Esquema do sistema utilizado para os ensaios balísticos.....	77
FIG. 3.22 – A munição 7,62 mm e seu projétil voador.....	78
FIG. 3.23 – Provette calibre 7,62 mm com mira laser:.....	78
FIG. 3.24 – Compósitos multicamadas de (a) fibras e de (b) plaquetas prontos para realização do ensaio balístico.....	79
FIG. 4.1 - Blindagem multicamada com compósito de epóxi reforçado com fibras de bambu, (a) antes e (b) após ensaio balístico.....	82
FIG. 4.2 – Blindagem multicamada com compósito de epóxi reforçado com plaquetas de bambu, (a) antes e (b) após ensaio balístico.....	83
FIG. 4.3 – (a) Paquímetro utilizado e (b) medição da indentação causada na plastilina pelo impacto do projétil.....	84
FIG. 4.4 – Gráfico de indentação para as placas de compósitos de epóxi reforçado com plaquetas de bambu.....	86
FIG. 4.5 – Gráfico de indentação para as placas de compósitos de epóxi reforçado com fibras de bambu.....	87
FIG. 4.6 – (a) compósito de fibras e (b) compósito de plaquetas perfurado após os ensaios.....	91
FIG. 4.7 – Gráfico de pontos experimentais do ensaio de velocidade	

residual do compósito de plaquetas.....	92
FIG. 4.8 – Gráfico da velocidade limite (VL) para o compósito de epóxi reforçado com plaquetas de bambu.....	93
FIG. 4.9 – Gráfico da velocidade limite (VL) para o compósito de epóxi reforçado com fibras de bambu.....	93
FIG. 4.10 – Micrografia por MEV: (a) Superfície de fratura do compósito de fibras de bambu (80x); (b) (150x).....	96
FIG. 4.11 – Micrografia por MEV: (a) Fratura do compósito de fibras de bambu (500x); (b) Partículas cerâmicas na superfície do compósito (500x).....	96
FIG. 4.12 – Micrografia por MEV: (a) Fratura do compósito de plaquetas de bambu (86x); (b) Partículas cerâmicas na superfície do compósito (200x).....	97
FIG. 4.13 – Micrografia por MEV: (a) Matriz epoxídica impregnado no compósito de plaquetas de bambu (150x); (b) Fratura do compósito de plaquetas de bambu (200x).....	97
FIG. 4.14 – Micrografia por MEV das fibras arrancadas da matriz, mecanismo por “pull out”.....	98
FIG. 4.15 – Micrografia por MEV das fibras arrancadas da matriz, mecanismo de “pull out”.....	98
FIG. 4.16 – Micrografia por MEV da cerâmica fraturada (10000x).....	99

## LISTA DE TABELAS

TAB. 2.1 – Tabela de resistência segundo a norma NIJ STANDARD, classificação dos coletes balísticos de acordo com o nível de proteção.....	23
TAB. 2.2 – Origem de algumas fibras importantes.....	39
TAB. 2.3 – Composição de algumas fibras.....	39
TAB. 2.4 – Informações comerciais do Bambu <i>Dendrocalamus Giganteus</i> .....	43
TAB. 2.5 – Propriedades mecânicas do <i>Dendrocalamus ginateus</i> .....	47
TAB. 2.6 – Diferentes valores de densidades do <i>Dendrocalamus Giganteus</i> .....	47
TAB. 2.7 – Propriedades dos materiais e o desempenho balístico.....	52
TAB. 3.1 – Propriedades do PEG.....	58
TAB. 3.2 – Análise química da alumina.....	58
TAB. 3.3 – Análise química da nióbia HP.....	59
TAB. 3.4 – Especificações do alumínio.....	62
TAB. 3.5 – Relação de materiais e massa para confecção de alguns corpos cerâmicos.....	64
TAB. 4.1 – Dados gerais dos corpos cerâmicos.....	81
TAB. 4.2 – Profundidade da indentação na plastilina, espessura, velocidade de impacto e energia de impacto para as diferentes blindagens multicamada.....	84
TAB. 4.3 – Médias dos valores obtidos nos ensaios balísticos.....	86
TAB. 4.4 – Valores característicos de cada material.....	89
TAB. 4.5 – Valores da velocidade de partícula, velocidade de onda de choque e pressão nas interfaces de cada componente da blindagem multicamada e a natureza da onda de choque.....	89
TAB. 4.6 – Natureza das ondas refletidas e impedância de choque nas interfaces da blindagem multicamada.....	90
TAB. 4.7 – Valores da estatística de Weibull para velocidade limite.....	94
TAB. 4.8 – Valores médios das velocidades de impacto e residual, energia absorvida e velocidade limite.....	95
TAB. 4.9 – Relação de custo dos componentes utilizados na blindagem.....	100
TAB. 4.10 – comparativo de peso e custo entre o compósito bambu-epóxi e o tecido da aramida.....	100

## LISTA DE ABREVIÇÕES E SÍMBOLOS

### ABREVIATURAS

CAEx	Centro de Avaliações do Exército
IME	Instituto Militar de Engenharia
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NIJ	National Institute of Justice
FNL	Fibra Natural Lignocelulósica
MAS	Multilayered armor systems
DGEBA	Diglicidil éter de bisfenol-A
MOE	Módulo de elasticidade
ABNT	Associação Brasileira de normas técnicas
PVC	Policloreto de Vinila
PEG	Polietileno glicol

### SÍMBOLOS

S	Constante do material
$\rho$	Densidade do material
$\rho_{\text{sinterizado}}$	Densidade do material sinterizado
$E_{\text{abs}}$	Energia absorvida
$V_m$	Fração em volume da matriz
$V_f$	Fração em volume de fibra
$d\sigma/d\varepsilon$	Inclinação da curva tensão <i>versus</i> deformação
$\gamma$	Índice adiabático
$E_f$	Módulo de elasticidade da fibra
$E_{\text{c.bambu}}$	Módulo de elasticidade do compósito de bambu
$E_m$	Módulo de elasticidade da matriz
$E_{\text{cp}}$	Módulo de elasticidade do compósito
$E_{\text{epóxi}}$	Módulo de elasticidade do epóxi
$\beta$	Módulo de Weibull
P	Pressão

$\theta$	Unidade característica
$U_s$	Velocidade da onda de choque
$C_o$	Velocidade da onda elástica
$V_p$	Velocidade da onda plástica
$V_i$	Velocidade de impacto
$U_p$	Velocidade de partícula
$C$	Velocidade do som no material
$V_L$	Velocidade limite
$V_r$	Velocidade residual
$V$	Volume específico
$R^2$	Coefficiente de correlação
$e_{verde}$	Espessura do corpo antes de sinterizar
$e_{sinterizado}$	Espessura do corpo sinterizado
$R_L$	Retração Linear

## RESUMO

Existem inúmeros estudos e pesquisas voltadas a diferentes tipos de materiais com a finalidade de aplicação balística, essas pesquisas visam principalmente o aumento da eficiência balística, a redução de peso e de custos. As blindagens multicamadas são compostas por uma camada frontal de material cerâmico, que tem como finalidade deformar e fragmentar o projétil além de dissipar grande parte da energia de impacto, depois como segunda camada são usados geralmente materiais poliméricos, como por exemplo, a aramida que tem a função de absorver a energia cinética dos fragmentos produzidos. O presente estudo propôs a utilização de um compósito reforçado com fibras ou plaquetas de bambu da espécie *Dendrocalamus Giganteus*, em substituição ao tecido de aramida, a fim de comparar o desempenho balístico dos materiais compósitos com a aramida. As blindagens foram submetidas aos ensaios balísticos, seguindo todas as especificações da norma internacional NIJ 0101.04, para munição de calibre 7.62 mm, a uma distancia crítica de 15 metros e com alta velocidade de impacto ( $> 800$  m/s). Após a realização dos ensaios foi constatado que não houve perfuração em nenhum dos corpos de provas. Para as blindagens reforçadas com fibras, a indentação média medida foi 17,58 mm e para os compósitos reforçados com plaquetas foi 18,68 mm assim todos os corpos de provas ficaram dentro do que é estipulado pela norma NIJ ( $< 44$  mm). A indentação gerada na plastilina foi utilizada como critério de absorção de energia e eficácia balística. Os valores médios de indentação mostraram que o compósito reforçado com fibra de bambu, alcançou resultados superiores ao compósito reforçado com plaquetas e também aos resultados do tecido de aramida de trabalhos anteriores, para ensaios com munição de calibre 7,62 mm. As superfícies fraturadas foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura. Com isso foi possível observar o mecanismo de fratura frágil da matriz epoxídica, a interação das fibras e das plaquetas de bambu com os estilhaços do material cerâmico, que através do mecanismo de incrustação mecânica, ajudaram a dissipar a energia de impacto de entrada.

## ABSTRACT

There are numerous studies and researches aimed at different types of materials for the purpose of ballistic application, these studies mainly aim at increasing the ballistic efficiency, reduced weight and costs. The multilayer shields are composed of a front layer of ceramic material, which is intended to deform and break apart the projectile to dispel much of the impact energy, then as a second layer polymeric materials are generally used, for example, aramid having the function of absorbing the kinetic energy of the fragments produced. This study suggested the use of a composite reinforced with fibers or platelets of bamboo species *Dendrocalamus giganteus*, replacing aramid fabric, in order to compare the ballistic performance of composites with aramid. The shields were subjected to ballistic tests, following all the specifications of the international standard NIJ 0101.04 to 7.62 mm caliber ammunition at a critical distance of 15 meters and with high-speed impact ( $> 800$  m / s). After the tests it was found that there was no drilling on any of the specimens. For the shields reinforced with fibers, the average indentation measurement was 17.58 mm and the composites reinforced with platelets was 18.68 mm so all test samples were within what is stipulated by the NIJ ( $<44$  mm). The indentation generated in the plasticine was used as a criterion for energy absorption and ballistic efficiency. The average values showed that the indentation reinforced composite bamboo fiber, achieved better results than the reinforced composite platelets and also the results of aramid fabric previous studies, assays to 7.62 mm caliber ammunition. The fractured surfaces were examined in the scanning electron microscope. It was then possible to observe the brittle fracture mechanism of the epoxy matrix, the interaction of fibers and bamboo platelets with shards of ceramic material, which through the mechanical fouling mechanism, helped to dissipate impact energy input.



## 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de blindagens multicamadas (MAS - *Multilayered Armor System*) proporcionam uma proteção leve e efetiva e tem como objetivo não apenas absorver a energia do projétil, mas também de impedir a penetração de fragmentos (MONTEIRO et al., 2014b). Geralmente, os sistemas de blindagens híbridas são compostos por uma camada frontal de material cerâmico, que é um material duro e frágil com elevada resistência à compressão e que tem como principal função dissipar parte da energia e fragmentar o projétil (MEDVEDOVSKI, 2010). Já como segunda camada é utilizado normalmente materiais poliméricos, tais como; Kevlar®, Twaron® e Dyneema®, que são materiais leves e tem como principal papel dissipar o restante da energia de impacto através da absorção de energia cinética dos fragmentos gerados pelo impacto do projétil. Em alguns casos também são utilizados uma terceira camada, composta por um material dúctil, que tem a função de restringir a penetração do projétil. A propagação de pulsos de energia nas interfaces dos diferentes materiais se dá em forma de onda, que pode ser compressiva ou onda de tração, que será transmitida simultaneamente como uma onda trativa ou compressiva, isso dependerá das impedâncias de suas camadas. A impedância de choque dos materiais está diretamente ligada à sua densidade de cada material (MEYERS, 1994). Logo se o material da segunda camada possuir impedância de choque menor que a primeira, a energia que será transmitida pelo pulso de compressão atuante será menor. Com isso, para obter uma redução maior na energia de impacto, a segunda camada deverá composta por materiais com baixos valores de densidades, de modo que, apresentem menor impedância de choque. Neste caso, uma característica intrínseca das fibras naturais são baixos valores de densidade, o que se torna bastante atraente a substituição do material que compõe a segunda camada da blindagem por um compósito epoxídico reforçado com fibras naturais.

A capacidade do sistema de blindagem em dissipar energia de impacto influencia diretamente o nível de proteção individual ou do equipamento. A avaliação do nível de proteção, da qualidade e da eficiência do equipamento é realizada normalmente em um campo de tiro apropriado através de disparos. Um método

comum usado é composto por um provete e um conjunto de sensores de velocidade, a fim de avaliar as energias envolvidas. No mesmo ensaio é possível observar e medir a indentação gerada no impacto, isso ocorre porque a blindagem é apoiada em um material (plastilina) que simula densidade e viscosidade do tecido muscular humano, com o impacto do projétil ocorre um abaulamento na placa de alumínio, gerando um trauma na plastilina (DA SILVA et al., 2011).

O desenvolvimento de blindagens balísticas mais eficientes e adequadas aos diferentes cenários de guerras e guerrilhas do mundo atual é de total interesse do Exército Brasileiro, pela necessidade de utilizar sistemas de proteção eficientes aos diferentes tipos de calibres, como por exemplo, 0,22 e 0,38 mm que possuem baixas velocidades de impacto (<350 m/s), quanto para calibres de fuzis 7,62x51 mm que possuiu alta velocidade de impacto (>800 m/s). Outro fator importante que também deve ser levado em consideração é que calibres mais pesados como de fuzis deixaram de ser exclusividade das forças armadas e passaram a ser usadas ilegalmente.

Os compósitos reforçados com fibras sintéticas como a fibra carbono e fibra de vidro, têm sido utilizados em várias áreas da indústria, devido suas propriedades mecânicas e facilidades de produção. Contudo, estas fibras não são degradáveis e o seu modo de eliminação final é desconhecido. Com a preocupação mundial com meio ambiente e a ameaça de mudança climática, as fibras naturais surgem com um alento para os pesquisadores, pois possuem propriedades características iguais ou melhores que as fibras convencionais.

O Brasil tem um importante papel em relação ao desenvolvimento sustentável, devido seu extenso território, possui uma das mais ricas biodiversidades do planeta, logo é um dos maiores produtores de materiais naturais do mundo. Dessa forma, o país apresenta um enorme potencial através da exploração sustentável destes recursos, isso lhe proporciona uma grande vantagem competitiva e uma oportunidade de se projetar no mercado mundial de produtos têxteis, compósitos e materiais avançados.

As fibras naturais são recursos alternativos e abundantemente disponíveis, que possuem características únicas, como: biodegradabilidade, baixo custo, baixa densidade, natureza não tóxica, baixa abrasividade e propriedades mecânicas úteis (MARGEM, 2013). A utilização de fibras naturais, também conhecidas como

lignocelulósicas, como reforço para materiais poliméricos tem ganhado força devido à sua flexibilidade, leveza e facilidade de fabricação de formas complexas com economia de recursos. Além disso, compósitos poliméricos com fibras naturais têm potencial para aplicação em componentes sujeitos a carregamentos leves ou moderados. Estes compostos podem facilmente substituir materiais sintéticos convencionais em diversas áreas, como a indústria da construção civil, transporte e bens de consumo (SATYANARAYANA et. al., 1990). O baixo desempenho mecânico e alta absorção de umidade das fibras (ESPERT et al., 2004), são os grandes empecilhos em suas novas aplicações. Compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas e alinhadas apresentam melhor resistência mecânica do que os materiais convencionais. Isso ocorre devido aos compósitos apresentarem alta rigidez e resistência na direção das fibras, porém demonstra um baixo desempenho na direção transversal, fator que pode ser solucionado com a produção de placas ortogonalmente reforçadas.

De grande abundância em regiões tropicais e subtropicais, o bambu, que é uma planta de crescimento rápido, apresenta excelente resistência mecânica e especialmente resistência à tração, além de possuir uma alta relação peso específico e resistência em relações a outros materiais de uso convencional, tais como, o aço, a madeira, o concreto (GHAVAMI, 1992). As propriedades mecânicas do bambu estão fortemente ligadas com a idade, espécie e o teor de umidade. Os bambus quando atingem sua maturidade, com cerca de três anos, possuem resistência máxima e os colmos maduros são mais resistentes do que colmos verdes. Contudo o teor de fibras é o grande responsável por sua resistência.

Segundo Pereira (2001), a densidade do bambu gigante varia entre 500 a 800 Kg/m<sup>3</sup> dependendo essencialmente do tamanho, da distribuição e quantidade dos aglomerados de fibras ao redor de feixes vasculares. Devido à orientação paralela das fibras no eixo do colmo, o bambu, possui maior resistência à tração do que a compressão.

O bambu conhecido popularmente como bambu gigante, da espécie *Dendrocalamus Giganteus*, está entre os mais versáteis, sendo utilizado como matéria prima para alimentação, construção civil, entre outras utilidades. Além de apresentar excelentes características físicas como leveza, força, dureza, flexibilidade e facilidade de trabalho, que são ideais para diferentes propósitos tecnológicos

(GHAVAMI e MARINHO, 2001). Levando em consideração também que o bambu é um material renovável e não poluente, conseqüentemente torna-se um produto de grande potencial econômico e sustentável. Este trabalho propôs a substituição da camada intermediária do sistema de blindagem multicamadas, por uma placa compósita epoxídica reforçada com fibras ou plaquetas de bambu, com o objetivo de reduzir o peso e custos sem comprometer a qualidade, maximizando a eficiência da blindagem, agregando ao produto final materiais ecologicamente corretos, atendendo a critérios econômicos e ambientais, uma vez que permite o desenvolvimento de novos materiais sem agredir o meio ambiente, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável do planeta.

## **1.2. Justificativa do trabalho**

Os inúmeros fatos e acontecimentos nos últimos anos, decorrentes do aumento da violência e até mesmo de alguns atentados terroristas, tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de materiais para o emprego em blindagens balísticas. A área de blindagem balística é um setor bastante estudado e de crescentes realizações pela Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais do IME. Nesta área tem-se a finalidade de conhecer cada vez mais os materiais e suas combinações no que diz respeito à proteção balística. Com isso o objetivo deste trabalho é continuar com novas pesquisas e estudos sobre proteção balística, investigando a capacidade e eficiência de um compósito epóxi-bambu inserido em sistema de blindagem multicamadas. Outro fato relevante é a utilização de matéria prima natural e renovável, como o bambu, contribuindo para obtenção de um produto de baixo custo, com baixa densidade e que corrobore com o desenvolvimento sustentável.

### **1.3. Objetivo do estudo**

#### 1.3.1. Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo confrontar e avaliar o desempenho balístico de sistemas de blindagens multicamadas. Para isso, foram confeccionadas placas compósitas de matriz epoxídica reforçada com fibras de bambu e outras reforçadas com plaquetas de bambu. Esses materiais compósitos foram inseridos nos sistemas de blindagens multicamadas como camada intermediária, onde foi traçado um comparativo do comportamento balístico dos compósitos com o tecido de aramida, comumente usado neste tipo de proteção. Este trabalho tem como finalidade propor a substituição do tecido de aramida, de uso convencional em blindagens híbridas, pelas placas compósitas, que são materiais alternativos e de baixo custo.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho estão relacionados abaixo:

1. Verificar se a eficiência balística das placas compósitas de epóxi-bambu, utilizadas como camada intermediária nos sistemas de blindagens multicamadas, atendem as especificações da norma internacional NIJ 0101.04 (2000).

2. Traçar um comparativo, com relação ao desempenho balístico, entre os dois materiais utilizados como camada intermediária, assim como, comparar os resultados encontrados nesta dissertação com os resultados encontrados por Silva (2014) e Luz (2014) para o compósito de curauá 30%, os compósitos de epóxi-juta e o tecido de aramida.

3. Avaliar o desempenho individual através da velocidade limite de cada material utilizado como camada intermediária.

4. Comparar as energias cinéticas absorvidas individualmente e associar com o desempenho balístico das placas de compósito epóxi-bambu e os resultados obtidos

por Silva (2014) para o compósito de epóxi reforçado com 30% de curauá e por Luz (2014) para o compósito de epóxi reforçado com 30% de juta..

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

6. Averiguar as superfícies fraturadas nos ensaios balísticos através de observações no microscópio eletrônico de varredura, com a finalidade de verificar os mecanismos de absorção de energia.

7. Comparar o peso e o custo total de uma blindagem multicamadas, utilizando o compósito bambu-epóxi ou o tecido de aramida, como camada intermediária.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Balística

Balística é a ciência que estuda o comportamento dos projeteis após o disparo. Os princípios intrínsecos da balística permitem analisar a trajetória, o impacto, as marcas e a explosão de um projétil. O movimento realizado por um projétil em um disparo por uma arma de fogo pode dividir em três partes distintas: a balística interna, a balística externa e a balística terminal ou de efeitos (DE MIRANDA, 2014).

A balística interna estuda o comportamento do projétil desde o momento do disparo até o instante em que o projétil abandona a arma. Para isso, envolve estudos da queima e ignição da pólvora do propulsor, volume e pressão produzida pela expansão dos gases no interior da arma durante a explosão do material combustível, tal como no formato da arma e do projétil (GRILO, 2009).

A balística externa trata-se em estudar o que ocorre desde o instante em que o projétil abandona o cano da arma até o instante em que atinge o alvo. Estuda principalmente a aerodinâmica, que está relacionada com a interação entre o movimento do projétil e o ar que o envolve. Outros parâmetros envolvidos são: calibre, formato, massa, velocidade inicial e rotação que são fatores determinantes para a construção de um projétil com grande poder de destruição. A massa e a velocidade são dois dos fatores mais relevantes no desenvolvimento de uma arma e de um projétil (GRILO, 2009). A energia que será transmitida ao alvo é igual à energia cinética do projétil em movimento que é dada por:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{Eq. 2.1}$$

Onde:

E → Energia (J)

m → Massa (Kg)

v → Velocidade (m/s)

A balística terminal ou balística de efeitos é a área da ciência que estuda o comportamento do projétil durante o impacto com o alvo. É descrita pela ocorrência de eventos com elevadas velocidades, pressões e grandes taxas de deformação. Os estudos teóricos são realizados com o intuito de maximizar a penetração, com a possibilidade de fragmentação ou não do projétil ao atingir o alvo, a utilização ou não de instrumentos explosivos nos extremos do projétil, dentre outros, com a finalidade de potencializar desta forma a sua capacidade de destruição. (JUSSILA, 2005).

O desempenho de sistemas de proteção é medido seguindo normas e padrões internacionais. O mais aplicado é o adotado pelo Instituto Nacional de Justiça dos Estados Unidos (NIJ – *National Institute of Justice*).

A norma NIJ 0101.06 é um documento técnico que especifica os requisitos mínimos que os equipamentos de proteção devem ter, para satisfazer as exigências dos órgãos de justiça penal e os métodos que serão utilizados para atestar a confiabilidade do equipamento. As normas NIJ 0101.04 e ABNT NBR 15000 determinam os níveis de proteção (TAB. 2.1 e FIG 2.1) que as vestes balísticas devem ter para cada tipo de armamento e projéteis, que também são adotados pelo CAEX (Centro de Avaliação do Exército Brasileiro), outro tópico relevante abordado pela norma NIJ 0101.04 é a determinação do limite de deformação do equipamento de proteção diante do impacto balístico.

TAB. 2.1 – Tabela de resistência segundo a norma NIJ STANDARD, classificação dos coletes balísticos de acordo com o nível de proteção.

<b>Tipos de proteção</b>	<b>Munição de teste</b>	<b>Massa nominal do projétil (g)</b>	<b>Velocidade exigida do projétil (m/s)</b>
I	.38 especial	10,2	259
	.22 LRHV	2,6	320
II-A	.357 Magnum	10,2	381
II	9 mm	8,0	332
	.357 Magnum	10,2	425
III-A	9 mm	8,0	358
	.44 Magnum	15,55	426
	9 mm	8,0	426
III	7,62	9,7	838
IV	30-06	10,8	868

Adaptada, NIJ 0101.04, (2000).



Nível Balístico	Munição	Massa do Projétil (g)	Velocidade m/s	Nº de Impactos
I	.22 LRHV Chumbo	2.6 +/- 0,1	320 +/- 10	5
	380 RN Chumbo	10,2 +/- 0,1	254 +/- 15	5
II-A	9mm FMJ	8.0 +/- 0,1	332 +/- 12	5
	357 Magnum JSP	10,2 +/- 0,1	381 +/- 12	5
II	9mm FMJ	8.0 +/- 0,1	358 +/- 15	5
	357 Magnum JSP	10.2 +/- 0,1	425 +/- 15	5
III-A	9mm FMJ	8.0 +/- 0,1	426 +/- 15	5
	44 Magnum SWC GC	15.6 +/- 0,1	426 +/- 15	5
III	7.62x51 FMJ	9.7 +/- 0,1	838 +/- 15	5
	(.308 – Winchester)			
IV	.30 - 06 AP	10.8 +/- 0,1	868 +/- 15	1

FIG. 2.1 – Níveis de blindagens segundo a norma ABNT NBR 15000.

