

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Cap QEM THIAGO LARA MILANEZI

**COMPORTAMENTO BALÍSTICO DA FIBRA DE RAMI EM
BLINDAGEM MULTICAMADAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia.

Orientadores: Prof. Luis Henrique Leme Louro – Ph.D.

Prof. Sergio Neves Monteiro – Ph.D.

Prof. Alaelson Vieira Gomes - D.C.

Rio de Janeiro

2015

c2015

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

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

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

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

620.11	Milanezi, Thiago Lara
M637c	Comportamento balístico da fibra de rami em blindagem multicamadas / Thiago Lara Milanezi; orientado por Luis Henrique Leme Louro , Sérgio Neves Monteiro, Alaelson Vieira Gomes –Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2015. 134p.: il. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015. 1. Curso de Ciência dos Materiais – teses e dissertações. 2. Proteção balística. 3. Blindagem multicamadas. 4. Ensaio balístico. 5. Plastilina. 6. Fibra de rami I. Louro, Luis Henrique Leme. II. Monteiro, Sergio Neves. III. Gomes, Alaelson Vieira. IV. Título. V. Instituto Militar de Engenharia.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Cap THIAGO LARA MILANEZI

**COMPORTAMENTO BALÍSTICO DA FIBRA DE RAMI EM
BLINDAGEM MULTICAMADAS**

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. Luís Henrique Leme Louro – Ph.D.

Prof. Sergio Neves Monteiro – Ph.D.

Prof. Alaelson Vieira Gomes – D.C.

Aprovada em 02 de Fevereiro de 2015 pela seguinte Banca Examinadora:



Prof. Luís Henrique Leme Louro – Ph.D. do IME – Presidente



Prof. Sergio Neves Monteiro – Ph.D. do IME



Prof. Alaelson Vieira Gomes – D.C. do IME



Prof. Jean Igor Margem – D.Sc. da ISECENSA

Rio de Janeiro

2015

Para Patrícia

AGRADECIMENTOS

Um trabalho dessa natureza e extensão não se faz sozinho. É mais do que justo expressar aqui a minha gratidão em relação às pessoas que, de uma forma direta ou indireta, me ajudaram a possibilitar que esta empreitada fosse concluída.

Agradeço primeiramente a Deus, fonte de amor, força que me impulsiona e que me possibilita o *poder do agora*, me mostrando que eu não estou apenas inserido na vida, mas que eu sou a própria vida, devendo por isso ter um grande respeito pela existência.

À minha esposa Patrícia, que é também minha grande companheira e melhor amiga. Sua constante presença em minha vida e amizade me motivam e me fazem prosseguir com entusiasmo. Dedico este trabalho a ela em especial.

À minha família - meu pai Jayme, minha mãe Lúcia, minha irmã Pollyanna, meus irmãos Jayme e Marcos, e minha cunhada Gal -, pelos seus belos exemplos de vida, pelos valores vivenciados na prática, por suas orações em meu favor, por sua torcida sincera e pelos constantes contatos telefônicos para saber “a quantas” eu andava.

Ao Professor Luís Henrique Louro, meu Orientador neste projeto, cujos conselhos e palavras me indicaram o caminho correto a ser trilhado nesta trabalhosa jornada. Agradeço-o por sua constante compreensão e atenção para comigo, e por sempre compartilhar sua grande experiência profissional e de vida.

Ao Professor Sérgio Neves, por sempre me transmitir grande motivação para o estudo das fibras naturais, estando sempre presente e me ajudando com todo o apoio logístico e financeiro necessários, os quais possibilitaram que atividades tais como a preparação dos corpos-de-prova e a execução dos ensaios acontecessem da melhor forma possível.

Ao Cel Alaelson, por ter estado sempre receptivo e disponível para me transmitir apropriadas informações e sugestões inovadoras, que foram fundamentais para a diversificação dos meus ensaios de tiro. Agradeço-o por sua postura de estar sempre aberto a me ouvir e me orientar.

Ao Professor Igor Margem, pela transmissão de seu conhecimento no campo das fibras naturais, e por seus preciosos e efetivos conselhos, os quais me ajudaram

no desenvolvimento prático de meus trabalhos, considerando-se os desafios do dia-a-dia que se apresentam naturalmente ao aluno no meio acadêmico.

Ao Cel Sousa Lima, por suas valiosas dicas sobre a implementação de uma proporção adequada entre as etapas de um estudo de pós-graduação, e por ter me ajudado diretamente com a compra da tampa do moinho de bolas do Laboratório de Cerâmicas, aquisição que foi muito importante para o prosseguimento dos trabalhos de confecção dos corpos cerâmicos.

Ao Cap Elson, meu colega de turma e grande amigo, por seu crucial apoio prestado de forma oportuna, sem o qual as coisas teriam ficado muito mais difíceis para mim nessa jornada como aluno de pós-graduação do IME.