Neste estudo foram utilizados projéteis de calibre 7,62 x 51 mm, referente à blindagem nível III. Para as blindagens com nível de proteção igual ou superior a III, é necessário à utilização de placas cerâmicas para redução do impacto do projétil (BÜRGER, 2012).

## 2.2. Blindagem

Desde os primórdios da história a humanidade já fazia uso de mecanismos com a finalidade de proteção durante os combates. Esses equipamentos de proteção eram confeccionados principalmente de couro, vime, madeira e metais, dando origem a escudos, capacetes e equipamentos de proteção para peitos, pernas e braços. Os armamentos utilizados eram punhais, lanças, machados, flechas e espadas.

Durante a idade do ferro as armaduras eram constituídas basicamente por metais. Em virtude disso, os soldados vestiam equipamentos de proteção extremamente pesados, reduzindo muito a agilidade e a destreza nos combates, o que tornou a utilização de armaduras feitas com espessas camadas de algodão, que eram capazes de proteger contra flechas, lanças e espadas, ainda bastante viáveis.

Porém com o advento das armas de fogo foi necessário aperfeiçoar a tecnologia das armaduras, com isso houve a necessidade de incorporar placas metálicas na composição da blindagem. Entretanto o grande empecilho das blindagens metálicas foi o peso excessivo, tornando-as impróprias, pois limitava muito a mobilidade que era exigida da tropa durante a guerra, dessa forma era essencial o desenvolvimento de uma blindagem mais leve e mais resistente (GONÇALVES, 2000a).

A blindagem ao ser impactada pelo projétil dá origem primeiramente a cargas compressivas, para depois se tornarem trativas e cisalhantes. Nenhum material possui resistência máxima a essa associação de cargas num evento balístico. Para solucionar este impasse assim como, ajudar a conciliar uma maior mobilidade com a segurança, foram desenvolvidas blindagens compostas ou híbridas (multicamadas). Isto é, a combinação de dois ou mais materiais com propriedades distintas que atuam de forma conjunta, de modo que as características de cada material deve suplementar a deficiência do outro durante o impacto do projétil (XAVIER; COSTA, 1984).

### **2.3. Sistema multiblindagem**

Uma blindagem multicamada tem o objetivo não apenas de absorver a energia do projétil, mas também de impedir a penetração dos fragmentos. Segundo a norma NIJ 0101.04 uma blindagem é considerada efetiva quando proporciona em uma parede de plastilina, penetração do projétil inferior a 1,73 polegadas (44 mm). A plastilina está simbolizando um corpo humano e penetrações maiores que este valor causaria danos letais a vida (MEDVEDOVSKI, 2010).

As blindagens multicamadas normalmente são compostas pela junção de uma camada cerâmica e outra de polímero ou compósito. Dentre as cerâmicas balísticas destacam-se a alumina ( $Al_2O_3$ ), carbeto de boro ( $B_4C$ ) e o carbeto de silício (SiC), elas possuem alta resistência a temperatura, elevada dureza e são bastante leves quando comparadas a proteções metálicas (NORONHA e MELO, 2010).

O cerâmico normalmente é a camada frontal e com isso ela recebe o primeiro impacto do projétil em alta velocidade, por ser um material frágil é incapaz de

suportar toda propagação da onda, acarretando assim sua ruptura. Entretanto, a principal função da pastilha cerâmica é deformar e fragmentar o projétil, além de melhorar a distribuição da pressão de impacto sobre a segunda camada. Desta forma, grande parte da energia cinética do material é dissipada através da fragmentação dinâmica do projétil (DA SILVA et al, 2014). Essa fragmentação envolve etapas de nucleação, crescimento e coalescimento das microtrincas (MEDVEDOVSKI, 2010). No entanto, para que toda a energia residual dos fragmentos do projétil e da cerâmica seja absorvida, é necessária a utilização de outra camada.

A segunda camada da blindagem é composta por um material capaz de absorver a energia residual dos fragmentos do projétil e da própria cerâmica e transformar a energia cinética em energia de deformação plástica. Esta camada normalmente é composta por materiais poliméricos como poliamidas, aramidas e polietilenos, ou composta por materiais compósitos, que no caso desta dissertação são compósitos reforçados com fibras ou plaquetas de bambu (NORONHA e MELO, 2010).

Um sistema de multiblindagem também pode incluir uma terceira camada composta por um metal dúctil. Na presente dissertação foi usada uma placa de alumínio T 6061, apoiada em um caixa de plastilina, essa terceira camada ajuda a reter ainda mais a penetração do projétil e também a absorver o restante da energia dissipada. Outra função importante desta última camada é que com o impacto do projétil na blindagem, ocorre a propagação das ondas de choque e com isso o alumínio sofre abaulamento e por consequência transmite a plastilina uma indentação, que nos permite medir o a profundidade do trauma e comparar com a especificação da norma NIJ 0101.04.

Portanto, um sistema de proteção multicamadas é composto por uma placa (ladriho) cerâmica (primeira camada, FIG. 2.2) com densidade em torno de  $3,53 \text{ g/cm}^3$ , seguida por um conjunto de fibras de aramida com densidade média de  $1,44 \text{ g/cm}^3$  (segunda camada, FIG. 2.2) e por fim uma placa de alumínio com densidade  $2,7 \text{ g/cm}^3$  (terceira camada, FIG.2.2).

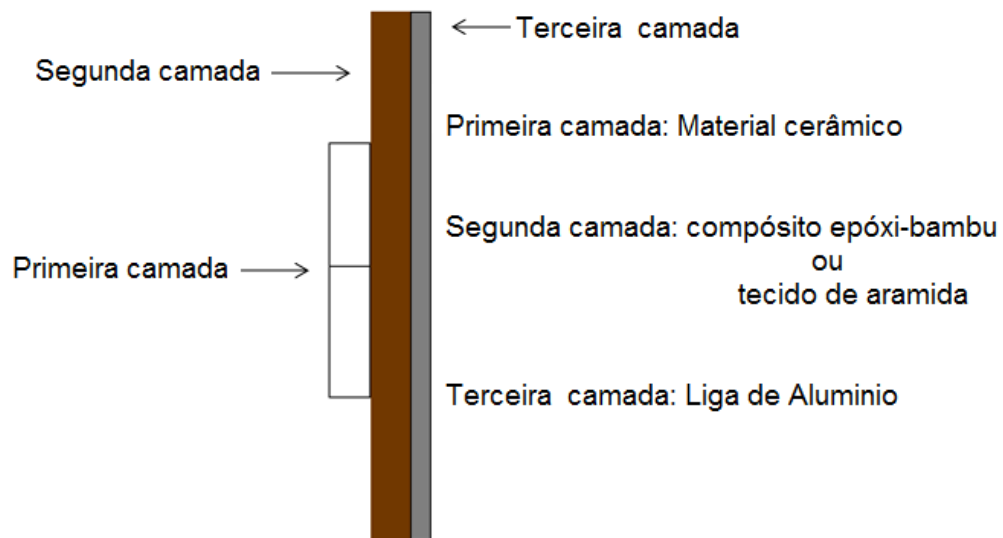


FIG. 2.2 – Esquema de uma blindagem multicamadas.

A necessidade de componentes mais leves ocupando camadas intermediárias se faz necessário não apenas para a mobilidade e o conforto do usuário, mas também visa melhorar absorção do impacto do projétil. Com a possibilidade de redução de peso e de custos, mas sem perder a eficiência da proteção balística, a substituição da aramida por um compósito com baixa densidade e que possa ter um bom comportamento balístico, se torna muito interessante (MONTEIRO et al., 2014b).

#### 2.4. Comportamento dinâmico dos materiais

O estudo do comportamento dinâmico dos materiais envolve a confluência de várias outras disciplinas. Processo dinâmico é um fenômeno que ocorre quando os materiais são submetidos à rápida mudança de cargas, no qual difere significativamente dos processos que ocorrem em situações estáticas ou quase-estático. Com isso a compreensão da resposta dinâmica de materiais é muito importante (MEYERS, 1994).

Por definição, um processo dinâmico, é a aplicação de uma força externa em um corpo. Quando uma força externa  $F$  provoca a um corpo um carregamento lento, considera-se que como um todo este corpo responde por inércia. É possível

considerar o processo de deformação como uma continuidade de etapas no qual o corpo permanece em equilíbrio estático, onde, a qualquer instante, o somatório das forças e dos momentos em todos os pontos é igual à zero (MEYERS, 1994 e CHAGAS, 2014).

Como consequência, o desempenho balístico dos materiais depende de mecanismos com alta taxa de deformação envolvida no processo, assim como da resposta dinâmica dos materiais a estes mecanismos. De acordo com o nível de tensão existente no material, pode-se ter como resposta à solitação externa ondas elásticas, plásticas e de choque (MEYERS, 1994).

A onda elástica é aquela que transmite tensões que estejam no regime elástico do material. A velocidade da onda ( $C_0$ ) elástica é dada por:

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{Eq. 2.2}$$

Onde:

$\rho$  → densidade do material

$E$  → módulo de elasticidade

Em materiais dúcteis, quando a tensão ultrapassa o limite elástico, o material deforma-se plasticamente, tanto em deformação dinâmica como em deformação quase-estática. Um pulso de tensão que está se deslocando pelo material se decompõe, em uma onda elástica e uma onda plástica, quando a sua amplitude excede o limite elástico (MEYERS, 1994, WEBER, 2004).

$$V_p = \sqrt{\frac{d\sigma/d\varepsilon}{\rho}} \quad \text{Eq. 2.3}$$

Onde:

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

$\rho$  → é a densidade.

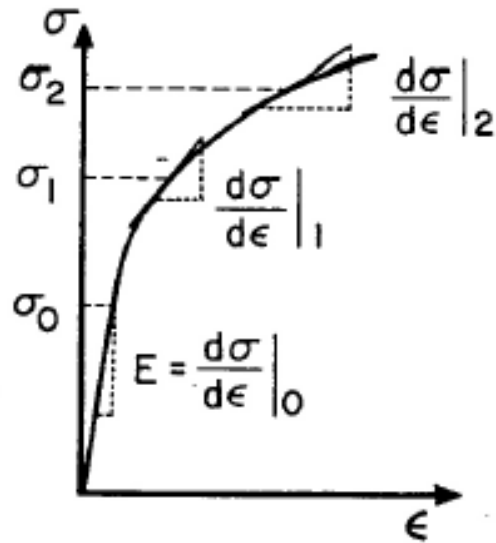


FIG. 2.3 – Curva tensão versus deformação em um material dúctil (MEYERS, 1994).

O módulo de elasticidade  $E$  é dado por  $d\sigma/d\epsilon$ , na região elástica. Em um gráfico de tensão versus deformação, a inclinação da curva na zona elástica é maior do que na região plásticas, isso mostra que a velocidade de propagação de uma onda elástica é maior do que a de uma onda plástica (TRINDADE, 2012).

Segundo MEYERS (1994), as tensões cisalhantes podem ser desprezadas quando as ondas de tensão excedem o limite de escoamento dinâmico do material, pois, nestas condições, o material se comporta como um fluido e pode ser considerado um gás ideal, onde:

$$dP/dV = -y \cdot P/V \quad \text{Eq. 2.4}$$

Onde:

$P \rightarrow$  é a Pressão.

$V \rightarrow$  é o Volume.

$y \rightarrow$  é o índice adiabático.

Neste caso, as ondas se propagam em uma frente única a uma velocidade maior que a da onda elástica e são chamadas de ondas de choque, sendo tratadas matematicamente pelas equações de Rankine-Hugoniot (MEYERS, 1994).

A frente de choque pode ser considerada como um plano que separa o fluido que se move do fluido ainda estacionário com o movimento do pistão. Este plano movimenta-se pelo meio com velocidade  $U_s$ , conforme a FIG. 2.4. Observa-se que a região perturbada pelo movimento do pistão a uma velocidade  $U_p$ , possui uma fronteira bem definida em relação à região não perturbada. Essa fronteira ou frente de choque propaga-se pelo material com velocidade  $U_s > U_p$ . (MEYERS, 1994).

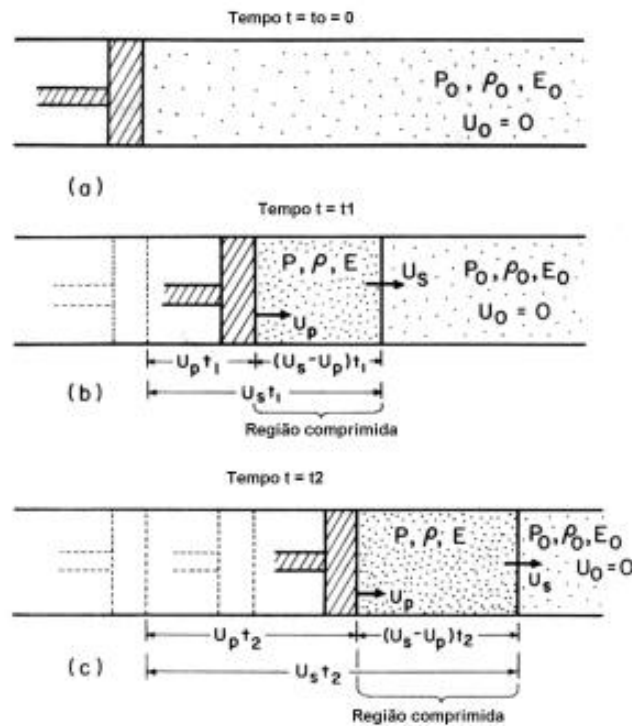


FIG. 2.4 – Ilustração da propagação de região comprimida em um pistão de gás: (a) Antes do choque; (b) Após um tempo  $t_1$ ; (c) Após um tempo  $t_2 > t_1$ . Adaptado Meyers, 1994.

Quanto maior a amplitude do distúrbio, ou seja, quanto maior a tensão provocada pela solicitação externa, maior será sua velocidade de propagação, efeito este contrário ao que ocorre nas ondas plásticas, onde quanto maior a tensão menor é a sua velocidade. No caso de ondas de choque, regiões com maior amplitude de onda deslocam-se mais rápido do que as regiões de menor amplitude, produzindo, assim, discontinuidades na pressão, temperatura (ou energia interna) e densidade (MEYERS, 1994).

O conceito de propagação da onda de choque requer a utilização das três relações de conservação de *Rankine-Hugoniot*.

### Conservação de energia

$$E - E_0 = \frac{(P - P_0) \cdot (V_0 - V)}{2} \quad \text{Eq. 2.5}$$

Onde:

$E$  → Energia interna do material durante a passagem da onda.

$E_0$  → Energia interna do material após a passagem da onda.

$P$  → Pressão durante a passagem da onda.

$P_0$  → Pressão antes da passagem da onda.

$V$  → Volume durante a passagem da onda.

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

### Conservação de massa

$$\rho_0 \cdot U_s = \rho \cdot (U_s - U_p) \quad \text{Eq. 2.6}$$

Onde:

$\rho$  → Densidade do material durante a passagem da onda.

$\rho_0$  → Densidade do material antes da passagem da onda.

$U_s$  → Velocidade da propagação da onda de choque.

$U_p$  → Velocidade das partículas.

### Conservação de momento

$$P - P_0 = \rho_0 \cdot U_s \cdot U_p \quad \text{Eq. 2.7}$$

Onde:

$P$  → Pressão durante a passagem da onda.

$P_0$  → Pressão antes da passagem da onda.

$\rho_0$  → Densidade do material antes da passagem da onda.

$U_s$  → Velocidade da propagação da onda de choque.

$U_p$  → Velocidade das partículas.



Nas 3 equações acima existem 5 variáveis, P;  $U_p$ ;  $U_s$ , E;  $\rho$ , então, para determinar todos os parâmetros é necessário uma quarta equação, que é conhecida como equação de estado do material (EOS). Esta equação expressa uma relação entre  $U_p$  e  $U_s$ , obtida experimentalmente, usa-se uma relação empírica polinomial contendo como parâmetro  $S_1$  e  $S_2$ . Assim tem-se:

$$U_s = C_0 + S_1 U_p + S_2 U_p^2 + \dots \quad \text{Eq. 2.8}$$

Onde:

$S_1, S_2 \rightarrow$  Parâmetros empíricos

$C_0 \rightarrow$  Velocidade do som no material a pressão(P) igual a zero.

Para a maioria dos materiais os parâmetros empíricos de ordem maior que 1 são nulos. Logo a equação se reduz a:

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

Essa relação linear entre a velocidade de propagação da onda de choque e a velocidade das partículas descreve razoavelmente bem, a resposta ao choque de materiais não sujeitos a transformação de fases. Os valores de  $C_0$  e  $S_1$  são normalmente tabelados e encontrados na literatura (MEYERS, 1994). Essas relações só podem ser aplicadas se atender algumas considerações:

- a) a onda de choque é uma superfície descontínua sem espessura aparente;
- b) o módulo de cisalhamento é zero quando o material comporta-se como um fluido;
- c) carregamento quase estático e processo adiabático, portanto, as forças de corpo, como força gravitacional e a condução de calor na frente de choque são desprezíveis;
- d) não há comportamento elastoplástico; e
- e) o material não sofre transformações de fase.

Segundo Zukas (1982) os métodos determinísticos ou probabilísticos ajudam a compreensão e a determinação do comportamento de materiais para aplicações em

blindagens balísticas. Os métodos determinísticos são amparados pelas três relações de conservação de *Rankine-Hugoniot* (massa, energia e momento), além das equações de estado dos materiais, para que seja possível a determinação da velocidade crítica de impacto, aquela onde não ocorre a perfuração da blindagem. Já os métodos probabilísticos é um método estatístico que se baseia na possibilidade de ocorrer à perfuração ou não do alvo, onde o critério adotado é o limite balístico, ou seja, a velocidade onde a perfuração ocorre com certa probabilidade. Para um levantamento estatístico o método probabilístico exige uma quantidade muito maior de ensaios do que o método determinístico.

O critério mais utilizado é o limite balístico  $V_{50}$ , que é a velocidade para o qual existe uma probabilidade de 50% dos impactos convertam-se em penetração completa e o restante em penetração parcial. Isso pode ser ilustrado na FIG. 2.5, pela curva típica da probabilidade de perfuração versus a velocidade de impacto (ZUKAS, 1982).

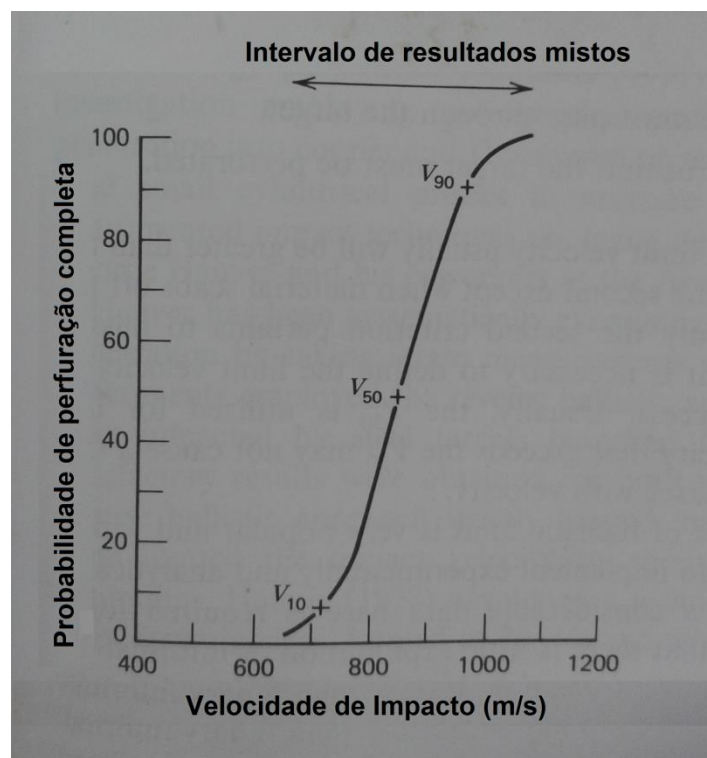


FIG. 2.5 – Curva da probabilidade de penetração (ZUKAS, 1982).

Como não é possível garantir que em todas as situações ocorra a perfuração ou não do alvo, se faz necessário aplicar alguns princípios físicos para determinar o valor do limite balístico.

Com isso sabendo que a energia cinética dissipada pelo projétil durante a penetração no alvo é igual à energia total absorvida pelo alvo, é possível calcular a velocidade limite do projétil ( $V_L$ ). Segundo Morye (2000), a velocidade limite pode ser entendida como a máxima velocidade em que o alvo absorve a energia cinética do projétil, sem que ocorra a perfuração do mesmo.

A Eq. 2.10 demonstra que a valor da energia absorvida ( $E_{abs}$ ) é dado pela diferença entre a velocidade de impacto do projétil ( $V_i$ ) e a velocidade residual ( $V_r$ ). e, m, é a massa do projétil.

$$E_{abs} = \frac{1}{2} m (V_i^2 - V_r^2) \quad \text{Eq. 2.10}$$

Logo a relação entre a velocidade limite ( $V_L$ ) e a energia absorvida é dada pela equação:

$$E_{abs} = \frac{1}{2} m V_L^2 \quad \text{Eq. 2.11}$$

#### 2.4.1. Interação e reflexão de ondas de choque

Quando uma onda de choque propaga-se de um meio A para um meio B, ocorrem mudanças na pressão, na velocidade da onda, na densidade e assim por diante. Segundo Meyers (1994), a impedância de choque é definida como o produto da densidade inicial,  $\rho_0$ , pela velocidade da onda de choque,  $U_s$ . É possível fazer uma aproximação colocando a impedância de choque como o produto da densidade inicial  $\rho_0$  pela velocidade sônica da onda  $C_0$ , conforme é visto na EQ 2.12. Consequentemente, materiais com altas densidades e alta velocidade sônica, a impedância também será maior.

$$\rho_0 U_s \cong \rho_0 C_0 \quad \text{Eq. 2.12}$$

Antes do impacto o projétil viaja a uma velocidade  $V$  e o alvo está em repouso. Após o impacto duas ondas compressivas são geradas, uma delas viaja para dentro do projétil com velocidade  $U_{s1}$  e outra para dentro do alvo com  $U_{s2}$ . A porção não comprimida do projétil ainda move-se com velocidade  $V$ . enquanto a porção não comprimida do alvo ainda está em repouso.

O melhor método para tratar a transferência de uma onda de um meio A para um meio B, para materiais com alta impedância, é o casamento de impedâncias. Para que tenha igualdade de pressão ( $P_1 = P_2$ ) e de velocidades de partículas ( $U_{p1} = U_{p2}$ ) é necessário que o material seja contínuo na interface de impacto. Se as velocidades forem diferentes haveria vazios ou regiões de super altas densidades, o que não acontece. Caso as pressões não sejam iguais, ocorreria a formação de outro pulso (MEYERS, 1994).

#### 1. Material A (menor impedância) e B (maior impedância): $A \rightarrow B$

A reta tracejada da curva do material A é a conhecida como linha de Rayleigh, através da sua inclinação é possível explicar a descontinuidade de pressão e de densidade durante o choque. A inclinação da linha de Rayleigh é dado pelo produto da densidade do material ( $\rho_0$ ) e a velocidade da onda de choque ( $U_s$ ) (MEYERS, 1994).

Na FIG. 2.6(a), o material A representa o projétil que irá impactar o alvo representado pelo material B. Para determinar a pressão na interface  $P_2$  é necessário calcular a velocidade de partícula na interação entre o material A e o material B.

No momento do impacto, a velocidade das partículas na região comprimida do projétil é reduzida de  $V$  para  $U_{p2}$ . A velocidade da partícula  $U_{p2}$  é dada pela interseção da curva Hugoniot do material B com a curva invertida do material A. Através das equações de conservação e a de estado do material é possível determinar os valores de  $P_2$  e  $U_{p2}$  (MEYERS, 1994).

Com auxílio do perfil de pressão (FIG. 2.6b), é possível observar que, quando a onda de choque atinge a interface, a pressão  $P_1$  sobe para  $P_2$ . Assim, ocorre a decomposição da onda e uma frente de pressão é propagada em A e outra em B. Com isso esta frente de pressão retorna na forma de uma onda compressiva e a partir daí a pressão cai para o valor de  $P_2 - P_1$  (MEYERS, 1994).

Este pulso prossegue propagando para esquerda. A velocidade de partícula dentro da região de alta pressão será  $U_{p2}$  tanto para A quanto para B. Desta forma a continuidade de pressão e de velocidade de partícula será assegurada (MEYERS, 1994).

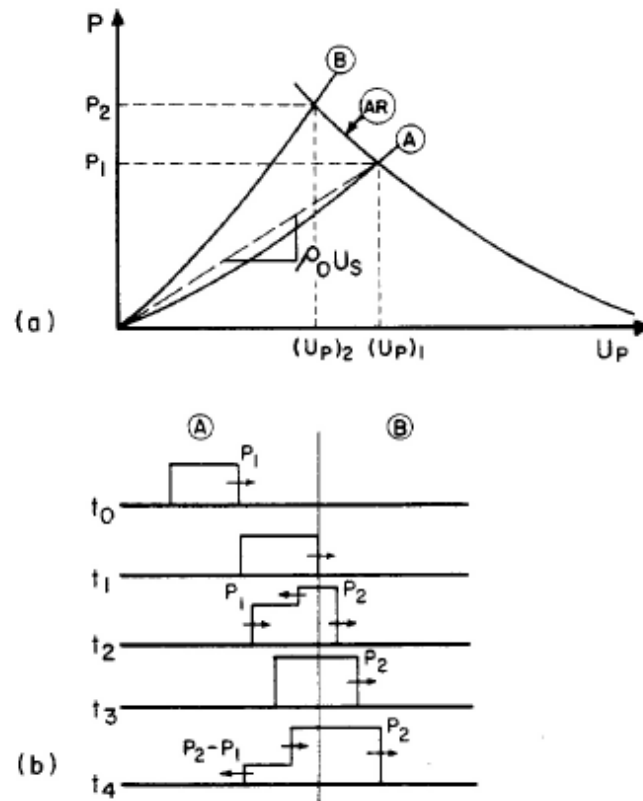


FIG. 2.6 – Transferência da onda de choque de um meio com baixa impedância para um meio com alta impedância: (a) gráfico pressão versus velocidade de partícula; (b) perfis de pressão. Adaptado de Meyers, 1994.

## 2. Material A (maior impedância) e o B (menor impedância): $B \rightarrow A$

Conforme é mostrado na FIG. 2.7(a), primeiramente deve-se inverter a curva do material A, na pressão  $P_1$  (AR), com a finalidade de determinar os valores da velocidade de partícula e a pressão na interface dos materiais A e B. A interseção entre a curva invertida e a curva do material B, ocorrerá em  $P_2$ . Onde  $P_2$  é menor que  $P_1$ . A pressão  $P_2$  produzirá um pulso de relaxação a ser enviado através do meio A. Considerando-se que A e B são meios semi-infinitos e que o pulso de relaxação pode viajar livremente até que encontrar a frente de onda do pulso primário (MEYERS, 1994).

No tempo  $t_4$ , um pulso de natureza trativa se formará propagando-se em ambas as direções. Caso este pulso trativo possua amplitude suficientemente alta, pode acarretar o estilhaçamento do material (MEYERS, 1994).

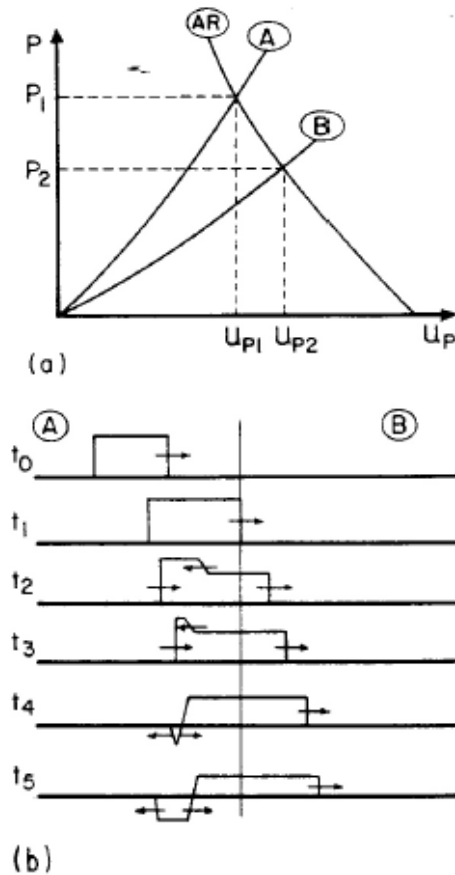


FIG. 2.7 – Transferência da onda de choque de um meio com alta impedância para um meio com baixa impedância: (a) gráfico pressão versus velocidade de partícula; (b) perfis de pressão. Adaptado de Meyers, 1994.

## 2.5. Fibras

As fibras por definição são materiais relativamente finos e alongados, com uma dimensão muito maior que as outras duas, que podem ser contínuos ou cortados. As fibras podem ser divididas em dois grupos principais, fibras naturais e fibras feitas pelo homem (sintéticas).

Fibras sintéticas é a designação para fibras processadas pela extrusão de um material sintético ou fruto de pesquisas que visam o aperfeiçoamento das

propriedades físicas, mecânicas ou químicas de fibras naturais. Portanto, fibra sintética é uma fibra artificial criada a partir de materiais naturais ou por processos químicos. Exemplos de fibras sintéticas são: o poliéster, nylon, aramida, entre outros (MANO, 2010).

As fibras naturais podem ser subdivididas conforme suas origens: as fibras de origem vegetal são compostas por celulose (bambu, sisal e rami), já as fibras de origem animal consistem em proteínas (cabelos, seda, e lã), enquanto que as fibras de origem mineral têm a sua origem em rochas com estrutura fibrosa e são constituídas essencialmente por silicatos, como por exemplo, o basalto e o amianto (BLEDZKI; GASSAN, 1999).

#### 2.5.1. Fibras vegetais

As fibras naturais ricas em celulose, obtidas a partir de vegetais, são também conhecidas como “fibras vegetais” ou “fibras lignocelulósicas” (FLCs). O último nome é o termo comumente utilizado na literatura, e indica a predominância de lignina e celulose na estrutura da fibra vegetal natural. Em virtude dessa predominância as fibras naturais podem ser consideradas compósitos naturais (MONTEIRO et al., 2011).

As fibras sintéticas como a fibra de carbono, aramida e a de vidro, são desenvolvidas com uma série de propriedades pré-definidas, enquanto que as fibras naturais, as propriedades características das fibras naturais variam consideravelmente. Isso ocorre devido algumas particularidades, ou seja, a propriedades das fibras naturais dependem: da origem de onde foram retiradas caule, da folha, ou da semente, da idade da planta, do pré-acondicionamento. As fibras podem ser reagrupadas conforme a TAB. 2.2 (MOHANTY et al, 2000).

TAB. 2.2 – Origem de algumas fibras importantes.

<b>Origem</b>	<b>Fibras</b>
Folha	Sisal, Curauá, piaçava e abacá.
Sementes	Algodão
Fruto	Casca de Coco
Caule	Linho, juta, malva e rami.
Madeira	Eucalipto e pinho
Gramíneas	Bambu, Bagaço de cana.

JOHN; THOMAS, 2008, Adaptada,

As fibras vegetais ou lignocelulósicas são compósitos naturais constituídos principalmente por: celulose, lignina e hemicelulose. Em que as microfibrilas de celulose reforçam uma matriz que as envolve, formada de lignina e hemicelulose. A TAB. 2.3 relaciona os principais constituintes químicos para alguns tipos de plantas.

TAB. 2.3 – Composição de algumas fibras.

<b>Fibra</b>	<b>Celulose (%)</b>	<b>Hemicelulose (%)</b>	<b>Lignina (%)</b>	<b>Ceras (%)</b>
Bagaço	55,2	18,6	25,3	-
Bambu	26-43	30	21-31	-
Linho	71	18,6-20,6	2,2	1,5
Juta	61-71	14-20	12-13	0,5
Rami	68,6-76,2	13-16	0,6-0,7	0,3
Sisal	65	12	9,9	2
Coco	32-43	0,15-0,25	40-45	-
Curauá	73,6	9,9	7,5	-

FARUK, 2012. Adaptada.

A estrutura (FIG 2.8) de cada fibra vegetal é um pouco diferente e complexa. A microestrutura é formada por camadas de uma parede muito fina, denominada de primeira camada, ela é depositada durante o crescimento celular e envolve a parede da segunda camada. A segunda camada é composta por três camadas, e as propriedades mecânicas das fibras são determinadas pela espessura da camada média. A camada intermediária é formada por inúmeras microfibrilas celulares enrolados de forma helicoidal, que são formados a partir de moléculas de cadeias longas de celulose: o ângulo difere entre os eixos das fibrilas e das microfibrilas (JOHN; THOMAS, 2008).



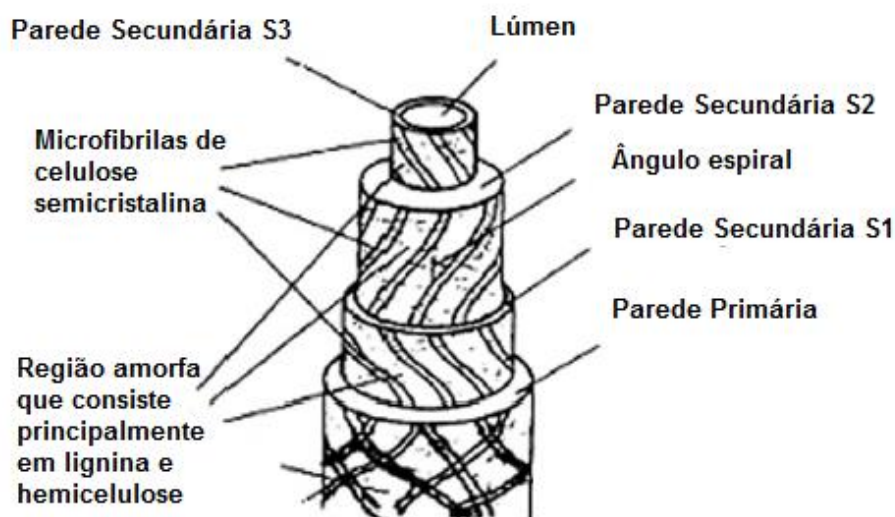


FIG. 2.8 – Microestrutura de uma fibra. (JOHN; THOMAS, 2008)

A parede celular é muito complexa e é formada por uma fase de matriz amorfa que é constituída de hemicelulose, lignina e em outros casos pectina. As moléculas de hemicelulose são cadeias de celulose ligadas a hidrogênios e exerce a função de ligação da matriz com as microfibrilas de celulose, que juntas formam a rede de celulose-hemicelulose, que é citado na literatura como o principal componente estrutural da célula da fibra. A lignina por ser hidrofóbica afeta diretamente as propriedades do compósito celulose-hemicelulose, pois ela aumenta a dureza e também age como um agente de ligação (JOHN; THOMAS, 2008).

Segundo Satyanarayana (1990), a propriedades das fibras são determinadas por um conjunto de parâmetros estruturais importantes como: o ângulo microfibrilar, a estrutura, as dimensões das células, defeitos e composição química. Outro fator importante observado é que, conforme aumenta o teor de celulose da planta, aumenta o módulo de elasticidade e a resistência à tração. Já a rigidez das fibras é proporcionada através dos ângulos microfibrilar.

O crescente interesse pelas fibras lignocelulósicas se deve principalmente devido suas características e suas propriedades, como por exemplo, o baixo custo, baixa densidade, o que resulta numa resistência e rigidez específica mais elevada quando comparada a algumas fibras sintéticas, como a fibra de vidro. Esses fatores possibilitam o uso de materiais compósitos reforçados por fibras naturais em diferentes setores, como indústria automotiva, embalagens e até a de construção civil.

Na atual realidade atual é necessário desenvolver e comercializar materiais compósitos fundamentados na utilização de materiais renováveis ou naturais (biocompósitos), isso ajuda a reduzir a dependência de materiais provenientes de fontes não renováveis (fósseis).

### 2.5.2. Bambu

A espécie vegetal “bambu” é conhecida há milhares de anos por vários povos, pertence à família das gramíneas (*Poaceae*) e à subfamília *bambusoideae*. O ciclo de vida, de algumas espécies, pode atingir cerca de 100 a 120 anos. A cor, a altura total, a distância entre os nós, o diâmetro e a espessura da parede, dependem da espécie, do período e da idade do corte (LOPEZ, 2003).

De acordo com Lopez (2003) existem em torno de 121 gêneros e cerca de 1600 espécies de bambu. Geograficamente, estas espécies são encontradas em regiões temperadas, tropicais e subtropicais dos continentes, com exceção do continente europeu onde não se verificou indícios de espécies (FIG. 2.9). No continente americano o Brasil é o país que possui a maior diversidade e endemismo com aproximadamente 234 espécies. Os estados da Bahia, Minas Gerais, São Paulo e Paraná possuem a maior diversidade de espécie de bambu.

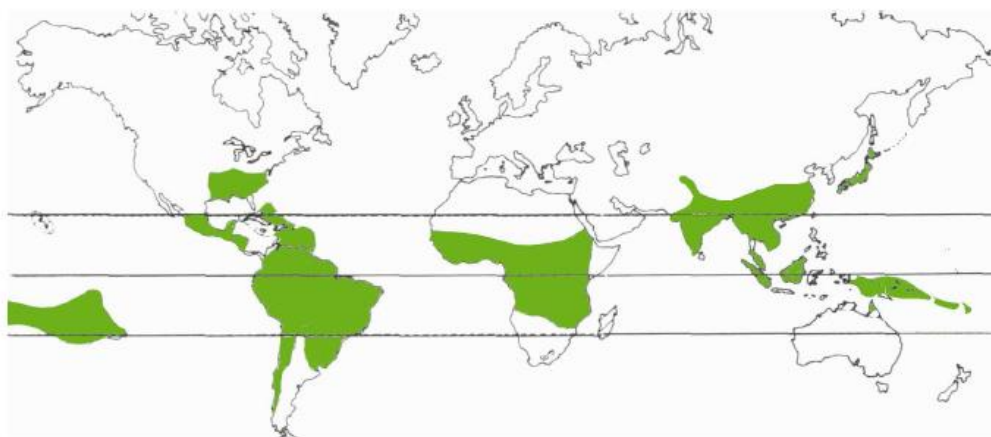


FIG. 2.9 – Distribuição geográfica do bambu. Adaptado LOPES 2003.

O bambu tem a capacidade de fixar mais carbonos do que as árvores (ajudando no combate do efeito estufa), podem ser plantados em terrenos acidentados e é utilizado em recuperação de áreas degradadas (pois não requerem solo com alta fertilidade). Segundo Junior (2010) os bambus são constituídos basicamente por um colmo lenhoso, oco, com fibras alinhadas longitudinalmente dispostas em forma de feixes, proporcionando-o resistência, principalmente na região mais externa. É dotado de ramos e folhas, além dos rizomas, brotos dos rizomas e as raízes que são subterrâneas (FIG. 2.10).

A microestrutura do colmo do bambu consiste de muitos feixes vasculares no tecido parênquima incorporados e distribuídos em toda a espessura da parede. Os feixes vasculares são rodeados por fibrilas, além de estarem mais presentes do lado exterior da parede do colmo e menos abundantes na parte mais interna. O tamanho e densidade de feixes vasculares variam desde a base até ao topo do colmo. Cada feixe vascular é dividido em duas partes, xilema e floema. A função do xilema é a transferência de água e floema é o transporte nutrientes e açúcares para todas as partes da planta (ZAKIKHANI, 2014).

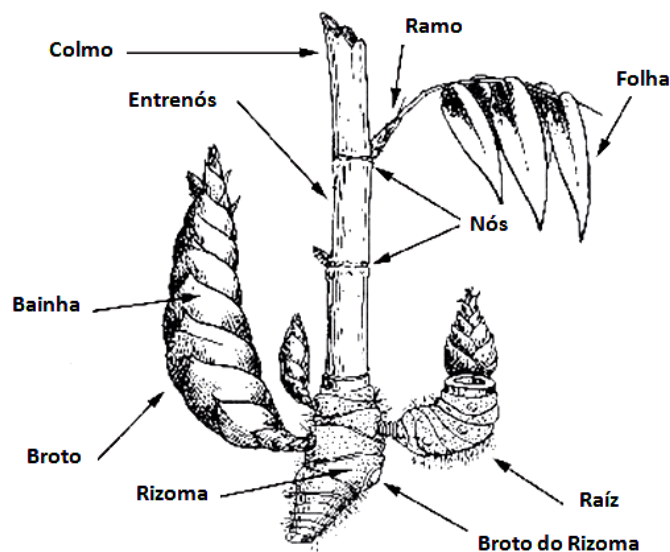


FIG. 2.10 – Partes da planta do bambu (MARINHO, 2012)

Os colmos são geralmente cilíndricos, com uma nítida divisão entre os nós e os entrenós, e pode apresentar o interior oco, onde quase toda a medula desaparece na região dos entrenós permanecendo apenas na região dos nós. Existem basicamente três grupos de bambus quanto ao hábito de crescimento dos rizomas:

os que formam touceira (simpodial), os alastrantes (monopodiais) e os semi-entouceirantes (antipodial).

Os gêneros *Bambusa*, *Dendrocalamus* e *Phyllostachys*, são os mais cultivados no território brasileiro, originários de países asiáticos, que foram trazidos para o Brasil pelos primeiros imigrantes e em virtude da boa adaptação ao clima tropical, foram disseminados por todo o país (GRAÇA, 1988). As espécies *Phyllostachys pubescens* e *Dendrocalamus giganteus*, por exemplo, são plantas que tem elevados potenciais econômicos e industriais.

### 2.5.3. Produção do bambu

A comercialização do bambu é feita geralmente pela venda de mudas e de varas, o preço obedece às condições de mercado e os custos de produção (TAB. 2.4). Os bambus podem se propagar principalmente de duas formas diferentes; primeiro pela reprodução sexuada, ou seja, através das sementes, que no caso não é um método muito fácil devido à baixa viabilidade e qualidade das sementes, e segundo pela reprodução assexuada, através das partes vegetativas da planta, tais como, ramos, gemas e rizomas. A espécie *Dendrocalamus Giganteus* pode reproduzir em torno de três a cinco novas mudas através da secção do colmo.

TAB. 2.4 – Informações comerciais do Bambu *Dendrocalamus Giganteus*.

<b>Diâmetro</b>	<b>Comprimento (m)</b>	<b>Tratamento</b>	<b>Estado</b>	<b>Preço/dúzia (R\$)</b>
12 a 20	3,40	Cozido	SP	200,00
12 a 20	7 – 8	Sem tratamento	SP	200,00
Qualquer diâmetro	8	Cozido a vapor	SP	720,00
Qualquer diâmetro	10 – 12	Autoclave	RJ	720,00
Qualquer diâmetro	7 – 8	Sem tratamento	RS	840,00

MAGALHÃES, 2008. Adaptada

De acordo com Pereira e Beraldo (2007), o bambu pode ser dividido conforme ao estágio de vida das seguintes formas;

- Inferior a um ano é considerado broto;

- Entre um e três anos é um bambu jovem, e
- Acima três anos o bambu encontra-se maduro.

A idade do bambu é algo fundamental para efetuar o corte, porém deve-se levar em conta a aplicação, por exemplo, para usos de tecelagem ou cestaria, em função de uma maior flexibilidade, normalmente é mais viável o corte de bambus mais jovens, com a idade inferior a três anos. Já para o uso estrutural, exige uma resistência maior, deve-se usar bambus maduros, não podres, com idade em torno três a seis anos. De acordo com a literatura a idade dos colmos a serem cortados é a melhor forma de controle para se obter um bambu com uma resistência maior, pois em uma touceira existe colmos com várias idades. Os colmos cortados antes do tempo certo, do ponto máximo de maturação, poderão sofrer ataque de pragas.

Segundo Pereira e Beraldo (2007), uma forma de identificar a maturação do colmo é quando há o surgimento de manchas por sua coloração uniforme, que indica a presença de fungos e líquens, as visualizações destas características denunciam a idade do bambu que fica entre três a seis anos. Porém a melhor maneira para determinar a idade é a marcação anual dos colmos. Usualmente os colmos são cortados de dentro para fora da touceira, ficando apenas os colmos ao redor, os colmos maduros se encontram no centro da touceira. Normalmente é aconselhável respeitar um período de 2 anos até a próxima colheita, permitindo assim o crescimento e o desenvolvimento dos brotos e dos colmos remanescentes. Se for respeitado este ciclo de dois anos entre os cortes, pode-se obter uma produção contínua por até 10 anos, antes do novo plantio.

O corte deve ocorrer aproximadamente na altura do segundo nó, evitando o acúmulo de água na parte que sobra na touceira, assim também ajuda a prevenir o apodrecimento da raiz (BARBOSA; GHAVAMI, 2005). Após o corte do bambu deve-se ter cuidado com o local de armazenamento, para o bambu não ficar sujeito a ação do tempo, como o sol, água e umidade. Para conseguir colmos resistentes é necessário efetuar o corte na estação adequada e de forma correta. Desta forma, a melhor época do ano geralmente é o inverno, pelo fato de ser a estação no qual ele mantém a maior parte de suas reservas nos rizomas, momentos antes do aparecimento dos novos brotos. Um fator importante também é que nesta época o

colmo tem menores teores de açúcar, o que ajuda evitar o aparecimento de fungos e insetos que se alimentam do bambu (PEREIRA, 2001).

### 2.5.3. Bambu *Dendrocalamus giganteus*

*Dendrocalamus giganteus* é a maior espécie entre todos os bambus, originário de Myanmar, onde geralmente ocorre em altitudes em torno de 1200 m. Apresenta colmos eretos, com entrenós variando de 30 a 55 cm. Pode alcançar o comprimento de até 30 m, com diâmetro de 30 cm e 90 kg quando hidratado. A espécie *Dendrocalamus giganteus* (FIG. 2.11), pertence ao grupo paquimorfo ou simpodial. Possui rizomas menores, grossos e sólidos; suas gemas laterais crescem horizontalmente em pequenas distâncias, formando um novo ápice na periferia, criando um agrupamento, na forma de touceira. Durante a estação da chuva afloram os novos brotos (MARINHO, 2012). A FIG. 2.12 apresenta o aspecto geral da planta.



FIG. 2.11 – Espécie *Dendrocalamus giganteus*.  
(Disponível em: < <http://www.flickr.com>>. Acesso em 05 de Janeiro 2015)

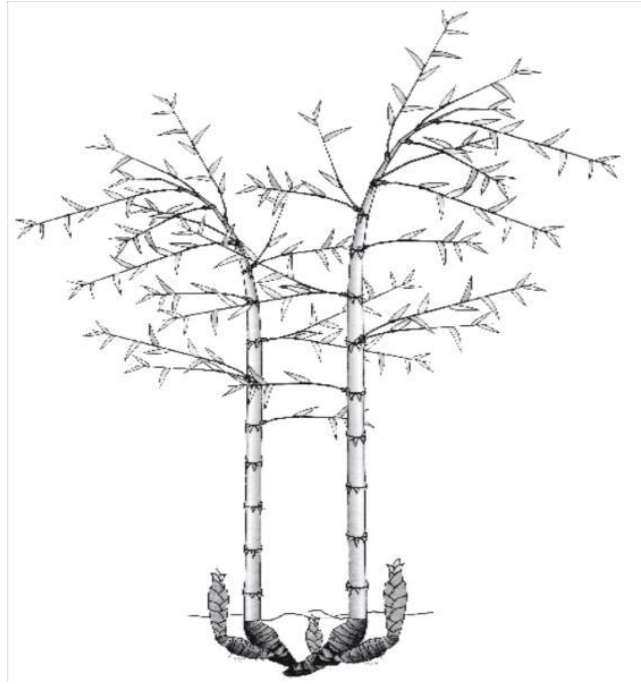


FIG. 2.12 – Grupo paquimorfo ou simpodial (entouceirante) (MARINHO, 2012)

O colmo do bambu contém elevada percentagem de lignina amorfa, isso faz com que as fibras de bambu sejam mais frágeis quando comparada com as outras fibras naturais. O bambu pode ser utilizado como reforço de diferentes formas, tais como, pedaços de bambu, fibras de bambu, placas de bambu, e o bambu como um todo (OKUBO et al, 2004).

Devido ao grande número de espécies de bambu, as características e propriedades químicas, mecânicas, físicas e anatômicas, apresentam grande variabilidade. Essas propriedades estão correlacionadas também, com as condições ambientais, idade da planta, métodos de extração, umidade e o local dos colmos que serão avaliadas. O bom desempenho estrutural dos bambus quanto à compressão, torção, flexão e, sobretudo quanto à tração é conferido pela sua volumetria tubular e pelos arranjos longitudinais de suas fibras que formam feixes de micro tubos (GHAVAMI,1989). A TAB. 2.5 sintetiza alguns valores de propriedades mecânicas do *Dendrocalamus giganteus*.

TAB. 2.5. Propriedades mecânicas do *Dendrocalamus giganteus*.

<b>Tração (MPa)</b>	<b>Compressão (MPa)</b>	<b>Flexão (MPa)</b>	<b>Cisalhamento (MPa)</b>	<b>Autores Ano</b>
135,33	63,74	122,58	44,13	SARTORI e CARDOSO JR. (1997)
143,70	65,50	98,9	----	PEREIRA e BERALDO (2007)
195,00	55,00	166,00	10,0	GONÇALVES et al. (2000a)

MARINHO, 2012. Adaptado.

É válido ressaltar que a densidade do bambu também depende de vários fatores que influenciam diretamente para convergência de um valor único da massa específica e essa discrepância ocorre em bambus da mesma espécie, isso se justifica conforme é relatado na literatura devido às condições edafoclimáticas. Além disso, é relevante salientar que há uma diferença significativa quando se efetua uma amostragem na direção centro-periferia, ou seja, nas camadas mais externas (próximo à casca) existe a presença de uma quantidade maior de feixes de fibras e em consequência, a densidade é mais elevada (CHEN et al, 2009). A TAB. 2.6 mostra alguns valores de massa específica do *Dendrocalamus giganteus*.

TAB. 2.6 – Diferentes valores de densidades do *Dendrocalamus Giganteus*.

<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Autores / Ano</b>
0,58 a 0,75	GONÇALVES et al, 2002
0,58 a 0,79	BERALDO E RIVERO, 2003
0,68 a 0,76	PAES et al., 2009
0,74	BRITO et al, 1987
0,80	GHAVAMI E SOLORZANO, 1995

## 2.6. Polímeros

Os polímeros podem ser naturais ou sintéticos. Dentre os vários polímeros naturais é possível citar a celulose, lignina, lã, látex natural e a seda. São exemplos de polímeros sintéticos o PVC, o Nylon, e o silicone. A reação química que conduz à



formação de grandes moléculas (polímeros), a partir da união de pequenas moléculas (monômeros), é conhecida por polimerização (DE PAOLI, 2009).

Segundo MANO (2001), uma forma bastante usual para classificar os polímeros é à luz das características tecnológicas, do comportamento mecânico e da estrutura química.

De acordo com a estrutura química da cadeia polimérica, os polímeros podem ser distribuídos em inúmeros grupos, como poliamidas, poliéster, poliuretanos, poliacetais, etc (WEBER, 2004).

Em relação às características tecnológicas de fusibilidade os polímeros são divididos em termoplásticos e termorrígidos. Os termoplásticos são compostos que possuem estruturas lineares ou ramificadas. Além disso, as ligações entre átomos de diferentes cadeias são relativamente fracas, ligações do tipo Van der Waals. Devido à força dessas ligações os termoplásticos amolecem quando são aquecidos e endurecem quando são resfriados. Alguns exemplos de termoplásticos de grande utilização industrial e comercial são o polietileno (PE), o policloreto de vinila (PVC), o polipropileno (PP), poliestireno (PS), e a poliamida (PA, ou náilon), entre outros (CALLISTER, 2008).

Já os termorrígidos são polímeros em rede, que apresentam ligações cruzadas covalentes entre as cadeias adjacentes, no qual a energia necessária para o rompimento destas ligações é muito alta e o rompimento dessas cadeias, através de um aquecimento a elevadas temperaturas, causam a degradação do polímero. Essas ligações, ao longo dos processos térmicos, prendem as cadeias umas às outras e assim apresentam uma boa resistência em altas temperaturas, aos movimentos de rotação e de trepidação dessa estrutura. Diante desses fatos, os polímeros termorrígidos são mais duros e mais resistentes que os termoplásticos, e possuem melhor estabilidade dimensional. Os grupos funcionais dos polímeros termorrígidos mais comuns são: fenólicos, aminas, poliésteres, epóxis, e silicone (CALLISTER; ASKELAND; PHULÉ, 2008).

Por fim, de acordo como seu comportamento mecânicos os polímeros podem ser divididos em: plásticos, borrachas ou elastômeros e fibras (WEBER, 2004).

### 2.6.1. Resina epóxi

A palavra epóxi vem do grego "EP" (sobre ou entre) e do inglês "OXI" (oxigênio), literalmente o significado é oxigênio entre carbonos. Em um sentido geral, refere-se a um grupo constituído por um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono. Estas resinas são conhecidas desde a década de 40 e são utilizadas em inúmeras áreas, isso ocorre em virtude do seu baixo custo e sua boa resistência quando comparada a outras resinas ofertadas no mercado. Os epóxios estão enquadrados na classe dos polímeros termorrígidos. Essas moléculas são polimerizadas com a finalidade de construir cadeias e, então, entram em reação química com agentes de cura para dar condições de se iniciar o processo de reticulação. (ASKELAND; PHULÉ, 2008).

Dentre as classes de polímeros termoestáveis, as resinas epóxi são uma das mais importantes, pois são usadas em diversas aplicações estruturais ou como adesivos e revestimentos, isso ocorre em virtude de apresentar uma alta força de tensão, boas propriedades elétricas, fácil processamento, boa resistência química e térmica. Contudo a grande deficiência, em alguns tipos de aplicações, é a baixa resistência à fratura (PIRES et al, 2005).

A excelente adesão apresentada por estes polímeros é devida a polaridade dos grupos éteres e hidroxilas alifáticas que, frequentemente, constituem a cadeia da resina inicial e a rede do sistema curado. A polaridade desses grupos serve para criar forças de interação entre a molécula epóxi e a superfície adjacente a ela, intensificando o seu uso como adesivo e revestimento. Quando ela é utilizada em compósitos, a existência desses grupos polares minimiza problemas relativos à interface resina/reforço (RUSHING, 1994).

As resinas epóxi transformam-se em polímeros termorrígidos, após a adição de um endurecedor (agentes de cura), ocorre o que é conhecido como reação de cura. Esse processo pode ocorrer tanto à temperatura ambiente quanto em elevadas temperaturas, vai depender apenas das propriedades desejadas no final do processo ou dos produtos iniciais utilizados. Em média os sistemas com epóxi exibem pequenos valores de contração da ordem de 2%, após a cura. Este comportamento indica que para formar o sistema curado é necessário um baixo grau

de rearranjo molecular. Quanto à estabilidade química, o epóxi é um dos termorrígidos mais inertes e possui boa estabilidade dimensional em serviço (CALLISTER; ASKELAND; PHULÉ, 2008).

## **2.7. Compósitos**

### **2.7.1. Compósitos de matriz polimérica com fibras naturais**

Compósitos poliméricos são constituídos por uma matriz termoplástica ou termorrígida, e sua função é acomodar de maneira adequada a fase dispersa e transferir a esta a tensão aplicada. Os polímeros termorrígidos são os mais comuns para aplicações de cunho estrutural, gerando produtos de grande resistência. Uma das resinas mais utilizadas como matriz em compósitos é a resina epóxi, pois proporciona baixas taxas de contração do material durante a cura e promove uma ótima aderência com a fibra.

Atualmente tem crescido interesse na utilização de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais. Compósitos reforçados com fibras naturais tem um baixo custo e não exigem tanta energia para o seu processamento. Cada tipo de fibra lignocelulósica tem características morfológicas específicas em sua superfície, que afetam o comportamento mecânico dos compósitos de diversas maneiras, podendo melhorar as suas propriedades mecânicas de forma apreciável. A utilização dessas fibras em materiais compósitos é algo altamente promissor, para um futuro em que se utilize materiais com baixo custo, resistentes e ecologicamente corretos (MONTEIRO et al, 2009).

Tecnologicamente, os compósitos mais utilizados e mais importante são aqueles em que a fase dispersa está na forma de uma fibra. Os compósitos reforçados com fibras têm como principal objetivo conciliar uma boa resistência e rigidez, com baixa densidade para a fibra e matriz (CALISTER, 2012).

A qualidade da interface fibra-matriz é fundamental e muito significativa para a aplicação das fibras naturais como fibras de reforço para materiais plásticos. Isso

pode comprometer diretamente o comportamento mecânico final de um material compósito (BLEDKI; GASSAN, 1999). A adesão entre fibra e matriz é uma função de diversos fatores, entre os quais podemos citar o nível da rugosidade existente entre as superfícies de contato (PARK et al, 2006).

A principal responsável pela transferência da solicitação mecânica da matriz para o reforço é a interface fibra/matriz, e suas propriedades acabam se tornando específicas para cada sistema. O comportamento tensão-deformação das fibras influencia diretamente a tenacidade de compósitos reforçados por elas. Fibras resistentes com elevada deformação de ruptura elevam o patamar da energia envolvida na fratura dos compósitos, sendo esta característica desejável para as fibras que irão compor sistemas compósitos balísticos (PIRES, 2009).

Compósitos fibrosos quando submetidas a cargas de impactos diversos mecanismos são responsáveis pela absorção da energia, tais como, a delaminação entre as camadas, a deformação elástica do compósito, o cisalhamento das camadas e a tensão à fratura das fibras (MORYE et al, 2000). A delaminação é a separação das fases dos compósitos e isso pode ocorrer devido a alguns fatores, tais como: a existência de fibras de reforço com alto grau de impureza, uma insuficiente molhabilidade dessas fibras, e à falta de reforço na direção da espessura ou direção transversal. Na delaminação, a formação de novas superfícies, devido à separação das camadas, é responsável por absorver a energia de impacto. (GHASEMNEJAD et al, 2012).

A síntese de compósitos poliméricos que contêm fibras lignocelulósicas, muitas vezes, resulta em fibras fisicamente dispersas na matriz polimérica, na maioria dos casos resultando em uma fraca aderência e, conseqüentemente, comprometendo as propriedades mecânicas. Isso ocorre principalmente devido a incompatibilidade entre a natureza polar – hidrofóbica da fibra vegetal e a natureza apolar – hidrofóbica da matriz polimérica (BLEDZKI; GASSAN, 1999).

Com isso é possível afirmar que a qualidade das fibras naturais bem como a maior parte de suas propriedades mecânicas, quanto as tribológicas no comportamento dos compósitos dependem de fatores, como; a maturidade e métodos de processamento adotados para a extração das fibras, sendo assim, uma boa seleção das fibras e quando necessário, aliar a um tratamento superficial, é essencial para obter compósitos de alto desempenho (MOHANTY et al, 2000).

## 2.8. Cerâmicas

### 2.8.1. Conceitos gerais

Os materiais cerâmicos são constituídos por elementos metálicos e não metálicos ligados quimicamente entre si por ligações iônicas e/ou covalentes. Possuem elevada dureza e elevada resistência mecânica à compressão, mesmo quando submetidos a altas temperaturas. Estes materiais também apresentam baixa condutibilidade térmica e elétrica e elevada resistência ao calor e ao desgaste. Como exemplos de materiais cerâmicos podem ser citados os carbonetos (carboneto de silício - SiC), os nitretos (nitreto de silício - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), óxidos (alumina - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), etc.

Devido à baixa densidade e elevada resistência à compressão dinâmica, os materiais cerâmicos são amplamente utilizados como componentes de sistemas balísticos, com a finalidade de promover uma blindagem eficiente. (LOURO; LINDFORS; MEYERS, 1988).

O desempenho balístico não pode ser correlacionado efetivamente a uma única característica ou propriedade de um material. Desta forma, várias propriedades podem ser associadas a determinados papéis no desempenho balístico, como lista a TAB. 2.7 (DA SILVA et al, 2014).

TAB. 2.7 – Propriedades dos materiais e o desempenho balístico.

<b>Propriedades</b>	<b>Efeito com relação ao desempenho Balístico</b>
Densidade	Peso da Blindagem
Dureza	Dano ao Projétil
Módulo de Elasticidade	Propagação das ondas
Modo de Fratura	Absorção de Energia
Tenacidade a Fratura	Resistência aos múltiplos impactos e durabilidade
Resistência Mecânica	Resistência aos múltiplos impactos

DA SILVA, 2014. Adaptada

As propriedades listadas na TAB. 2.7 dependem diretamente da microestrutura do material cerâmico, como por exemplo: tamanho de grão, fases cristalinas, transformações de fases e a porosidade. Conseqüentemente para o desenvolvimento de uma cerâmica para fins balísticos, é extremamente importante o controle microestrutural. Neste trabalho uma das camadas que foi utilizada na composição do sistema de multiblindagem é a alumina, que tem como principal função promover a fragmentação e a destruição da ponta do projétil. (MEDVEDOVSKI, 2010).

### 2.8.2. Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

O óxido de alumínio é um óxido anfótero com a fórmula química  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . É conhecido como alumina, ou coríndon na sua forma cristalina. Devido algumas propriedades, este óxido torna-se um dos mais utilizados no mundo: como a refratariedade, dureza, elevada resistência ao ataque químico, resistência em temperaturas altas e baixas, rigidez dielétrica alta e condutividade térmica superior à maioria dos óxidos cerâmicos (CHAGAS, 2014).

A união da alumina, dura e leve, com materiais dúcteis, em substituição a blindagens unicamente metálicas, reduz o peso de viaturas e aeronaves. Por esta razão, os materiais cerâmicos são de grande importância para solucionar o impasse entre mobilidade e proteção balística (GOMES, 2004).

### 2.8.3. Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) aditivada com nióbia ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ )

Com a adição da nióbia, a alumina pode ser sinterizada a uma temperatura mais baixa e em menos tempo. Ademais, ao se adicionar nióbia no processo de sinterização da alumina promove o crescimento do grão da microestrutura final (HSU, et al., 2008).

O aumento do tamanho de grão gera o surgimento de uma 2ª fase nos contornos de grãos, aumentando sua densificação. Logo, a microestrutura do corpo cerâmico revela tendência de destruição da ponta do projétil, dificultando sua penetração (GOMES, 2004).

#### 2.8.4. Cerâmicos como proteção balística

Materiais cerâmicos tem sido alvo de inúmeras pesquisas com constantes avanços em sistemas de blindagens, mesmos com recentes progressos é uma área que necessita plena compreensão sobre o comportamento balístico dos materiais cerâmicos.

Ao se projetar um sistema de blindagem utilizando materiais cerâmicos deve ser considerado que, a fratura originada de um impacto balístico está associada a cargas instantâneas o que difere de cargas estáticas. Pois quando há o envolvimento de cargas estáticas, as tensões e deformações são distribuídas ao longo de todo o material e a fratura ocorre uniformemente. Já para cargas instantâneas, as tensões e deformações encontram-se muito localizadas, de forma que as fraturas podem ocorrer em uma parte isolada do corpo. Devido às elevadas pressões e as rápidas taxas de carregamento oriundos deste tipo de impacto, as propriedades mecânicas do material podem sofrer mudanças drásticas (DA SILVA et. al, 2014).

A superfície de um corpo cerâmico ao ser impactado por um projétil em alta velocidade cria ondas compressivas com altíssimas pressões. A onda atravessa o projétil e o material cerâmico nas suas respectivas velocidades sônicas. Devido a grande disparidade entre essas velocidades ocorre uma interação no interior do projétil, ocasionando sua fragmentação. A fragmentação é devida a nucleação, crescimento e coalescimento das trincas (GOMES, 2004).

Quanto mais uniforme a distribuição da população de defeitos em um material cerâmico, melhor o desempenho balístico, pois os danos ficam mais dispersos no material. Em nível de microestrutura, o fator mais importante na fragmentação é o

tamanho de grão; aumentando-se o tamanho de grão, reduz-se a área de superfície da macrotrinca de forma considerável (GOMES, 2004; LOURO; MEYERS, 1989).

Para o caso de um compósito de blindagem multicamadas, onde a pastilha cerâmica é apoiada em um material dúctil, parte das ondas compressivas é transmitida para o apoio dúctil, e o restante das ondas são refletidas de volta para a placa cerâmica. É a impedância mecânica do suporte dúctil que vai determinar a quantidade de ondas de tensão que é transmitida a esse material de apoio (KRISHNAN et al, 2010).

## 2.9. Distribuição de Weibull

O físico sueco, Ernest Hjalmar Wallodi Weibull (1887 – 1979) desenvolveu no ano de 1939 um método estatístico designado como distribuição de Weibull, que é um modelo de planejamento estatístico sobre a fadiga de um material. Este modelo permite:

- Representar falhas típicas
- Falhas aleatórias;
- Falhas devido ao desgaste;
- Obter parâmetros significativos da configuração das falhas;
- Representação gráfica simples.

Outro fato importante é que na presença de co-variáveis, a distribuição de Weibull, dispõem de um modelo de riscos proporcionais e de falha acelerada. Com isso é a uma das poucas distribuições de probabilidade que podem ser demonstrada na forma de um modelo de riscos proporcionais.

Para construção do Método Gráfico de Probabilidade é necessário a função de distribuição cumulativa de Weibull apresentada pela equação 2.13.

$$F(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x}{\theta} \right)^\beta \right] \quad \text{Eq. 2.13}$$



Onde  $\theta$  e  $\beta$  são parâmetros estatísticos, conhecidos por unidade característica e módulo de Weibull, respectivamente. Para obter o  $\beta$  e a  $\theta$  se faz necessário a linearização da equação anterior, logo tem-se:

$$\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{1 - F(x)} \right) \right] = \beta \cdot \ln x - (\beta \cdot \ln \theta) \quad \text{Eq. 2.14}$$

O Método Gráfico de Probabilidade, com o apoio da Análise de Regressão Linear Simples, pode ser utilizado para a linearização definitiva da Função de Distribuição Cumulativa de Weibull.

Considerando a equação geral da reta como

$$Y = AX + B \quad \text{Eq. 2.15}$$

Quando a equação da reta e relacionada com a Eq. 2.14, tem-se:

$\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{1 - F(x)} \right) \right] \rightarrow$  apresenta-se como variável independente (Y).

$\beta \rightarrow$  responsável pela inclinação da reta (A).

$\ln x \rightarrow$  como variável independente (X)

$\beta \cdot \ln \theta \rightarrow$  como intercepto do eixo das ordenadas (B)

A distribuição de Weibull será utilizada em alguns dados captados nos ensaios desta dissertação, com a finalidade de realizar uma investigação prévia sobre a probabilidade estatística, correlacionando o desempenho balístico dos materiais utilizados como camada intermediária em uma blindagem multicamada, através da medida do trauma gerado na plastilina (indentação) e também da energia absorvida.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS.**

#### **3.1. Aspectos gerais**

Para efetuar a confecção das pastilhas cerâmicas foi fundamental seguir algumas etapas; primeiro foi necessário misturar o pó de alumina com um ligante e um aditivo de sinterização em um moinho de bolas. Logo foi colocado na estufa para secagem e depois o pó foi macerado, peneirado e, então, submetido à prensagem uniaxial, originando corpos de provas verdes. Por fim, foram levados ao forno para que fossem sinterizados.

O processo de fabricação das placas compósitas bambu-epóxi, se resume em acondicionar a resina juntamente com as fibras ou as plaquetas de bambu em uma matriz metálica e logo depois ocorre à etapa de prensagem e cura do compósito.

#### **3.2. Especificações dos materiais utilizados**

##### **3.2.1. Polietileno glicol (PEG)**

O ligante orgânico utilizado neste estudo foi o mesmo usado no trabalho de TRINDADE, (2012). Logo o PEG (polietileno Glicol) de massa molar 200 é um dos ligantes que podem ser empregado em processamento cerâmico, estando enquadrado no tipo “ligante molecular”. Esses ligantes são moléculas poliméricas que podem tanto se impregnarem nas superfícies das partículas e mantê-las unidas por uma “ponte polimérica”, quanto formarem entre essas partículas uma superfície ou rede através de ligações polímero-polímero (REED, 1995). A TAB. 3.1 tem algumas propriedades do Polietileno Glicol.

TAB. 3.1 – Propriedades do PEG

<b>Análise</b>	<b>Resultados</b>
Cor (APHA)	Max. 35
Teor de água	Max. 0,3%
Massa Molecular média	200
Viscosidade a 100°C	65-115 cP em H <sub>2</sub> O
Resíduos após a ignição	Max. 0,1%

TRINDADE, 2012. Adaptada.

### 3.2.2. Alumina e nióbia

A alumina utilizada foi da empresa nacional Treibacher Scheifmittel e o aditivo de sinterização foi a nióbia HP da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM). As TAB. 3.2 e 3.3, a seguir apresentam as análises químicas da alumina e da nióbia utilizadas para a confecção dos corpos de prova cerâmicos (TRINDADE, 2012).

TAB. 3.2 – Análise química da alumina

<b>ELEMENTO</b>	<b>ANÁLISE</b>	<b>ESPECIFICAÇÃO</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	99,4	min. 99,1
SiO <sub>2</sub> (%)	0,04	max. 0,06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,04	max. 0,06
Na <sub>2</sub> O (%)	0,11	max. 0,15
MgO(%)	0,03	-----
Umidade a 300°C (%)	0,2	max. 0,5
Outros (%)	0,18	

TRINDADE, 2012. Adaptada.

TAB. 3.3 – Análise química da nióbia HP

ELEMENTOS	ANALISE
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	99,5
Perda ao Fogo (%)	0,1
Ta (ppm)	745
Ti (ppm)	240
Fe (ppm)	136
Si (ppm)	66

TRINDADE, 2012. Adaptada.

### 3.2.3. Fibras e plaquetas de bambu

O uso de bambu em compósito tem um grande potencial, porém ainda é pouco utilizado industrialmente, devido o desconhecimento da variedade de suas espécies, das suas propriedades características associadas a diversos usos e aplicações. O gênero a ser usado neste trabalho é *Dendrocalamus Giganteus*. No Brasil a maior incidência do bambu gigante é nas regiões do sul e sudeste onde se adaptou ao clima e solo (JUDZIEWICZ et al., 1999).

Os feixes de bambu utilizados nesse trabalho foram cedidos pela PUC-RJ (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro). As fibras de bambu (FIG. 3.1 (a)) foram retiradas manualmente, logo foram separadas e cortadas no tamanho da matriz. As plaquetas ou ripas tiveram aproximadamente 2 x 118 x 149 mm (FIG. 3.1 (b)). A densidade adotada foi de 0,688 para ambos, que equivale a uma média ponderada, uma vez que a massa específica do *Dendrocalamus Giganteus* é distinta para diferentes locais e profundidades do colmo do bambu.

Para a obtenção das plaquetas foram retirada ripas dos colmos do bambu, serradas no comprimento e largura pretendida e para obtenção da espessura desejada foi utilizado uma máquina de desengrosso.



FIG. 3.1 – Espécie *Dendrocalamus Giganteus* (a) Fibras do bambu; e (b) Plaqueta do bambu.

#### 3.2.4. Resina epóxi e endurecedor

No presente trabalho o material utilizado como matriz da placa compósita foi à resina epóxi 610, adquirida junto à empresa RESINPOXY LTDA e fabricada pela Dow Chemical do Brasil, assim como o endurecedor 51 (FIG. 3.2). A resina é do tipo éter diglicidílico do bisfenol A (DGEBA), endurecida com trietileno tetramina (TETA), utilizou-se a proporção estequiométrica de 13 partes de endurecedor para 100 partes de resina, pois esta proporção equivale à abertura dos anéis epóxi por ligação com as moléculas amina (MARGEM, 2013). Para a confecção dos corpos de provas foi utilizado 70% em volume da resina e 30% em volume de fibras ou plaquetas de bambu.



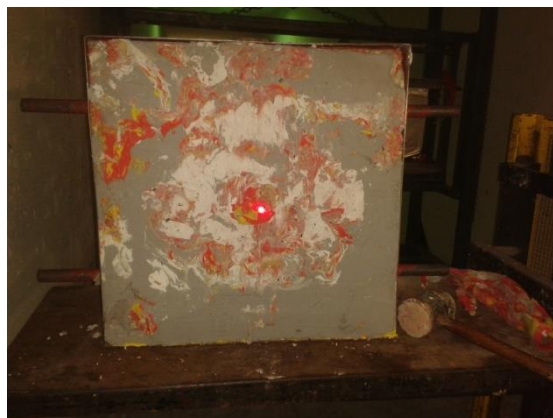
FIG. 3.2 – Resina epóxi e o endurecedor.

### 3.2.5. Plastilina

A plastilina trata-se de uma massa de modelar CORFIX® (FIG. 3.3 (a)), 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 plastilina é comumente utilizada pelo CAEx (Centro de Avaliações do Exército), com base na Norma NIJ 0101.04, onde foi acondicionada em uma caixa (caixa de plastilina), com o intuito de servir como medições dos traumas e perfurações. A plastilina tem como finalidade principal simular uma estrutura que tenha uma consistência similar a do corpo humano.



(a)



(b)

FIG. 3.3 – (a) Massa de modelar CORFIX; (b) Suporte de tiro totalmente preenchido com a plastilina.

### 3.2.6. Placa de alumínio

A placa utilizada como terceira camada na blindagem foi uma placa de alumínio quadrada, adquirida junto a empresa METINOX, com aproximadamente 150 mm de lado e espessura de 5 mm (FIG. 3.4). Segue algumas especificações na TAB. 3.4, conforme os resultados encontrados por CHAGAS (2014).

TAB. 3.4 – Especificações do alumínio

<b>Material</b>	<b>Densidade</b>	<b>Módulo de elasticidade</b>	<b>Módulo de cisalhamento</b>	<b>Dureza Vickers</b>
ALUMÍNIO T 6061	2,7 g/cm <sup>3</sup>	68 GPa	25 GPa	15

CHAGAS, 2014. Adaptada.



FIG – 3.4. Placa de alumínio

## 3.3. Fabricação das pastilhas cerâmicas

### 3.3.1 Aspectos gerais

Para a fabricação das pastilhas cerâmicas foi utilizado o moinho de bolas de alumina, MARCONI modelo MA 500 (FIG. 3.5), onde foi misturado o pó de alumina

com um ligante e um aditivo para sinterização. Logo depois ocorreu a secagem em estufa, em seguida o pó foi macerado, peneirado e, então, submetido a uma prensagem uniaxial, originando os corpos verdes que foram sinterizados no forno INTI, modelo FE 1700 (FIG. 3.6). A composição utilizada neste trabalho foi 94,53% de alumina, 3,94% de nióbia e 1,53% de PEG (TRINDADE, 2012).



FIG. 3.5 – Moinho de bolas Marconi modelo MA 500.



FIG. 3.6 – Forno INTI modelo FE 1700



### 3.3.2. Obtenção do pó

A alumina, a nióbia e o PEG foram devidamente pesados em uma balança digital, GEHAKA modelo BK 300, com precisão de 0,001g. Em seguida, os três componentes foram misturados e moídos em água no moinho de bolas de alumina por 12 horas (TRINDADE, 2012). A TAB. 3.5 relaciona as quantidades e os materiais utilizados na moagem:

TAB. 3.5 – Relação de materiais e massa para confecção de alguns corpos cerâmicos.

<b>Materiais</b>	<b>Massa (g)</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1400
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	58,3
PEG	22,6
Água	1500
Bolas de alumina	1300

Ao final desse processo, o pó foi colocado na estufa ELKA (FIG. 3.7) para secagem a uma temperatura de 80° C. O pó seco foi macerado e peneirado em uma peneira com abertura de 0,355 mm, a qual foi colocada em um agitador de peneiras marca +GF+ tipo PSA por 3 minutos. O material que passou nesse procedimento da peneira foi então armazenado, objetivando-se a etapa seguinte (TRINDADE, 2012).



FIG. 3.7 – Estufa ELKA

### 3.3.2. Prensagem do material verde

Para obtenção do corpo cerâmico verde foi necessário prensar o pó obtido nos processos anteriores em matrizes hexagonais planas (FIG. 3.8). Para confecção de cada corpo verde foram necessários 100g de massa de pó, de modo que a pastilha após a sinterização tivesse uma espessura de 10 mm e uma massa final entre 95g e 96g. A prensagem foi uniaxial, usando o método dos dois punções móveis e da camisa flutuante, através de uma prensa motorizada 30 toneladas NOWAK (FIG. 3.9). A pressão de compactação utilizada foi de 60 MPa, pois pressões acima desse valor comprometem a estrutura do material podendo ocasionar defeitos ao longo da peça, pois, em relação à alumina, a nióbia apresenta baixa dureza (TRINDADE, 2012).

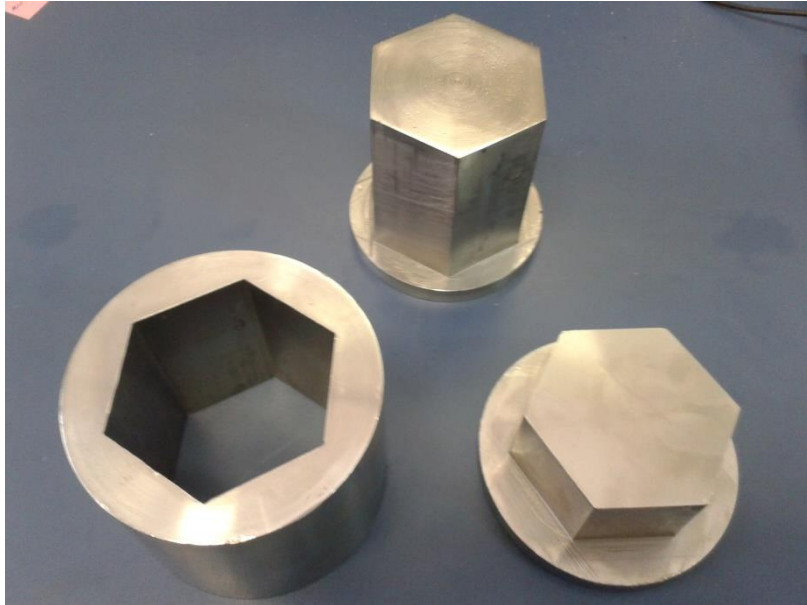


FIG.3.8 – Matriz de compactação



FIG. 3.9 – Prensa 30 Ton Motorizada – NOWAK

(Disponível em: <<http://www.nowak.com.br/loja/prensas>>. Acesso em 21 de dezembro de 2014).

### 3.3.3. Sinterização

O processo final de sinterização dos corpos verde foi realizado no forno INTI, modelo FE 1700, que se encontra no laboratório Cerâmico do IME. O controle de temperatura foi feito por meio de programadores acoplados ao forno.

Após o corpo cerâmico ser prensado, o corpo verde, foi conduzido ao forno para sinterização. Segue abaixo as etapas da sinterização:

- Aquecimento de 25°C até 158°C, com taxa de 0,5°C/min;
- Patamar de 158°C por 60min;
- Aquecimento de 158°C até 375°C a uma taxa de 1°C/min;
- Aquecimento de 375°C até 1000°C a uma taxa de 8°C/min;
- Aquecimento de 1000°C até 1400°C a uma taxa de 5°C/min;
- Patamar de sinterização a 1400°C por 180min.

O resfriamento foi realizado em uma taxa de 3°C/minuto de 1400°C até 700°C, depois o forno foi desligado e as amostras resfriadas até a temperatura ambiente por inércia dentro do mesmo. E como produto final foi obtido pastilhas cerâmicas em formato hexagonal, como mostrado na FIG. 3.10 (TRINDADE; GOMES: e LOURO, 2013).

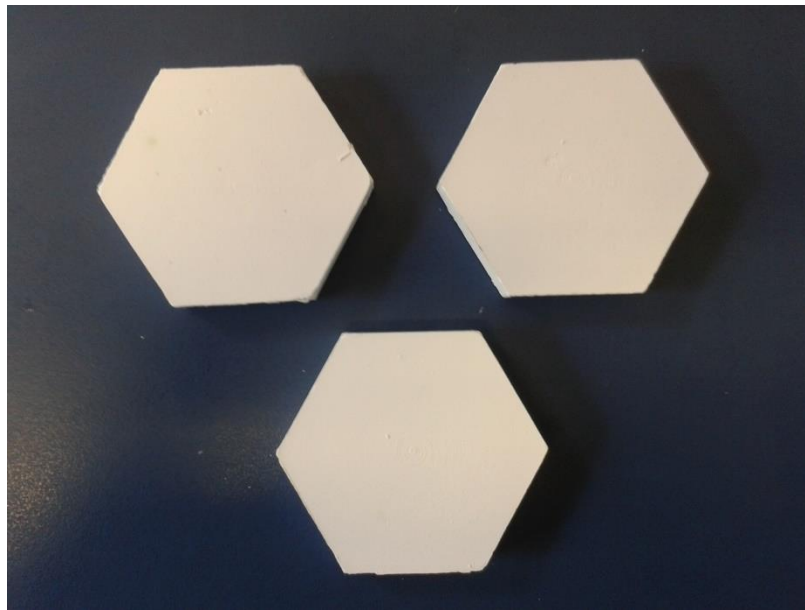


FIG. 3.10 – Pastilhas cerâmicas sinterizadas.

### 3.3.4. Cálculo de retração linear e densificação das placas cerâmicas.

Para efetuar o cálculo de retração linear, foi utilizado a EQ. 4.1, onde foi medida a espessura antes e depois de ocorrer o processo de sinterização do corpo cerâmico.

$$R_L = \frac{e_{verde} - e_{sinterizado}}{e_{verde}} \times 100\% \quad \text{Eq.4.1}$$

Onde;

$e_{verde}$  → espessura do corpo antes de sinterizar

$e_{sinterizado}$  → espessura do corpo sinterizado

Já para determinar a densidade do corpo cerâmico sinterizado foi utilizada a EQ. 4.2, que se dá pela razão de massa pelo volume. Para determinar a densificação do corpo cerâmico foi necessária a EQ. 4.3, onde é apresentado os termos percentuais da densidade teórica da mistura (96% em massa de alumina + 4% em massa de nióbia). Através da utilização da regra das misturas, que leva em conta a quantidade de cada componente presente na mistura, foi possível definir o valor da densidade teórica, 4,0049 g/cm<sup>3</sup>.

$$\rho_{sinterizados} = \frac{m}{V} \quad \text{Eq.4.2}$$

$$\text{Densificação} = \left( \frac{\rho_{sinterizados}}{\rho} \right) \times 100\% \quad \text{Eq.4.3}$$

### 3.4. Confecção das placas de compósito bambu-epóxi

Para confecção das placas compósitas de bambu-epóxi foi necessário primeiramente deixar as fibras e as plaquetas na estufa por no mínimo 24h, a uma temperatura de 80°C, para retirar o excesso de umidade. Após a pesagem das fibras ou das plaquetas ocorreu o preparo da resina.

Primeiramente, foi necessário seguir as duas etapas abaixo como preparo da matriz metálica;

- A matriz metálica foi untada com graxa de silicone, para facilitar o desinforme e evitar que ocorra o surgimento de trincas (FIG. 3.11)

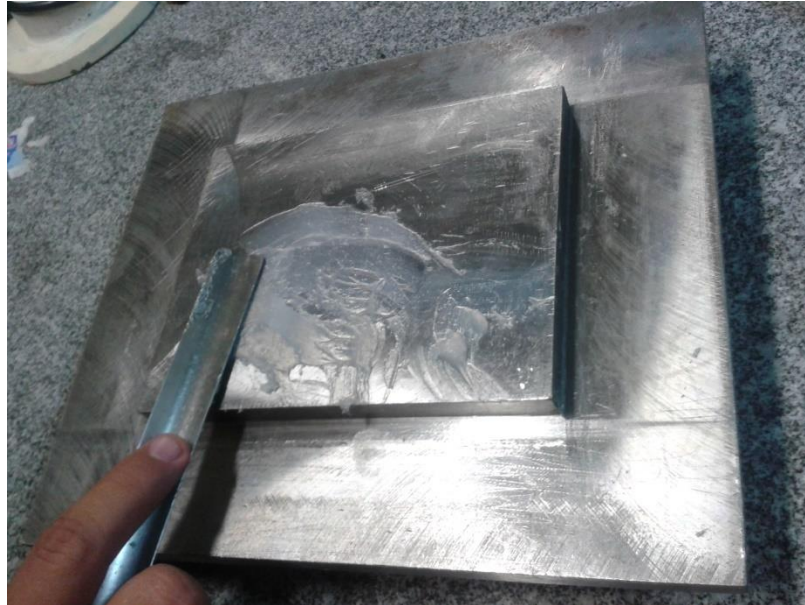


FIG. 3.11 – Matriz metálica sendo untada com graxa.

- Depois a matriz foi envolvida com um filme de PVC, também com a finalidade de ajudar na retirada da placa compósita da matriz (FIG. 3.12).



FIG. 3.12 – Matriz metálica sendo envolvida com filme PVC.

Depois os componentes foram pesados nas devidas proporções e acondicionados no espaço interno da matriz de aço (FIG.3.13). A matriz tem dimensões de 11,9 cm x 15 cm e com espessura de 1 cm, logo o volume obtido a partir da matriz é de 178,5 cm<sup>3</sup>. Tanto para as fibras, quanto para as plaquetas a porcentagem em volume utilizado foi de 30%, com isso o volume das fibras ou plaquetas 53,55 cm<sup>3</sup> e como já mencionado anteriormente a densidade utilizada do bambu *Dendrocalamus Giganteus* foi de 0,688 g/cm<sup>3</sup>, assim a massa de fibras e plaquetas foi de 36,84 g. Segundo Silva (2014), a densidade da resina epoxídica assim como o endurecedor é de 1,1 g/cm<sup>3</sup>, assim foram utilizados 13 partes de epóxi para uma de endurecedor, logo a massa 124,95 g.

Ao final, foram confeccionadas 24 placas compósitas, sendo 12 com fibras e outras 12 com plaquetas.



FIG. 3.13 – Matriz de aço utilizada para confecção das placas compósitas.

As fibras foram separadas em camada e a cada camada era derramado um pouco de resina, as fibras foram colocadas no interior da matriz metálica alinhadas e unidirecional. Já as plaquetas de bambu foram colocadas de forma cruzada (FIG. 3.14), ou seja, foi colocado uma camada de resina e uma camada de plaqueta na direção do comprimento, logo outra camada de resina e outra camada de plaqueta na direção da largura e por fim o restante da resina.



FIG. 3.14 – Confeção da placa compósita de plaquetas de bambu.

Após o acondicionamento dos componentes no interior da matriz metálica, a matriz foi então selada com a tampa e ocorreu a prensagem (FIG. 3.15) visando facilitar e garantir a correta impregnação das fibras, logo depois o conjunto foi deixado sobre pressão por 24 horas para que ocorresse a cura do material (MARGEM, 2013). Ao final do procedimento, foi obtido o almejado material compósito, compósito de fibra, conforme a FIG. 3.16 e o compósito de plaquetas FIG 3.17.





FIG. 3.15 – Prensagem da matriz.



FIG. 3.16 – Compósito de epóxi com fibra de bambu.



FIG. 3.17 – Compósito de epóxi com plaquetas de bambu.

É válido lembrar que a orientação aleatória das fibras no compósito, em comparação com a disposição de fibras longas e alinhadas, diminui a eficiência das suas propriedades de resistência; ademais, danos mecânicos causados nas fibras durante o processo da confecção dos corpos-de-prova também afetam negativamente a qualidade mecânica da peça final. (ZHOU et al, 2014).

### 3.5. Montagem dos sistemas de blindagens multicamadas

Após a confecção dos corpos cerâmicos, das placas compósitas e de posse das placas de alumínio, foi realizado a montagem dos sistemas de blindagens, para isso, se fez necessário uma fina camada de cola, no qual foi utilizado a *ULTRA FLEX cura rápida adesivo de poliuretano* (FIG. 3.18). Por ser uma camada muito fina, não há interferência nos resultados dos testes. Esta cola é comumente utilizada para colagem de diversos equipamentos na indústria naval, automobilística, blindagens, etc. Abaixo segue algumas informações da ficha técnica do produto.

- Composição química básica: Poliuretano monocomponente à base de MDI;
- Cor: Preta;
- Sistema de Cura: Com umidade atmosférica;

- Dureza Shore A: Aproximadamente 45;
- Resistência a Tração: 16,3 N/mm<sup>2</sup>;
- Velocidade de cura: 3 mm/24h;
- Contração de Volume: Menor que 3%.



Fig. 3.18 – Cola ULTRA FLEX cura rápida.

### 3.6. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As placas dos compósitos e as cerâmicas danificadas após os ensaios balísticos tiveram as áreas de fraturas analisadas utilizando-se o MEV do modelo QUANTA FEG 250 (FIG 3.19) do laboratório de microscopia do próprio IME. Para realizar este ensaio foram colhidas imagens com diferentes aumentos das regiões danificadas pelo impacto do projétil. Outras imagens colhidas foram da aramida também submetida a ensaio balístico.

Esta análise teve como finalidade examinar a eficiência do compósito de bambu-epóxi em agir como uma barreira para os fragmentos originados a partir da ruptura do corpo cerâmico e dos estilhaços do projétil e comparar com a mesma capacidade desempenhada pela aramida. Já para o corpo cerâmico, o objetivo é relacionar o comportamento balístico com a microestrutura do material.

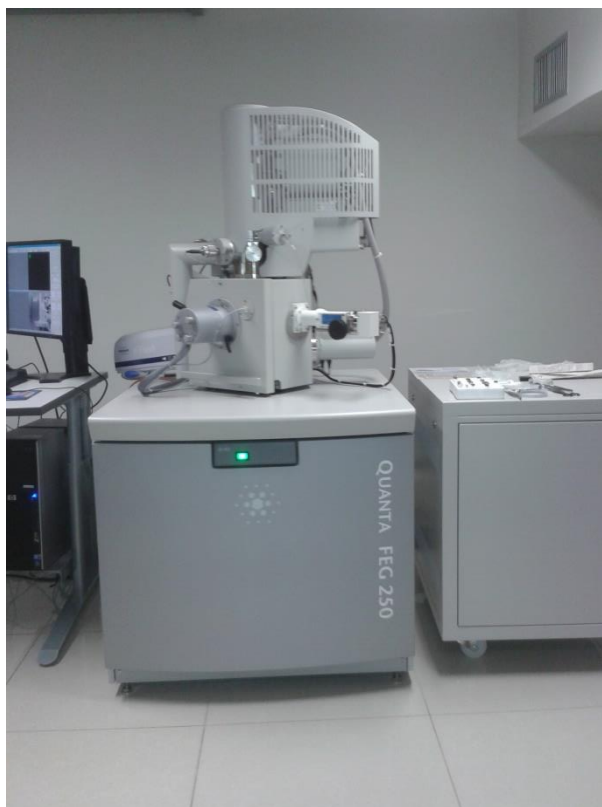


FIG. 3.19 – Microscópio eletrônico de Varredura – Modelo QUANTA FEG 250

Antes de colocar as amostras para que fossem analisadas no MEV, foi necessária a deposição de platina em toda superfície da amostra. Para isso, foi utilizado o equipamento de deposição de filme de alto vácuo da marca LEICA do modelo EM ACE600, conforme é mostrado na fig. 3.20



FIG. 3.20 – Equipamento de deposição de filme de alto vácuo.

### 3.7. Ensaios balísticos

Os ensaios balísticos foram realizados na unidade CAEx (Centro de Avaliações do Exército) do Exército Brasileiro localizada na península de Marambaia no Rio de Janeiro. Todos os ensaios com a blindagem multicamada obedeceram à norma NIJ 0101.04, no qual foram utilizados projéteis com calibre 7.62 x 51 mm. A FIG. 3.21 demonstra esquematicamente o sistema utilizado para a realização desses ensaios.

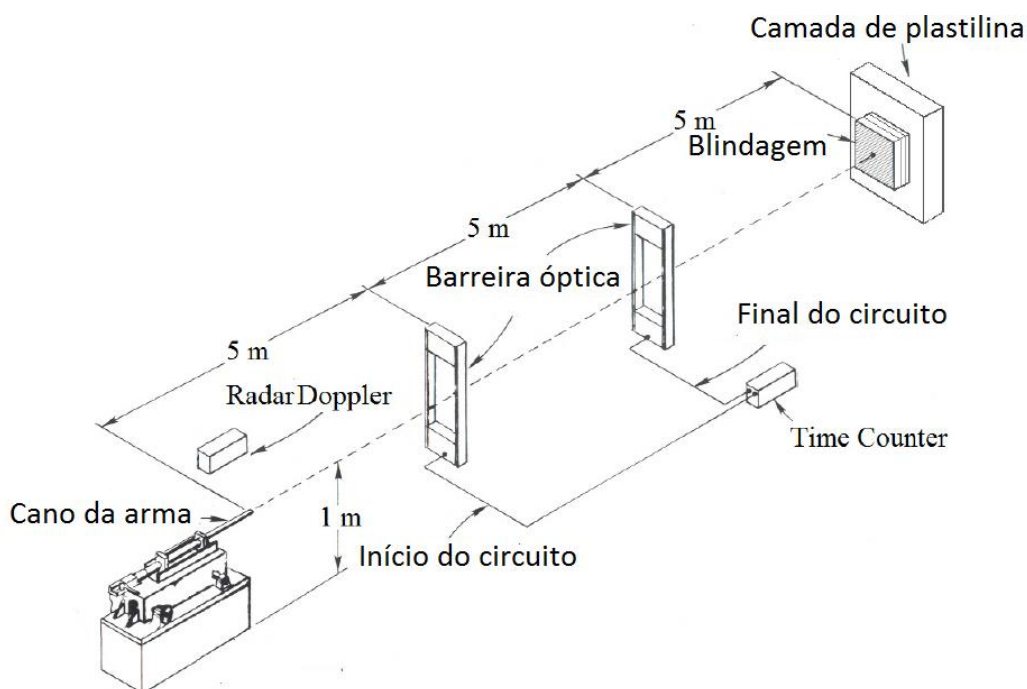


FIG. 3.21 – Esquema do sistema utilizado para os ensaios balísticos

A linha tracejada indica a trajetória do projétil. O alvo ficou localizado a 15 m do provete. A mira foi calibrada no centro do alvo com ajuda de um feixe de raio laser e a velocidade do projétil será medida em dois momentos: deixando o cano da arma e imediatamente antes de colidir com o alvo. Essas medições de velocidade serão realizadas através de uma barreira óptica e um sistema de radar Doppler, modelo SL-520P, do fabricante Weibel (*Fixed-Head Doppler Radar Systems*). As condições gerais do ensaio são:

- a) Munição: calibre 7,62 x 51mm, conforme é fornecida comercialmente ao Exército; o seu projétil (sua ponta) tem uma massa de 9,7 gramas (FIG. 3.22);



FIG. 3.22 – A munição 7,62 mm e seu projétil voador

- b) Distância do alvo: 15 metros, conforme prevê a norma ABNT NBR 15000 para as munições 7,62 mm;
- c) Ângulo de incidência no alvo: ortogonal;
- d) Quantidade de tiros para cada situação específica: 10 disparos.
- e) Local: Centro de Avaliações do Exército (CAEx), na 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 (FIG. 3.23) e um dispositivo de fixação da blindagem multicamadas (FIG. 3.24).



FIG. 3.23. – Provete calibre 7,62 mm com mira laser:

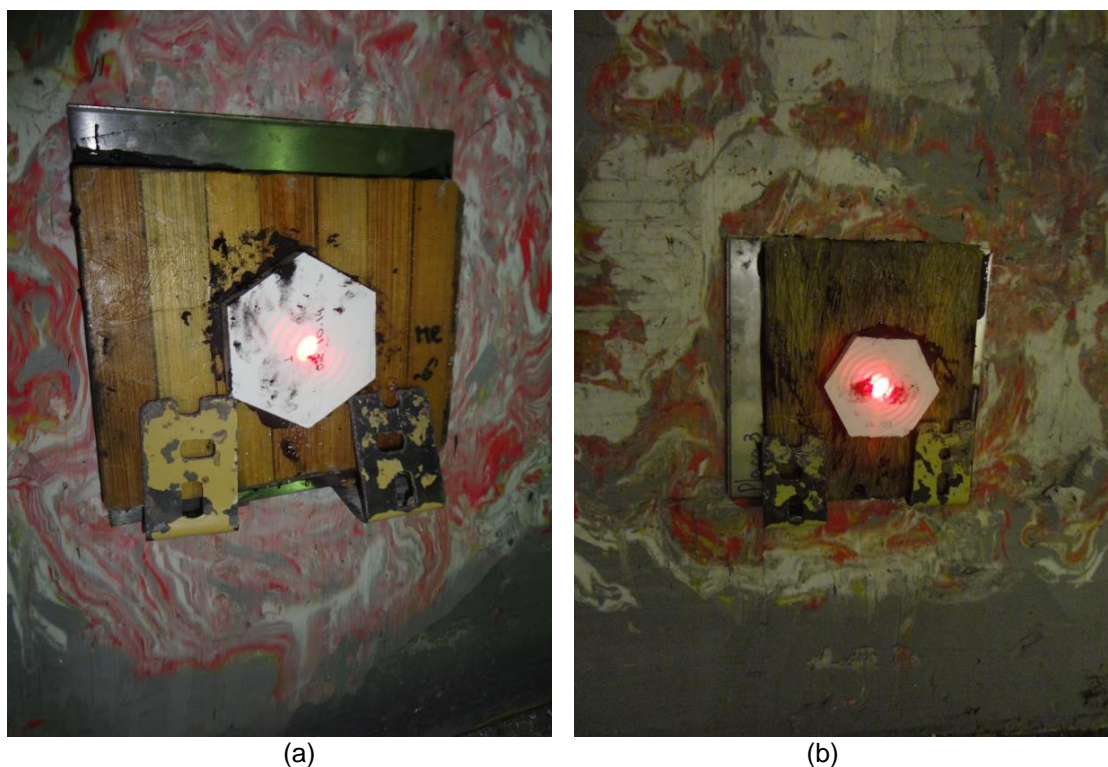


FIG. 3.24 – Compósitos multicamadas de (a) fibras e de (b) plaquetas prontos para realização do ensaio balístico.

Os ensaios balísticos foram realizados da seguinte maneira:

- Os compósitos de plaquetas de bambu e fibras de bambu foram apoiados na plastilina e ensaiados, com a finalidade de medir a profundidade do trauma gerado no material de apoio e a captar a energia gerada pelo impacto.
- Novamente os compósitos de plaquetas de bambu e fibras de bambu, foram ensaiados sem a plastilina como material de apoio, com o intuito de avaliar a energia cinética absorvida por cada material individualmente, através da captação da velocidade residual.

Os ensaios de velocidade residual são importantes, pois através dele é possível estimar o limite balístico do material, ou seja, a velocidade limite ( $V_L$ ). Por meio da energia absorvida pelo material e por intermédio da EQ. 2.10, foi possível realizar os cálculos para obter a velocidade crítica, até porque não é possível determinar o  $V_{50}$  para projéteis de alta velocidade, como o de calibre 7,62 mm.

A metodologia adotada para os ensaios realizados na plastilina, de caracterização da eficiência balística, seguiu o seguinte critério: a proteção balística



foi considerada “eficiente” quando a medida da maior profundidade da deformação na massa de plastilina, após o impacto, foi igual ou inferior a 44 mm, conforme prevê a Norma NIJ 0101.04.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

### 4.1. Análise do processo de fabricação dos corpos cerâmicos

Os 20 corpos cerâmicos produzidos, tiveram analisadas a retração linear e densificação, a fim de verificar o processamento e a metodologia utilizados na fabricação dos mesmos. Os resultados obtidos foram comparados com trabalhos anteriores (TRINDADE, 2012; LUZ, 2014).

A TAB. 4.1 apresenta os resultados obtidos de densificação e retração linear, para os corpos cerâmicos utilizados como primeira camada da blindagem multicamada, nesta tabela também conta os valores de espessura e densidade.

TAB. 4.1 – Dados gerais dos corpos cerâmicos.

<b>Corpo cerâmico</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Densidade do sinterizado (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Retração (%)</b>	<b>Densificação (%)</b>
1	10,55	3,50	12,08	87,39
2	10,60	3,47	11,66	86,64
3	10,60	3,45	11,66	86,14
4	10,50	3,48	12,50	86,89
5	10,30	3,56	14,16	88,89
6	10,50	3,42	12,50	85,40
7	10,52	3,52	12,33	87,89
8	10,55	3,51	12,08	87,64
9	10,62	3,47	11,5	86,64
10	10,55	3,49	12,08	87,14
11	10,59	3,49	11,75	87,14
12	10,50	3,50	12,50	87,39
13	10,53	3,49	12,25	87,14
14	10,90	3,40	9,16	84,90
15	10,84	3,40	9,66	84,90
16	10,80	3,42	10,00	85,40
17	10,82	3,38	9,83	84,40
18	10,84	3,41	9,66	85,15

Corpo cerâmico	Espessura (mm)	Densidade do sinterizado (g/cm <sup>3</sup> )	Retração (%)	Densificação (%)
19	10,62	3,40	11,5	84,90
20	10,88	3,48	9,33	86,89
Média	10,63 ± 0,16	3,46 ± 0,05	11,39 ± 1,33	86,44 ± 1,23

Conforme os dados apresentados na TAB. 4.1 pode-se afirmar que a metodologia e o processamento de produção dos corpos cerâmicos foram corretos, pois os valores de densificação média, 86,44%, e de densidade média dos corpos sinterizados, 3,46 g/cm<sup>3</sup>, estão bem próximos aos encontrados por Trindade (2012), que foram 88,1% e 3,53 g/cm<sup>3</sup> respectivamente. Os resultados obtidos também estão coerentes com os valores de 87,65% e 3,51 g/cm<sup>3</sup> encontrados por Luz (2014).

#### 4.2. Resultados dos ensaios balísticos das blindagens multicamadas

Como mencionado anteriormente, os ensaios balísticos foram realizados seguindo especificações da norma NIJ 0101.04, desta forma as FIG. 4.1 e 4.2 mostram as blindagens com os dois compósitos utilizados como camadas intermediárias, compósito reforçado com fibras de bambu e compósito reforçado com plaquetas de bambu respectivamente.



FIG. 4.1 - Blindagem multicamada com compósito de epóxi reforçado com fibras de bambu, (a) antes e (b) após ensaio balístico.



FIG. 4.2 – Blindagem multicamada com compósito de epóxi reforçado com plaquetas de bambu, (a) antes e (b) após ensaio balístico.

Ao fazer uma análise visual das FIG. 4.1 e 4.2, pode-se pressupor que a blindagem reforçada com de fibras de bambu, apresentou maior absorção de energia, devido ao maior número de regiões delaminadas. Existem outros mecanismo de dissipação de energia, tais como, a deformação elástica do compósito, o cisalhamento das camadas e a tensão à fratura das fibras (MORYE et al, 2000), que agem em conjunto e podem influenciar no resultado do desempenho balístico, com isso não é possível afirmar que apenas uma análise visual é suficiente para determinar a eficiência de um sistema de blindagem. Para isso, foi avaliado o desempenho balístico através da profundidade do trauma provocado após o impacto para cada de sistema de blindagem.

Foram realizados 20 ensaios sobre a plastilina, sendo 10 corpos de provas com reforçados com fibras e outros 10 corpos de provas reforçados com plaquetas, os dois ocupando as camadas intermediárias das blindagens multicamadas. Em um primeiro momento foi possível observar que não houve perfuração em nenhum dos alvos, conseqüentemente, o projétil foi parado e a sua energia cinética absorvida pelas camadas da blindagem em associação com a indentação causada na plastilina. Os dois tipos de materiais compósitos utilizados como camadas intermediárias exibiram profundidade de indentação inferior ao estipulado pela norma NIJ 0101.04 que é 44 mm.

As medidas das indentações foram realizadas com auxílio de um paquímetro de profundidade de 150 mm, *Absolute*, serie 571, da marca MITUTOYO, devidamente calibrado, conforme é visto na FIG. 4.3. A TAB. 4.2 apresenta os valores obtidos

para a profundidade da indentação, medida na plastilina, para os dois tipos de sistema de blindagem multicamada investigados, assim como, as condições de teste como, a velocidade de cada projétil, a energia de impacto, o tipo de camada intermediária e a espessura dessa camada.



FIG. 4.3 – (a) Paquímetro utilizado e (b) medição da indentação causada na plastilina pelo impacto do projétil.

TAB. 4.2 – Profundidade da indentação na plastilina, espessura, velocidade de impacto e energia de impacto para as diferentes blindagens multicamada.

<b>Blindagem Multicamada</b>	<b>Camada Intermediária</b>	<b>Espessura compósito (mm)</b>	<b>Indentação (mm)</b>	<b>Velocidade de impacto (m/s)</b>	<b>Energia de impacto (kJ)</b>
1	Fibras	10,39	15,94	825,91	3,31
2	Fibras	10,27	19,01	826,70	3,31
3	Fibras	10,72	19,57	839,04	3,41
4	Fibras	11,24	16,08	832,93	3,36
5	Fibras	10,80	16,73	819,80	3,26
6	Fibras	11,06	16,79	825,81	3,31
7	Fibras	11,26	17,31	819,94	3,26
8	Fibras	12,07	14,6	818,74	3,25
9	Fibras	11,44	19,81	823,61	3,29
10	Fibras	10,67	19,97	817,64	3,24
11	Plaquetas	10,82	16,09	828,37	3,33
12	Plaquetas	10,88	19,75	838,52	3,41
13	Plaquetas	11,46	18,8	835,41	3,38
14	Plaquetas	10,36	20,19	840,03	3,42

<b>Blindagem Multicamada</b>	<b>Camada Intermediária</b>	<b>Espessura compósito (mm)</b>	<b>Indentação (mm)</b>	<b>Velocidade de impacto (m/s)</b>	<b>Energia de impacto (kJ)</b>
15	Plaquetas	11,76	20,76	833,74	3,37
16	Plaquetas	10,97	16,53	831,95	3,36
17	Plaquetas	10,58	17,1	832,80	3,36
18	Plaquetas	12,17	20,85	813,71	3,21
19	Plaquetas	10,44	19,01	808,11	3,17
20	Plaquetas	11,23	17,8	814,37	3,22

Ao analisar a TAB. 4.2 é possível perceber uma variação de espessura, porém mesmo com esta variação não ocorreu uma tendência definida de aumento ou redução na profundidade da indentação. Assim, pode-se afirmar que as variações de espessuras apresentadas pelas placas compósitas não foram significativas no desempenho balístico. É válido lembrar que todas as placas compósitas foram fabricadas visando atingir 30%<sub>v</sub> de fibras em relação ao volume de epóxi.

A TAB. 4.3 mostra um resumo, onde são apresentadas somente as médias dos valores obtidos nos ensaios balísticos. Assim, pode-se observar que as placas compósitas reforçadas com fibras obtiveram um melhor desempenho balístico médio (17,58 mm), mesmo apresentando uma espessura média menor, se comparada ao compósito reforçado com plaquetas, que apresentou cerca de, 18,68 mm. Os compósitos de epóxi-bambu apresentaram um desempenho balístico inferior, quando comparado ao compósito de curauá 30% (16,42 mm) e ao compósito de manta de juta (17,51 mm), porém demonstraram melhor desempenho balístico quando comparado ao tecido de juta (20,67 mm) (SILVA, 2014 e LUZ, 2014).

Conforme é visto na TAB. 4.3, o tecido de aramida apresentou o pior desempenho balístico dentre os materiais testados como camada intermediária, com uma profundidade de indentação média de 22,67 mm, o que representa uma profundidade 28,95% maior do que a indentação média da blindagem de compósito de fibras de bambu e uma profundidade e 21,36% maior que a blindagem de compósito de plaquetas bambu. Uma explicação aceitável para esse comportamento é a que, como os materiais compósitos apresentam densidades menores, quando comparados com o tecido de aramida, vide (TAB. 4.2), isso implica que, quanto menor a densidade maior deve ser a redução de energia de impacto, pois uma

menor impedância de choque da camada intermediária transmitirá uma menor energia do pulso de compressão. Outro fator relevante é a que a matriz frágil de epóxi ajuda a dissipar a energia através da nucleação e da propagação de trincas.

TAB. 4.3 – Médias dos valores obtidos nos ensaios balísticos.

Camada intermediária	Espessura (mm)	$\rho$ média (g/cm <sup>3</sup> )	Indentação média (mm)	Velocidade de impacto média (m/s)	Energia de impacto média (kJ)	Referências
Fibras	10,99	0,99	17,58	825,01	3,30	PT
Plaquetas	11,07	0,96	18,68	827,70	3,32	PT
Aramida	10	1,40	22,67	836,81	3,40	LUZ, 2014
Tecido	11,42	1,165	20,67	833,81	3,373	LUZ, 2014
Manta	15,00	1,164	17,51	826,77	3,316	LUZ, 2014
Curauá	-	1,15	16,42	874,09	-	SILVA, 2014

\*PT: Presente trabalho

A análise de Weibull foi aplicada nos dados de indentação para os compósitos de epóxi reforçados com plaquetas (FIG. 4.4.) e para os compósitos de epóxi reforçado com fibras de bambu (FIG. 4.5).

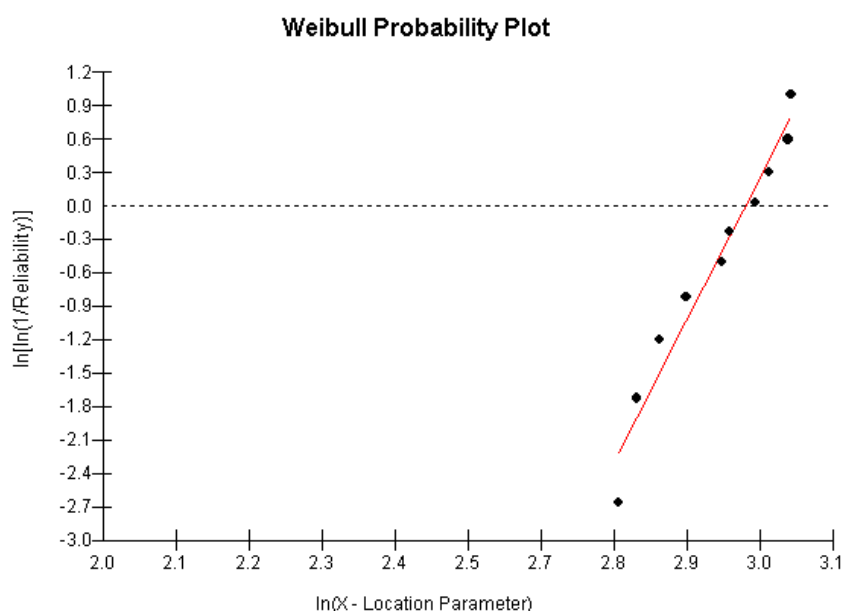


FIG. 4.4 – Gráfico de indentação para as placas de compósitos de epóxi reforçado com plaquetas de bambu.

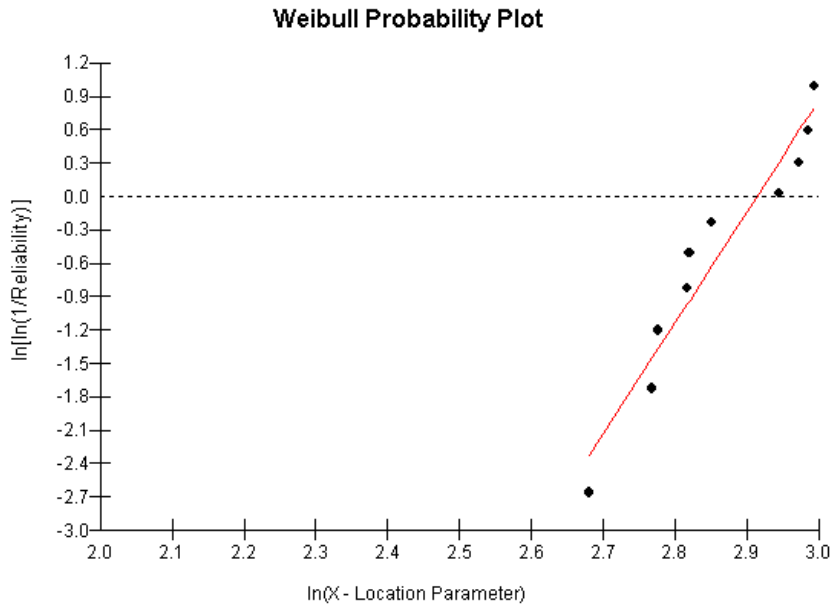


FIG. 4.5 – Gráfico de indentação para as placas de compósitos de epóxi reforçado com fibras de bambu.

Os resultados obtidos através da estatística de Weibull apontaram uma maior homogeneidade para o compósito de epóxi reforçado com plaquetas de bambu, uma vez que apresentou um maior  $\beta$  (módulo de Weibull), e quanto maior o valor deste parâmetro, menor é a dispersão dos valores e mais confiáveis são os resultados, sendo assim o compósito de plaquetas de bambu, obteve 11,57 para este parâmetro, enquanto que para o compósito de epóxi reforçado com fibras de bambu apresentou 9,96. Já para o parâmetro  $\theta$ , que representa a profundidade de indentação mais característica, ou seja, o programa analisa os resultados de indentação e apresenta um valor ótimo para cada material, sendo assim o compósito de fibras de bambu, que já havia apresentado um valor menor de indentação média (17,58 mm), também apresentou um valor menor de indentação característica de 18,43 mm, quando comparado ao compósito de plaquetas que apresentou 19,47 mm. É possível notar que o valor de indentação característica é maior que o valor de indentação média, isso mostra que o valor característico não é a média dos resultados. Outro dado que também deve ser salientado é o  $R^2$ , que é um parâmetro de ajuste que indica o grau de precisão da análise estatística, ele varia de 0 a 1 e quanto maior, mais explicativo é o modelo e melhor ele se ajusta à amostra, com isso o compósito de plaquetas obteve o maior resultado 0,9569, enquanto o compósito de fibras apresentou 0,9293.



### 4.3. Interação das ondas de choque nas blindagens multicamada

Foi calculada a impedância de choque, as velocidades de partículas e pressão na interface para os conjuntos de blindagens utilizados no presente trabalho, a fim de traçar um comparativo com os resultados obtidos em trabalhos anteriores. Para realizar os cálculos aplicou-se o método de casamento de impedância e as equações de conservação descritas anteriormente (EQ.2.4, EQ.2.5 e EQ.2.6).

Para a alumina foi utilizada a velocidade da onda elástica como velocidade onda de choque, anteriormente adotada por Silva (2014) e por Luz (2014). Na literatura não foi possível obter parâmetros específicos para o compósito epóxi-bambu, com isso a velocidade da onda de choque ( $U_s$ ), foi substituído pela velocidade da onda elástica, expressa 2.2. Com o auxílio da equação da regra das misturas foi estimado o modulo de elasticidade do compósito epóxi-bambu.

$$E_{C.Bambu} = E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f \quad \text{Eq.4.4}$$

Onde,

$E_{C.bambu}$  → é o modulo de elasticidade do compósito de bambu

$E_m$  → é o modulo de elasticidade da matriz

$E_f$  → é o modulo de elasticidade da fibra

$V_m$  → é a frações volumétricas da matriz

$V_f$  → é a frações volumétricas da fibra

Para realização deste cálculo foi utilizado o valor mínimo de 48 GPa e o valor máximo de 89 GPa, para o módulo de elasticidade(MOE) do bambu (NETRAVALI, 2003). A TAB. 4.4 apresenta os valores característicos dos materiais.

TAB. 4.4 – Valores característicos de cada material.

Material	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	C (m/s)	S	$U_s$	Referência
Chumbo	11,3	2066	1,517	2066 + 1,517 $U_p$	
Aramida	1,44	1180	2,420	1180 + 2,420 $U_p$	Meyers, 1994
Alumínio	2,7	5328	1,338	5328 + 1,338 $U_p$	
Alumina	3,53			10375,39	Silva, 2014

Luz, 2014. Adaptado.

Para o epóxi foi utilizado 2,41 GPa de módulo de elasticidade, o MOE do compósito foi, mínimo de 16,387 e máximo de 28,387 GPa, e por fim o valor da onda elástica encontrado foi de, mínimo de 4082,11 e máximo de 5372,88 m/s. A TAB. 4.5 mostra os valores encontrados para o casamento de impedância aplicado para avaliar a interação das ondas de choque nas interfaces da blindagem multicamadas. Para resolução dos cálculos foi considerado três interfaces: interface projétil (chumbo) e alvo (alumina), interface alumina e compósito e interface compósito e alumínio. Para fins de comparativos, foi adotada a velocidade do projétil como  $863,63 \pm 9,46$  m/s, a mesma utilizada por Silva (2014) e por Luz (2014).

TAB. 4.5 – Valores da velocidade de partícula, velocidade de onda de choque e pressão nas interfaces de cada componente da blindagem multicamada e a natureza da onda de choque.

Camadas (interface)	$U_p$ (m/s)	Pressão (GPa)	$U_s$ (m/s)	Natureza da onda de choque
Chumbo – Alumina		14,58	10.375,39	Compressiva
Alumina – Epóxi- bambu	Mín. Máx.	717,62 695,89	4082,11 5372,88	Trativa Trativa
Epóxi-bambu – Alumínio	Mín. Máx.	306,38 366,93	5737,93 5818,95	Compressiva Compressiva
Alumina – Aramida		2,99	2909,21	Trativa
Aramida – alumínio		5,75	5817,49	Compressiva

Uma onda trativa é gerada pela reflexão na interface de uma região de alta impedância para uma de menor impedância. Este tipo de onda pode gerar um estilhaçamento do material. A alumina possui o maior valor de impedância (TAB. 4.6) dentre todos os materiais analisados, com isso independente do material utilizado como camada intermediária, sempre vai gerar uma onda trativa. Como já

citado por Luz (2014), a aramida apresentou maior valor de impedância, para os materiais utilizados como camada intermediária. O que explica a menor redução de energia de impacto, que pode ser associada com o maior valor médio de indentação (22,67 mm) obtido no ensaio balístico, pois, a princípio para uma maior impedância de choque da camada intermediária, maior a energia do pulso de compressão transmitida. Isso ajuda a compreender o maior valor de indentação do compósito de epóxi-bambu, quando comparado com os compósitos de curauá 30% e epóxi-juta.

TAB. 4.6 – Natureza das ondas refletidas e impedância de choque nas interfaces da blindagem multicamada.

<b>Material</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Velocidade de onda (m/s)</b>	<b>Impedância (kg/(m<sup>2</sup>s))</b>	<b>Referência</b>
Epóxi-bambu (mín.)	983,4	4.082,11	4,01 x 10 <sup>6</sup>	*PT
Epóxi-bambu (máx.)	983,4	5.372,88	5,64 x 10 <sup>6</sup>	*PT
Aramida	1440	9.537,94	13,73 x 10 <sup>6</sup>	LUZ, 2014
Epóxi/Juta (mín.)	1167	2.188,03	2,55 x 10 <sup>6</sup>	LUZ, 2014
Epóxi/Juta (máx.)	1167	2.895,94	3,38 x 10 <sup>6</sup>	LUZ, 2014
Curauá 30%	1150	2.132,56	2,45 x 10 <sup>6</sup>	SILVA, 2014
Bagaço da cana-de- açúcar	860	2.793,26	2,40 x 10 <sup>6</sup>	
Chumbo	11300	2.066,00	23,35 x 10 <sup>6</sup>	SILVA, 2014
Alumina	3530	10.375,39	36,62 x 10 <sup>6</sup>	SILVA, 2014
Alumínio	2700	5.045,92	13,62 x 10 <sup>6</sup>	SILVA, 2014

O compósito de epóxi-bambu exibiu maiores valores que impedância que o compósito de curauá 30% (SILVA, 2014) e maior do que o compósito de epóxi-juta (LUZ, 2014), o que explica o maior valor de indentação média para os compósitos de epóxi bambu, quando comparado com aos compósitos dos dois autores.

#### 4.4. Resultados dos ensaios individuais das camadas dos sistemas de blindagens

Foram realizados ensaios separadamente das camadas intermediárias, para as placas compósitas reforçadas com fibras e das plaquetas. Para fins de comparação foram utilizados os resultados da cerâmica, da aramida e do compósito de curauá obtidos por Silva (2014), assim como, o de tecido de juta, a manta de juta e da placa de alumínio obtidos por Luz (2014). Para este ensaio não se fez uso do caixote de plastilina e, além disso, todas as amostras foram perfuradas (FIG. 4.6). Este ensaio teve como finalidade medir a velocidade de impacto, a velocidade residual do projétil, as velocidades foram captadas pelo radar Doppler. Com isso foi possível calcular a energia absorvida individualmente e assim é possível obter a velocidade limite a partir da Eq. 2.11.

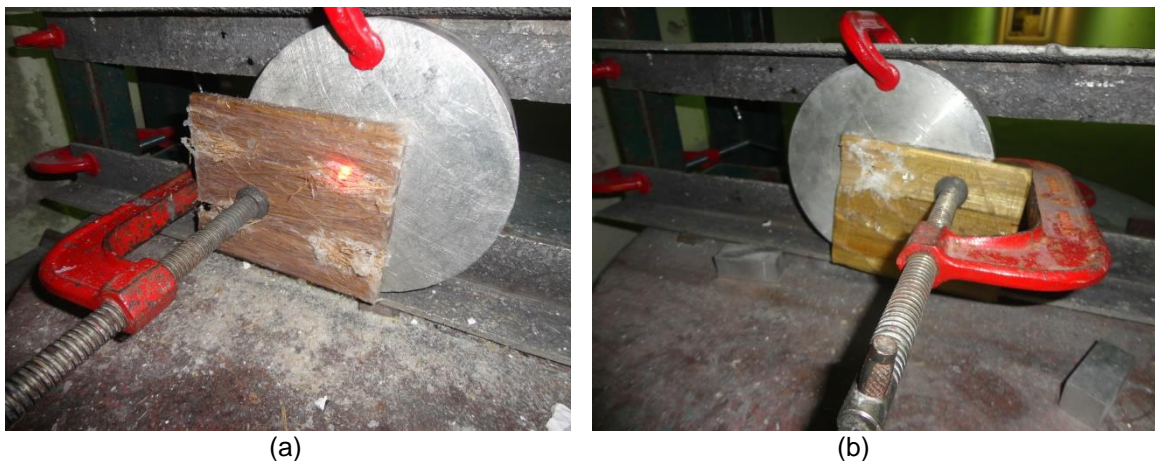


FIG. 4.6 – (a) compósito de fibras e (b) compósito de plaquetas perfurado após os ensaios.

A FIG. 4.7 ilustra os pontos experimentais obtidos a partir do espectro de radar de um alvo do compósito de fibras de bambu e a curva polinomial contínua ajustada. É possível notar que por volta de 848,24 m/s ocorre uma queda brusca na velocidade, o que indica a ocorrência do impacto. A velocidade de impacto ( $V_i$ ) ocorre por volta de 837,12 m/s e a velocidade residual ( $V_r$ ) registrada foi de 817,48 m/s. Foram obtidos outros gráficos semelhantes para os demais materiais ensaiados e com as velocidades extraídas nestes gráficos foi possível determinar a velocidade limite ( $V_L$ ) para cada componente testado.

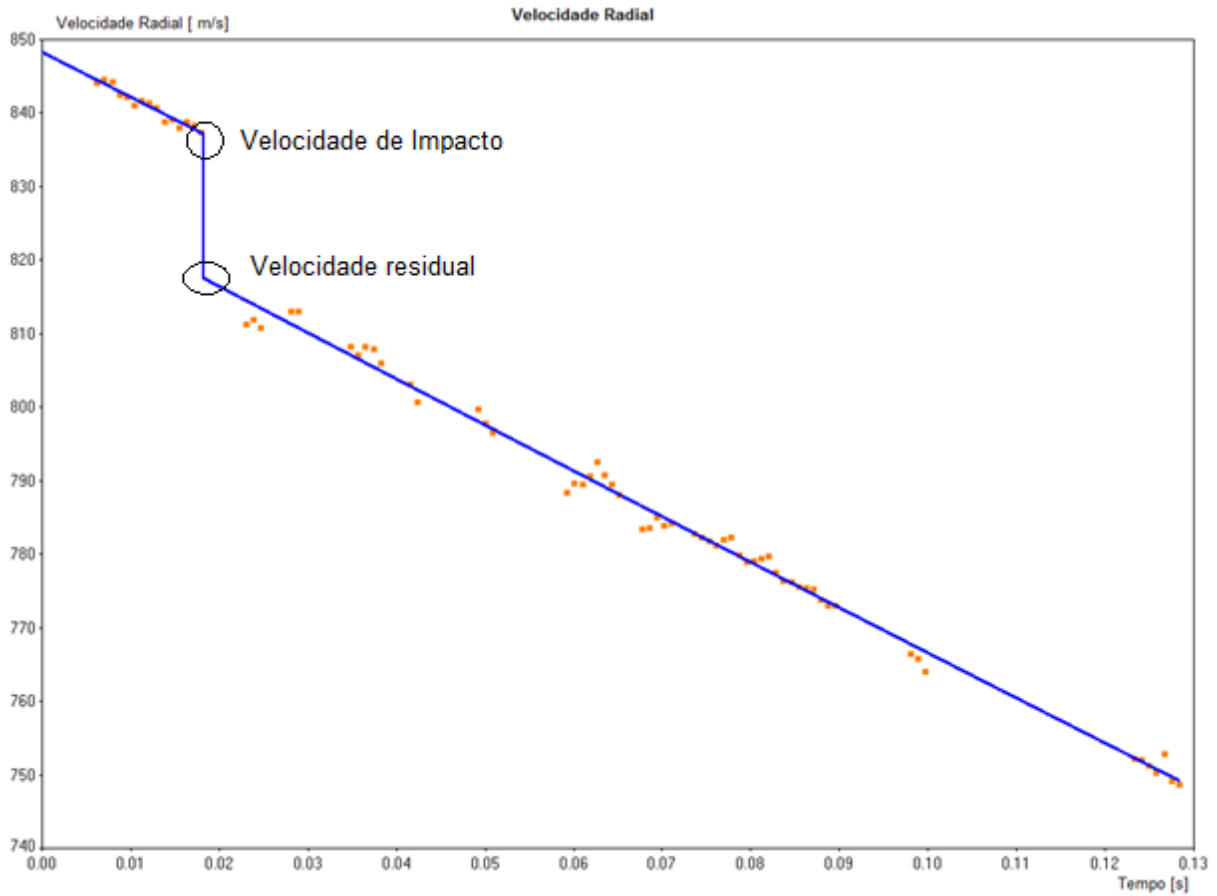


FIG. 4.7 – Gráfico de pontos experimentais do ensaio de velocidade residual do compósito de plaquetas.

Com a análise de Weibull foi possível analisar as velocidades limites ( $V_L$ ), dos compósitos de plaquetas (FIG. 4.8) e dos compósitos de fibras (FIG. 4.9). A TAB. 4.4 apresenta os principais dados obtidos através da estatística de Weibull.

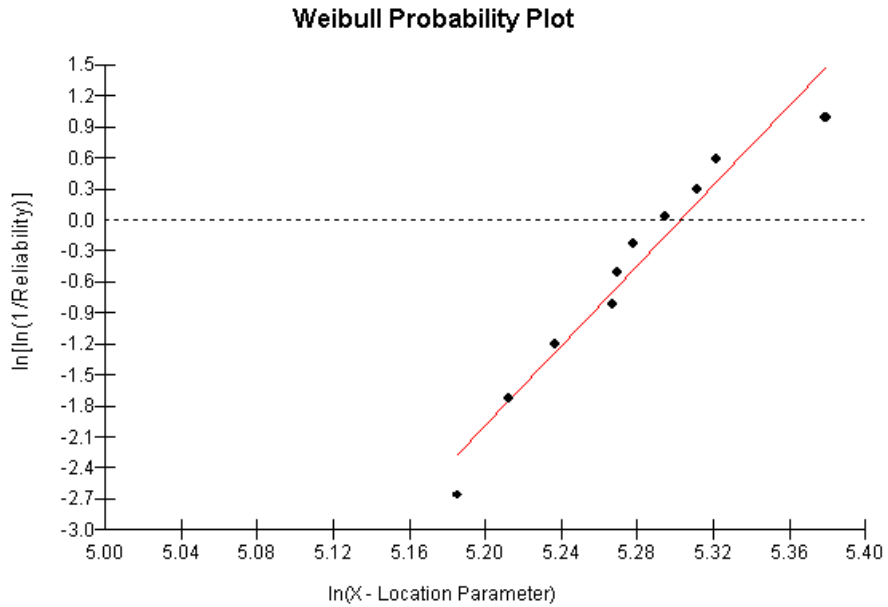


FIG. 4.8 – Gráfico da velocidade limite ( $V_L$ ) para o compósito de epóxi reforçado com plaquetas de bambu.

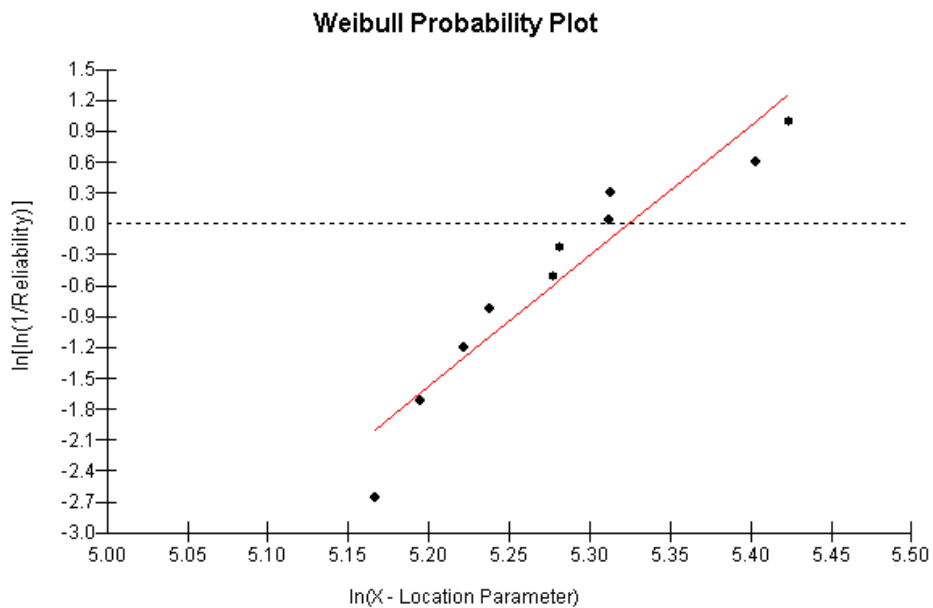


FIG. 4.9 – Gráfico da velocidade limite ( $V_L$ ) para o compósito de epóxi reforçado com fibras de bambu.

De acordo com a TAB. 4.7, é possível observar que todos os materiais analisados obtiveram bons resultados de  $R^2$  e de  $\beta$ . Os resultados encontrados por Luz (2014) para a placa de alumínio foram melhores do que os compósitos, pois apresentou a maior velocidade limite (230,01) e isso indica uma maior absorção de energia. O que pode ser explicado devido à capacidade do alumínio deformar-se

plasticamente, diferindo-se das placas compósitas, pois o mecanismo de absorção de energia pode ser atribuído à fragmentação frágil da matriz de epóxi em conjunto com os mecanismos atuantes nas fibras, como delaminação, descolamento e rompimento das fibras. O compósito de plaquetas apresentou maior confiabilidade dos dados (19,39) e maior precisão estatística (0,948), o que indica maior homogeneidade nos resultados, quando comparado aos dois outros materiais.

TAB. 4.7 – Valores da estatística de Weibull para velocidade limite.

<b>Materiais</b>	<b>Módulo de Weibull (<math>\beta</math>)</b>	<b>Unidade característica (<math>\theta</math>)</b>	<b>Coefficiente de correlação (<math>R^2</math>)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Compósitos de plaquetas	19,39	200,9	0,948	195,79	12,48
Compósitos de fibras	12,62	205,3	0,902	198,28	19,02

A TAB. 4.8 apresenta os resultados calculados da energia absorvida ( $E_{abs}$ ) e a velocidade limite ( $V_L$ ), bem como os valores médios da velocidade residual ( $V_r$ ) e velocidade impacto ( $V_i$ ). Ao analisar os dados da tabela, é possível notar que a cerâmica apresentou maior absorção de energia de impacto em torno de 55% e o tecido de aramida a menor, 1,7% (SILVA; LUZ, 2014), com isso, nota-se que o tecido de aramida sem a camada frontal cerâmica, não é uma barreira eficiente para munições 7,62 x 51 mm. Os compósitos utilizados como camada intermediária, apresentaram melhores resultados que a aramida, isso pode ser explicado, devido os compósitos apresentarem uma matriz frágil de epóxi que é capaz de absorver mais energia através da fragmentação. O compósito de epóxi reforçado com fibras de bambu apresentou melhores resultados de absorção de energia, cerca de 5,7%, quando comparado ao compósito de epóxi reforçado com plaquetas de bambu (5,6%), ao tecido de juta (4,4%) e ao compósito de curauá 30% (3%), apenas a manta juta que obteve um resultado igual (5,7%) de energia absorvida. Se levarmos em considerações, apenas os resultados apresentados pela TAB. 4.5, seria esperado que o compósito de fibras (17,58 mm) e o compósito de plaquetas (18,68 mm) de bambu apresentassem valores de profundidade de indentação menores do que o compósito de curauá 30% (16,42 mm), o que não foi observado. Uma explicação possível para este fato é devido às fibras de curauá apresentarem

melhores propriedades mecânicas, como maior módulo de elasticidade, maior resistência à tração, como é citado pela literatura. Já para os resultados encontrados por LUZ, 2014, para o compósito de epóxi-juta, o compósito de fibras de bambu se mostrou bastante competitivo, apesar do compósito de manta de juta apresentar uma indentação média ligeiramente menor (17,51 mm), fato que pode ser explicado devido a maior quantidade de vazios e conseqüentemente maior aprisionamento de ar no interior do compósito de juta, em virtude da variabilidade da sua espessura.

TAB. 4.8 – Valores médios das velocidades de impacto e residual, energia absorvida e velocidade limite.

<b>Materiais</b>	$\bar{V}_i$ (m/s)	$\bar{V}_r$ (m/s)	$E_{abs}$ (J)	% $E_{abs}$	$V_L$	<b>Referência</b>
Compósito de fibras	844,71 ± 3,18	821,11 ± 4,06	190,67	5,7	198,28	*PT
Compósito de plaquetas	842,29 ± 7,96	819,15 ± 8,15	186,46	5,6	196,08	*PT
Alumínio 6061	842,30 ± 5,75	811,36 ± 6,48	248,10	7,2	226,18	LUZ, 2014
Tecido de juta	841,45 ± 6,50	822,81 ± 6,41	150,50	4,4	176,16	LUZ, 2014
Manta de juta	843,80 ± 4,78	819,18 ± 7,19	198,54	5,7	202,33	LUZ, 2014
Cerâmica	847,52 ± 5,51	566,67 ± 4,32	1920,41	55,1	629,25	SILVA, 2014
Compósito de Curauá 30%	848,30 ± 6,36	835,29 ± 6,17	106,16	3,0	147,95	SILVA, 2014
Tecido de aramida	848,13 ± 3,44	840,99 ± 6,99	58,48	1,7	109,81	SILVA, 2014

\* PT: Presente trabalho

#### 4.5. Análise das micrografias obtidas no MEV

Segundo Monteiro (2014a) o tecido de aramida em uma blindagem multicamadas é capaz de absorver mais de 36% da energia cinética, envolvida no impacto do projétil, isso se dá através do mecanismo de incrustação mecânica dos fragmentos cerâmicos. As forças atuantes na superfície, como a de Van der Waals, possuem força suficiente para manter as partículas cerâmicas incrustadas, o que não teria como acontecer sem a presença do tecido de aramida, do compósito de fibras ou de plaquetas. Isso ocorre devido às interações que as partículas sofrem ao



entrar em contato com as cargas estáticas que atuam na superfície do material utilizado como camada intermediária. As forças atuantes e a atração eletrostática fazem com que ocorra um empilhamento dos fragmentos. A FIG. 4.10 (a) e (b) mostra como o é o aspecto da superfície de fratura em um compósito de reforçado com fibras de bambu. Já com a FIG. 4.11 (a) pode-se perceber a separação e rompimento das fibras, assim como, os indícios da fratura frágil da matriz de epóxi, que também é uma fonte de dissipação de energia. Outro ponto que deve ser ressaltado, é que na FIG. 4.11 (b) a amostra ficou totalmente coberta de partículas cerâmicas, isso indica que o compósito absorveu a energia cinética dos fragmentos através do mecanismo de incrustação mecânica.

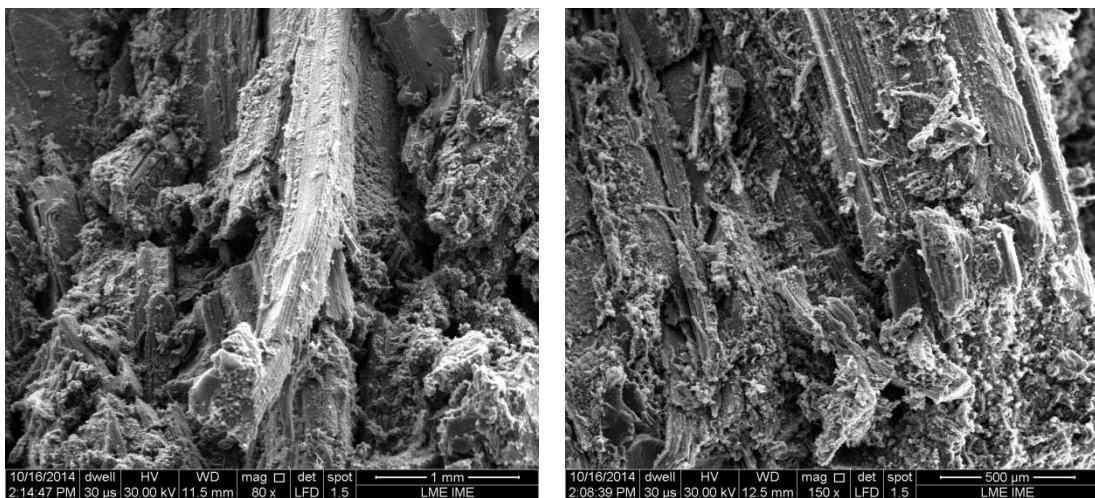


FIG. 4.10 – Micrografia por MEV: (a) Superfície de fratura do compósito de fibras de bambu (80x); (b) (150x).

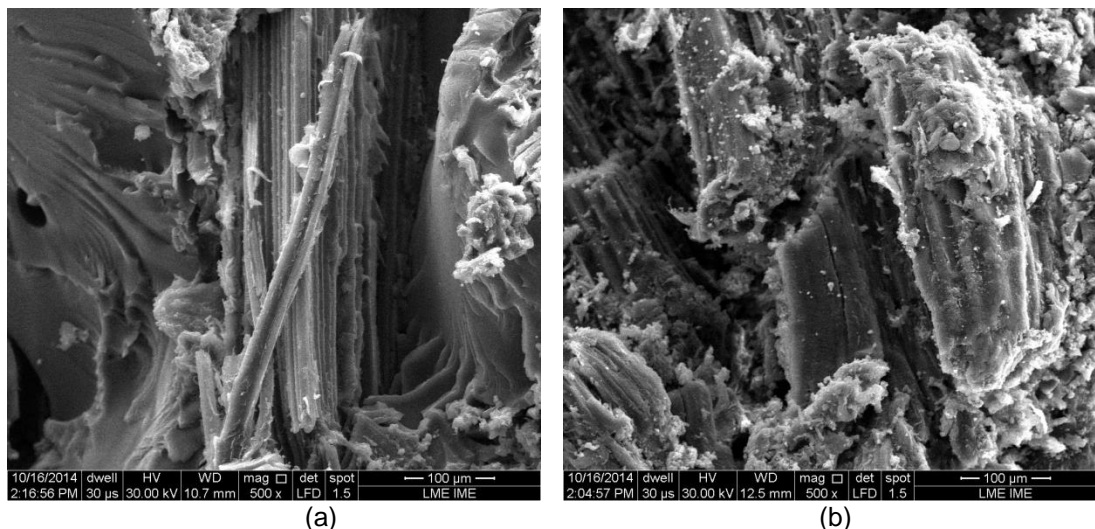


FIG. 4.11 – Micrografia por MEV: (a) Fratura do compósito de fibras de bambu (500x); (b) Partículas cerâmicas na superfície do compósito (500x).

Já a FIG. 4.12 (a) e (b) mostra a superfície de fratura de um compósito de plaquetas de bambu e é possível perceber que as amostras deste compósito também apresentou um bom desempenho para impregnação dos fragmentos, também funcionando como uma boa barreira, através do mecanismo de incrustação mecânica. Já a FIG. 4.13 (a) e (b) mostram que as plaquetas ficaram envolvidas pela matriz de epóxi, bem como, o aspecto da fratura e a impregnação dos fragmentos no compósito.

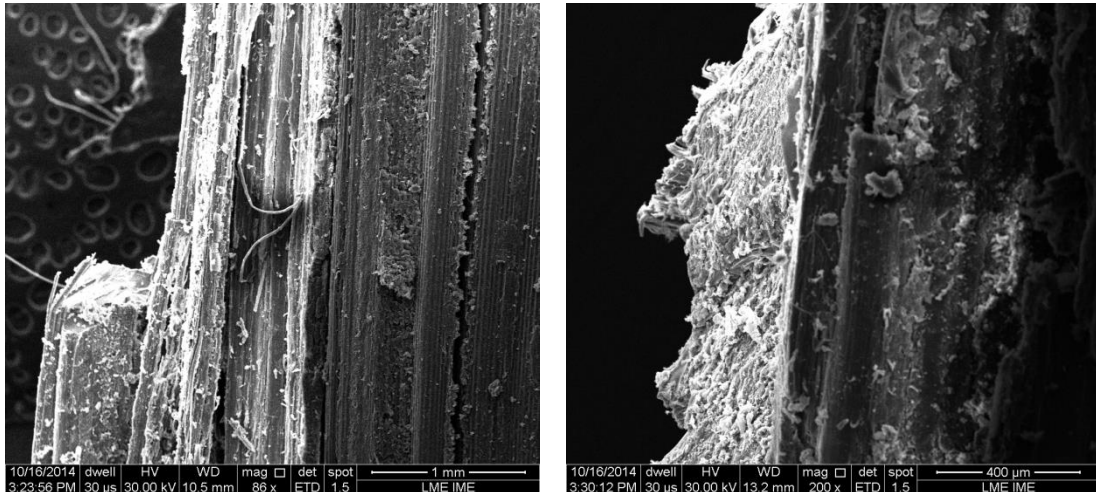


FIG. 4.12 – Micrografia por MEV: (a) Fratura do compósito de plaquetas de bambu (86x); (b) Partículas cerâmicas na superfície do compósito (200x).

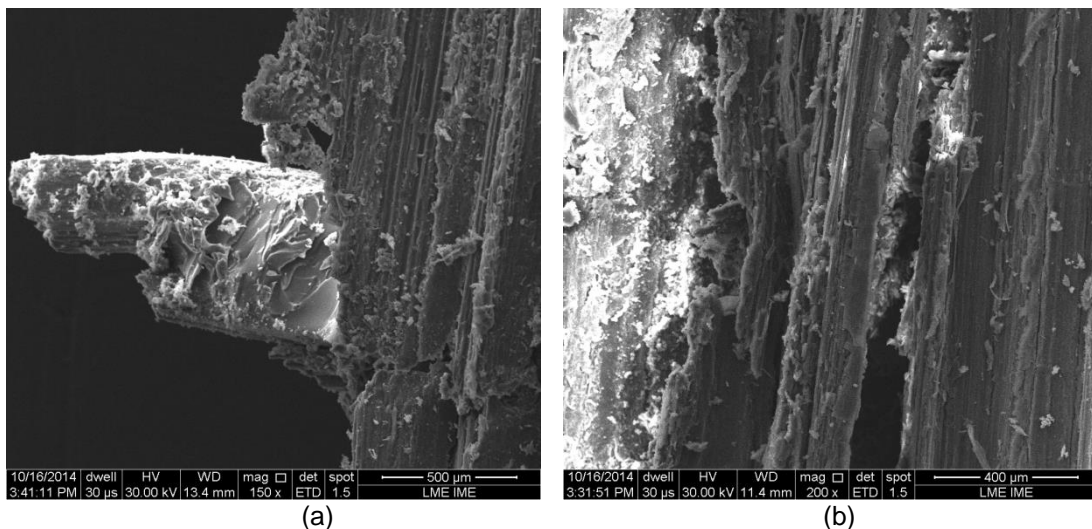


FIG. 4.13 – Micrografia por MEV: (a) Matriz epóxidica impregnado no compósito de plaquetas de bambu (150x); (b) Fratura do compósito de plaquetas de bambu (200x).

É possível observar nas FIG. 4.14 e 4.15 um mecanismo de redução de energia, o “pull out” que consiste no deslocamento da fibra durante a fratura. Isso pode

indicar que naquela região houve uma ligação mais fraca entre a matriz e a fibra e esta foi arrancada.

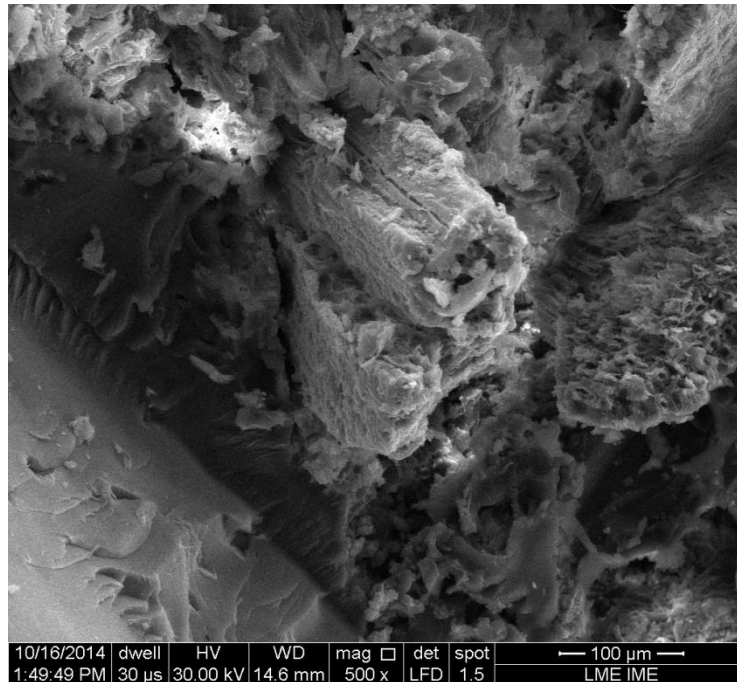


FIG. 4.14 – Micrografia por MEV das fibras arrancadas da matriz, mecanismo de “pull out”.

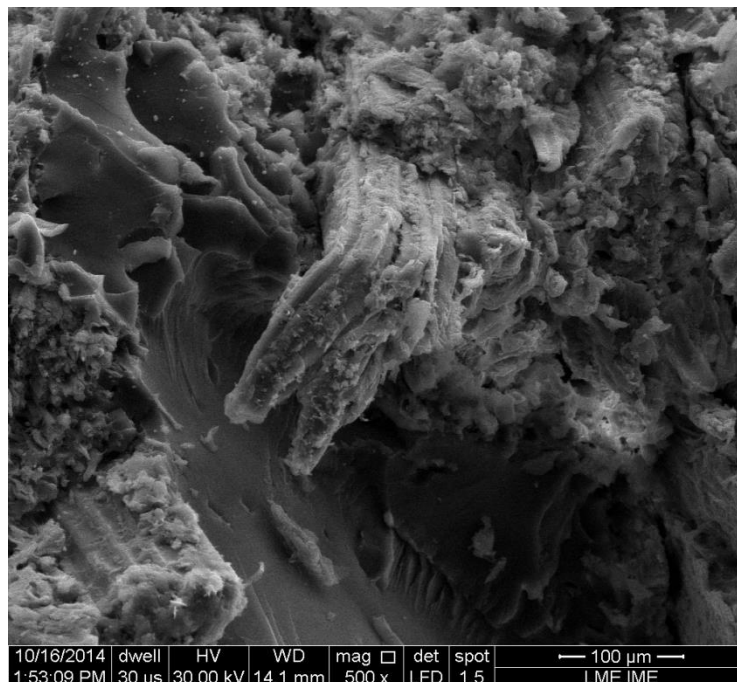


FIG. 4.15 – Micrografia por MEV das fibras arrancadas da matriz, mecanismo por “pull out”.

Logo que camada cerâmica é impactada por um projétil, uma onda de choque é gerada, propagando-se na mesma. Quando esta onda de choque atinge a superfície livre ocorre à reflexão na forma de uma onda trativa, isso pode ocasionar a fratura

do material cerâmico se sua magnitude for maior que a resistência à tração dinâmica da cerâmica. A presença de aditivos pode alterar os mecanismos de fratura do material cerâmico.

A adição de nióbia na microestrutura da alumina sinterizada, forma precipitados nos contornos de grãos, modificando o mecanismo de fratura da alumina de transgranular para intergranular, aumentando a dissipação de energia de impacto. Isso pode ser observado com ajuda da FIG. 4.16 (MADHU et al, 2005).

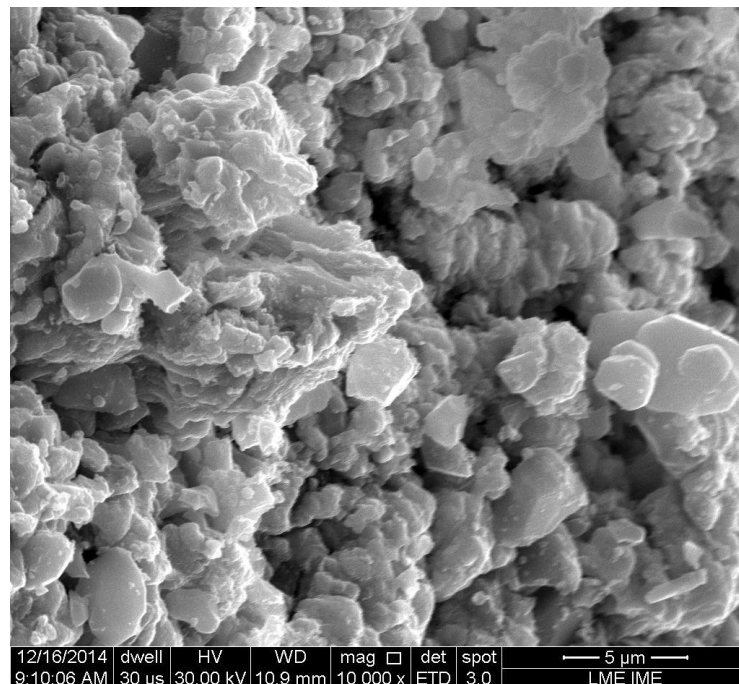


FIG. 4.16 – Micrografia por MEV da cerâmica fraturada (10000x).

#### 4.6. Relação de custos

Os resultados encontrados nos ensaios demonstraram que os compósitos de epóxi-bambu tiveram um ótimo desempenho balístico, superando os resultados do tecido de aramida. A TAB. 4.9 apresenta a relação de custos para todos os componentes que compõem os sistemas de blindagens multicamadas. Observando os dados da tabela é possível notar que os compósitos de bambu-epóxi são mais leves e muito mais baratos que o tecido de aramida. Outra observação foi que os valores utilizados para realização dos cálculos, foram retirados da literatura ou

através da consulta junto aos fornecedores (SATYANARAYANA et al, 2007; CALLISTER e SILVA, 2014).

TAB. 4.9 – Relação de custo dos componentes utilizados na blindagem.

<b>Materiais da blindagem multicamadas</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso (kgf)</b>	<b>Preço por kg (dólares)</b>	<b>Custo do material (dólares)</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	225	3,53	0,794	33	26,20
Aramida	225	1,4	0,315	63,60	20,03
Compósito de bambu-epóxi	225	1,11	0,175	2,80	
Epóxi 70%					
Bambu 30%		0,688	0,046	0,74	0,83
Liga de alumínio 6061	112,5	2,70	0,304	8,50	2,58

Silva, 2014. Adaptado.

A TAB. 4.10 apresenta um comparativo do peso total da blindagem com o compósito ou com o tecido de aramida, bem como os custos destas blindagens multicamadas.

TAB.4.10 – Comparativo de peso e custo entre o compósito bambu-epóxi e o tecido da aramida

<b>Material</b>	<b>Peso total (kgf)</b>	<b>Redução de peso (%)</b>	<b>Custo total (dólares)</b>	<b>Redução de custos (%)</b>
Compósito epóxi-bambu	1.319		29,61	
Tecido de Aramida	1,413		48,81	
Redução percentagem		6,65		39,33

Caso o compósito de epóxi-bambu fosse utilizado como camada intermediária, em substituição ao tecido de aramida em uma blindagem multicamadas, ele reduziria em 6,65% o peso e em 39,33% os custos da blindagem.

## 5. CONCLUSÕES

1. Os compósitos de epóxi reforçado com fibras ou com plaquetas de bambu, foram ensaiados com a finalidade de atestar a eficiência balística. Os dois compósitos avaliados como camada intermediária para uma blindagem multicamadas, atenderam a norma internacional NIJ 0101.04, ou seja, não houve profundidade de indentação igual ou superior a 44 mm, todos ficaram bem abaixo do estabelecido pela norma.

2. O compósito epoxídico reforçado com fibras de bambu, obteve o melhor desempenho balístico, uma vez que a profundidade de indentação média foi de 17,58 mm contra 18,68 mm do compósito epoxídico reforçado com plaquetas de bambu e 22,67 mm do tecido de aramida (LUZ, 2014). Porém quando comparadas as indentações obtidas nesta dissertação, com os resultados obtidos por Silva (2014), o compósito de curauá 30% obteve um melhor desempenho, uma vez que apresentou indentação de 16,42 mm. O compósito de manta de juta apresentou também um menor valor de indentação 17,51 mm (LUZ, 2014), o que indica um melhor desempenho balístico quando comparado ao compósito de epóxi-bambu. Uma possível explicação para o melhor desempenho do curauá e da manta de juta, pode ser atribuída às fibras de curauá e de juta apresentarem melhores propriedades mecânicas, quando comparados com as fibras de bambu.

3. O compósito de fibras de bambu apresentou a maior velocidade limite, 198,28 m/s, quando comparado ao compósito de plaquetas (196,08 m/s). Isso indica que o compósito de fibras de bambu absorveu mais energia com o impacto do projétil, logo obteve um melhor desempenho balístico

4. Os compósitos de fibras e de plaquetas de bambu apresentaram uma absorção de energia de 5,7% e 5,6% respectivamente, superando o compósito de curauá 30% que apresentou cerca 3% de energia absorvida (SILVA, 2014) e equiparando-se com a manta de juta que apresentou 5,7%. Porém como já mostrado anteriormente, a indentação média tanto do compósito de curauá 30% (16,42 mm), quanto da manta de juta (17,51 mm), foram menores do que a dos compósitos de fibras (17,58 mm) e plaquetas de bambu (18,68 mm), logo era esperado que como o compósito de epóxi-bambu que absorveu mais energia que o

compósito de curauá 30%, apresentasse menor valor de indentação, o que não foi observado, isso pode ser novamente atribuído, as melhores propriedades mecânicas das fibras de curauá e de juta, quando comparados com as fibras de bambu.

5. Como foi mostrado, o tecido de aramida apresentou o maior valor de impedância de choque,  $13,73 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$  (LUZ, 2014), esse valor justifica a menor redução de energia de impacto e conseqüentemente maior valor de indentação. Isso explica porque o compósito epóxi-bambu apresentou maiores resultados de impedância, quando comparado com o compósito de epóxi-juta e o curauá 30%, que no caso obtiveram resultados de indentação menores do que o compósito epóxi-bambu.

6. Com auxílio das micrografias foi possível observar que os compósitos ensaiados como camada intermediária tiveram suas superfícies recobertas por fragmentos da cerâmica utilizada como camada frontal, isso indica que todos esses materiais contribuíram para a dissipação de energia através do mecanismo de incrustação mecânica, que consiste basicamente na captura dos fragmentos gerados pelo impacto do projétil. Outro mecanismo observado foi a ruptura frágil da matriz epóxica ajudando na dissipação de energia através da nucleação e propagação de trincas. Ao analisar as superfícies fraturadas do material cerâmico foi possível observar um mecanismo de fratura intergranular que também auxilia na dissipação da energia de impacto.

7. O compósito de epóxi-bambu incorporado como camada intermediária em uma blindagem multicamadas, apresentou um peso total de 1,319 Kgf, enquanto que utilizando como camada intermediária o tecido de aramida, o peso total da blindagem foi de 1,413 Kgf, com isso a blindagem com o compósito mostra-se 6,65% mais leve. Com relação ao preço, a blindagem composta por uma camada de epóxi-bambu apresentou um custo total de US\$ 29,61, já a blindagem composta por uma camada de tecido de aramida apresentou um custo total de US\$ 48,81, logo a utilização do compósito de epóxi-bambu mostrou-se 39,33% mais barato.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

- Analisar a influência causada no comportamento balístico a variação da fração volumétrica de fibras e plaquetas de bambu no compósito epóxi-bambu.
- Acomodar as fibras no interior da matriz com diferentes orientações.
- Comparar e analisar o desempenho balístico do compósito epóxi-bambu reforçado com 30%v, na utilização de outro tipo de matriz, tal como o poliéster.
- Estudar o comportamento balístico de uma blindagem multicamada utilizando tecido de outra fibra ainda não estudada (piaçava, malva, cânhamo), prensado, colado ou costurado, reproduzindo a configuração de um tecido de aramida.
- Desenvolver um produto final, como um colete, utilizando o compósito de epóxi-bambu.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**, CENGAGE Learning, 2008.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. **Composites reinforced with cellulose based fibres**. *Progress in polymer science*, v. 24, n. 2, p. 221-274, 1999.

BARBOSA, N.P.; GHAVAMI, K. **“Bambu como material de construção”**. (Artigo técnico) Departamento de Tecnologia da Construção Civil, Centro de Tecnologia. Programa de Pósgraduação em Engenharia Urbana, UFPB. João Pessoa, 2005.

BERALDO, A.L.; RIVERO, L.A. **Bambu laminado colado (BLC)**. *Floresta e Ambiente*, Rio de Janeiro, v.10, n.2, p. 36-46, 2003.

BRITO, J.O.; TOMAZELLO FILHO, M.; SALGADO, A.L.B. **Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu**. IPEF, Piracicaba, n.36, p.13 - 17, 1987.

BÜRGER, D., DE FARIA, A. R., DE ALMEIDA, S. F., DE MELO, F. C., & DONADON, M. V. **Ballistic impact simulation of an armour-piercing projectile on hybrid ceramic/fiber reinforced composite armours**. *International Journal of Impact Engineering* 43, pp.63-77, 2012.

CALLISTER Jr., William T. – **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução** – LTC. – Sétima Edição (em Português) – 2008.

CHAGAS, Carlos Frederico de Matos. **Minimização do Efeito de Aresta em Blindagem Cerâmica à Base de Alumina**. 2014. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

CHEN, Hongyan; MIAO, Menghe; DING, Xin. **“Influence of moisture absorption on the interfacial strength of bamboo/vinyl ester composites”**. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009, 40.12: 2013-2019.

CORFIX, 2014. Massa de modelar. FISPQ – (Ficha de informação de segurança de produtos químicos) – Porto Alegre – RS- Brasil. Disponível em <<http://www.corfix.com.br>>. Acesso em 16 de agosto de 2014.

DA SILVA, C. M., Rosa P. A., and Martins P. A., 2011. "**Avaliação da energia remanescente resultante da interação do projétil com a blindagem balística**". In: 6º Congresso brasileiro de engenharia de fabricação.

DA SILVA, M. V, STAINER, D, AL-QURESHI, H. A., & HOTZA, D.. "**Ceramic armors for ballistic applications: a review.**" *Cerâmica* 60.355 (2014): 323-331.

DE MIRANDA, Leví Inimá. ***Balística Forense—do Criminalista ao Legista***. Editora Rubio, 2014.

DE PAOLI, Marco Aurelio. ***Degradação e estabilização de polímeros***. São Paulo: Artliber, 2009.

ESPERT, Ana; VILAPLANA, Francisco; KARLSSON, Sigbritt. "**Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties. Composites Part A: Applied science and manufacturing**", v. 35, n. 11, p. 1267-1276, 2004.

FARUK, O, BLEDZKI, A. K., FINK, H. P, & SAIN, M.. **Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010**. *Progress in Polymer Science*, Vol. 37, 1552– 1596, 2012.

GHASEMNEJAD, H, SOROUGH, V. R., MASON, P. J, & WEAGER, B. **To improve impact damage response of single and multi-delaminated FRP composites using natural Flax yarn**. *Materials & Design*, v. 36, 2012, p. 865-873.

GHAVAMI, K. "**Application of bamboo as a low-cost energy material in civil engineering**". THIRD CIB RILEM SYMPOSIUM ON MATERIALS FOR LOW INCOME HOUSING. México City, 1989, p. 526-536.

GHAVAMI, K. Bambu: "**Um Material Alternativo na Engenharia. Revista do Instituto de Engenharia**", n.492, p. 23-27, 1992.

GHAVAMI, K.; SOLORZANO, I G. **Comparison between microstructure of bamboo culmand wood**. *Acta Microscopia*. In: III Interamerican conference on electron microscopy e xv meeting of Brazilian society for electron microscopy. Caxambú – MG, Brazil, 1995.

GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. **Determinação das propriedades dos bambus das espécies: *mosó, matabe, guadua angustifolia, guadua tagoara e dendrocalamus giganteus* para utilização na engenharia**. PUCRJ – Departamento de Engenharia Civil, 2001.

GOMES, Alaelson V. **Comportamento balístico da alumina com adição de nióbia e variação da geometria do alvo**. 2004. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2004.

GONÇALVES, D. P. **“Análise e investigação de impactos em blindagem composta cerâmica/metal”**. Diss. Dissertação de mestrado do Instituto tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil, 2000a.

GONÇALVES, M. T. T.; PEREIRA, M D. R. & GONÇALVES, C. D. **Ensaio de resistência mecânica em peças laminadas de bambu**. In: XXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola–Conbea, Fortaleza. 2000b.

GRAÇA, V.L. **“Bambu – Técnicas para o cultivo e suas aplicações.”** São Paulo: Icone, 1988, 124p.

GRILLO, M. A. M. R. M., **“Efeito de parâmetros da ameaça em alvos metálicos.”** Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Portugal, 2009.

JUNIOR, M.G., NOVACK, K. M., & BOTARO, V. R. **“Caracterização anatômica da fibra de bambu (*Bambusa vulgaris*) visando sua utilização em compósitos poliméricos”**. Revista Iberoamericana de Polímeros 11(7), 442-456 SLAP, 2010.

HSU, Y. F., WANG, S. F., WANG, Y. R., & CHEN, S. C.. **Effect of niobium doping on the densification and grain growth in alumina**. Ceramics International, v. 34, n. 5, p. 1183-1187, 2008.

Introdução para FLICKR. [www.flickr.com](http://www.flickr.com). Disponível em <[https://www.flickr.com/photos/guadubamboo/galleries/72157634344470379/#photo\\_7925888566](https://www.flickr.com/photos/guadubamboo/galleries/72157634344470379/#photo_7925888566)>. Acesso em 05 de janeiro de 2015

JOHN, M.J.; THOMAS, S. **Biofibers and Biocomposites**. Carbohydrate Polymers, Vol. 71, 343-364, 2008.

JUDZIEWICZ, E. J., CLARK, L. G., LONDONO, X., & STERN, M. J. **American bamboos**. Smithsonian Institution Press, 1999.

JUSSILA, J. **“Wound ballistic simulation: assessment of the legitimacy of law enforcement firearms ammunition by means of wound ballistic simulation”**. Academic dissertation. University of Helsinki Faculty of Medicine, 2005.

KRISHNAN, K., SOCKALINGAM, S., BANSAL, S., & RAJAN, S. D.. **Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact**. Composites Part B: Engineering, v. 41, n.8, p.583–593, 2010.

LÓPEZ, O. H. **“Bamboo”**, The gift of the gods. 553 p., 2003.

LOURO, L. H. L.; LINDFORS, A.; MEYERS, M. A. **Stress-wave-induced damage in alumina**. Le Journal de Physique Colloques, v. 49, n. C3, p. C3-333-C3-338, 1988.

LOURO, Luis HL; MEYERS, Marc A. **Effect of stress state and microstructural parameters on impact damage of alumina-based ceramics**. Journal of materials science, v. 24, n. 7, p. 2516-2532, 1989.

- LUZ, F. S. “**Avaliação do comportamento balístico de blindagem multicamada com compósito de epóxi reforçado com fibra de juta**”, 2014 Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, 2014.
- MADHU,V, K. RAMANJANEYULU, T. BALAKRISHNA BHAT, N.K. GUPTA. **An experimental study of penetration resistance**. International Journal of Impact Engineering , v 32, p 337–350, 2005.
- MAGALHÃES, A. P. “**Caracterização da cadeia produtiva do bambu no Brasil**”: Abordagem preliminar. Rio de Janeiro: UFRJ, 2008. p 22-23.
- MANO, Eloisa Biasotto. **Introdução a polímeros**. Edgar Blücher, 2001.
- MANO, B., ARAÚJO, J. R., SPINACÉ, M. A. S., & DE PAOLI, M. A.. **Polyolefin composites with curaua fibres: Effect of the processing conditions on mechanical properties, morphology and fibres dimensions**. Composites Science and Technology, v. 70, n. 1, p. 29-35, 2010.
- MARGEM, J, I; **Estudo das características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de malva**. 2013. Tese (Doutorado Engenharia de Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), 2013.
- MARINHO, Nelson Potenciano. **Características das fibras do bambu (Dendrocalamus giganteus) e potencial de aplicação em painéis de fibra de média densidade (MDF)**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.
- MEDVEDOVSKI, Eugene. **Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure**. Part 1. Ceramics International, v. 36, n. 7, p. 2103-2115, 2010.
- MEYERS, M.A. **Dynamic behavior of materials**. John Wiley & Sons, New York, 1994.
- MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. **Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: an overview**. Macromolecular Materials and Engineering, v. 276, n. 1, p. 1-24, 2000.
- MONTEIRO, S.N.; LIMA JR., E.P.; LOURO, L.H.L; SILVA, L.C.; DRELICH, J.W. **Unlocking function of aramid fibers in multilayered ballistic armor**. Accepted for publication in Metallurgical and Materials Transactions A, november, 2014a.
- MONTEIRO, S. N.; LOURO, L. H. L.; TRINDADE, W.; ELIAS, C. N.; FERREIRA, C. L.; LIMA, E. S.; WEBER, R. P.; SUAREZ, J. C. M.; FIGUEIREDO, A. B. H. da S.; PINHEIRO, W. A.; SILVA, L. C.; LIMA, E. P. **Natural Curaua Fiber Reinforced Epoxy Composite in Multilayered Ballistic Armor**. 6th Symposium on Dynamic Behavior of Materials, 2014, 2014b. (Submetido)

MONTEIRO, S. N., LOPES, F. P. D., BARBOSA, A. P., BEVITORI, A. B., DA SILVA, I. L. A., & DA COSTA, L. L. **Natural lignocellulosic fibers as engineering materials—an overview**. Metallurgical and Materials Transactions A, v. 42, n. 10, p. 2963-2974, 2011.

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, v. 61, n. 1, p. 17-22, 2009.

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**. Compos Sci Technol, vol. 60, pp. 2631-42, 2000.

NETRAVALI, A.N and CHABBA, S. **“Composite get greener”**. *Mater today* vol. 6, 2003, p.22-29.

Norma NIJ Standard-0101.04. **Ballistic Resistance of Personal Body Armor**.U.S. Department of Justice/Office of Justice Programs - National Institute of Justice, 2000.

NORONHA, K. F., & MELO, F. C. L, 2010. **“Avaliação do desempenho de adesivos poliméricos na interface dyneema®/alumina”**. In: 6º Congresso nacional de engenharia mecânica.

OKUBO, K.; FUJII, T.; YAMAMOTO, Y. **“Development of bamboo-based polymer composites and their mechanical properties”**. Composites Part A: Applied science and manufacturing, 2004, 35.3: 377-383.

PAES, J. B., DE OLIVEIRA, A. K. F., DE OLIVEIRA, E, & DE LIMA, C. R. **Caracterização físico-mecânica do laminado colado de bambu (Dendrocalamus giganteus)**. Ciência Florestal, v. 19, n. 1, p. 41-51, 2009.

PARK, J. M., SON, T. Q., JUNG, J. G., & HWANG, B. S. **Interfacial evaluation of single Ramie and Kenaf fiber/epoxy resin composites using micromechanical test and nondestructive acoustic emission**. Composite Interfaces, v. 13, n. 2-3, p. 105-129, 2006.

PEREIRA, M. A. **Bambu: espécies, características e aplicações**. Bauru: UNESP, Editora da UNESP, 2001. 58 p. 2001.

PEREIRA, M.R.; BERARDO, Antonio L. **Bambu de corpo e alma**. Bauru-SP: Canal6, 2007.

PIRES, G., PEREIRA, D. S., DIAS FILHO, N. L., & VECCHIA, G. D. **"Caracterização físico-química e mecânica do sistema éster de Silsexquioxano/Resina Epóxi Dgeba/Dietilenotriamina"**. Revista Matéria 10.2 2005,: 317-330.

PIRES, Eduardo Nascimento. **Efeito do Tratamento de Superfície em Fibras de Juta no Comportamento Mecânico de Compósitos de Matriz Epóxi**. 2009. Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

Prensas motorizadas. NOWAK. Disponível em: <<http://www.nowak.com.br/loja/prensas>>. Acesso em 21 de dezembro de 2014.

RIVERO, L. A. **Laminado colado e contraplacado de bambu**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, 2003.

REED, James S. **Principles of ceramic processing**. s.l. : John Wiley and Sons, 1995.

RUSHING, R.A., THOMPSON, C., CASSIDY, P.E., J. **Applied Polymer Science**, v. 53, p. 1211-1219, 1994.

SARTORI, E. M.; CARDOSO JUNIOR, R. **Estudos da utilização do bambu em estruturas de concreto armado e na construção civil**. UNIDERP, Campo Grande, 20p, 1997.

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., SUKUMARAN, K., MUKHERJEE, P. S., PAVITHRAN, C., & PILLAI, S. G. K . **Natural fibre-polymer composites**. Cement and Concrete composites, v. 12, n. 2, p. 117-136, 1990.

SILVA, Luís C. **Comportamento balístico do compósito epóxi-curauá em blindagem multicamada**. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2004.

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 / 4º Trimestre, p. 71-79, 2013.

TRINDADE, Willian. **Influência da geometria e da microestrutura no comportamento dinâmico da alumina aditivada com nióbia**. 2012. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, 2012.

WEBER, Ricardo Pondé. **Comportamento mecânico e balístico de um compósito laminado de policarbonato**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, 2004.

XAVIER, C.; COSTA, C. R. C. "**Estudo do comportamento mecânico de placas de alumina sob impacto balístico**." Cerâmica 30.175 (1984): 161-168.

ZAKIKHANI, P., ZAHARI, R., SULTAN, M. T. H., & MAJID, D. L. "**Extraction and preparation of bamboo fibre-reinforced composites.**" *Materials & Design* 63 (2014): 820-828.

ZUKAS, J. A.; NICHOLAS, T.; SWIFT, H. F.; GRESZCZUK, L. B.; CURRAN, D. R. **Impact dynamics.** 1° edition ed. New York: John Wiley & Sons, 1982.

ZHOU, N., GENG, X., YE, M., YAO, L., SHAN, Z., & QIU, Y.. **Mechanical and sound adsorption properties of cellular poly (lactic acid) matrix composites reinforced with 3D ramie fabrics woven with co-wrapped yarns.** *Industrial Crops and Products*, v. 56, p. 1-8, 2014.