Ao CAEx, Unidade na qual todos os ensaios balísticos deste estudo foram realizados. Sem o apoio do Cel Gatti, TC Malizia, Cap D'Mengeon, Ten Diogo, ST Lima, Sgt Machado, Sgt Santiago, Sgt Furiati, Sgt Marcelo Alves e do Sgt Paiva, esta Dissertação simplesmente não teria sido concretizada, dado que a essência deste trabalho foi a execução de testes de tiro e a medição de seus resultados.

Aos amigos Luís Carlos, Fernanda, Renato, Bruna e Fabio, com quem tive o privilégio de estabelecer um grupo de trabalho para a confecção de amostras e realização de ensaios balísticos. Agradeço-os por suas diversas ajudas prestadas e por sua constante disposição para o envio de materiais e para a retirada das minhas dúvidas, presencialmente ou *online*.

Ao DCT, que me possibilitou fazer um curso de pós-graduação no IME em tempo integral, o que se traduz numa oportunidade profissional fantástica e única para nós, militares do QEM.

À equipe de Coordenadores e Professores da Pós-Graduação do Programa de Ciência dos Materiais, por sua competência e por sua genuína vontade de ensinar e de ver o curso progredir.

Ao pessoal do Laboratório de Cerâmicas, em especial a Andréa, o Sgt Fernando e o Rubens, por seus apoios irrestritos. Agradeço também aos alunos do 2º ano Octavio, Caio Borges e Gabriel Dias, pelo estratégico apoio prestado na fabricação dos corpos-de-prova que ocorreu num momento crítico e importante, considerando-se o cronograma da dissertação.

Ao pessoal da Secretaria da SE-4, em especial ao Sgt Rezende, à Heloísa e à Isabel, que sempre estiveram prontos a me ajudar nos afazeres documentais da Seção e com esclarecimentos diversos.

Às instituições UENF, CBPF e CEPEL, nas pessoas do Rômulo, Bárbara e Josélio respectivamente, que me ajudaram de forma muito útil, seja fornecendo materiais, seja realizando ensaios.

A todos os integrantes do Corpo de Alunos, por sempre terem me apoiado nos trâmites administrativos internos do IME com presteza e boa vontade, em especial o Cap Carlos Alberto e ST Jamilson.

Um agradecimento especial ao Cap Edio e ao Ten Montez, pessoas as quais me ajudaram de forma significativa no período do Mestrado, em áreas totalmente distintas, mas tendo sido ambos altamente eficazes e leais comigo no desenrolar dos auxílios prestados.

Ao Cap João Paulo Maranhão, ao Maj Marcos Paulo, ao Celso Rezende, ao Cap Lucio, ao Maj Terra, à Cap Aline Cruz, ao Joel, ao Sgt Lemos, ao Cel Cabral, à Talita Gama, ao Maj Carlos Chagas, ao Cap Marcelo, ao Cap Jesus, ao TC Oliveira, ao Prof Gerson, ao TC Willian, ao Veltre, ao Zico, ao Leonardo, ao Irani, ao Danilo, ao Leandro, à Deisy, à Cleide e tantos outros, pelas conversas edificantes, pelo apoio moral diante das dúvidas, pela ajuda na hora incerta, pela atenção concedida, pela carona dada, pela troca de experiências ou por um simples cumprimento ou “bom dia” no saguão de entrada.

Aos integrantes do IME em geral, presentes na cantina, nas faxinas, nos Laboratórios, na Biblioteca, nas salas de aula, nos PCs, nos corredores; enfim, a todas as pessoas que transformam o Instituto num lugar vivo e pulsante.

Por fim, aos meus familiares, amigos e colegas em geral, cujas companhias e conversas ao longo da vida me inspiraram e, dessa forma, me mostraram que vale a pena continuarmos lutando e trabalhando, a fim de tentarmos ser a melhor pessoa que podemos ser.

“Escuta e serás sábio. O começo da sabedoria é o silêncio.” (Pitágoras)

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	12
LISTA DE TABELAS	15
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	16
RESUMO.....	17
ABSTRACT.....	18
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 POSICIONAMENTO DA DISSERTAÇÃO	19
1.2 OBJETIVO DO ESTUDO	20
1.2.1 OBJETIVO GERAL	20
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 – POLÍMEROS.....	22
2.1.1 – CONCEITOS GERAIS	22
2.1.2 – RESINA EPÓXI E SUA APLICAÇÃO EM COMPÓSITOS.....	23
2.2 – FIBRAS NATURAIS VEGETAIS	25
2.2.1 - FIBRA VEGETAL DE RAMI.....	25
2.2.2 - RAMI EM TECIDO E SUA APLICAÇÃO EM COMPÓSITOS PARA PROTEÇÃO BALÍSTICA	28
2.3 – COMPÓSITOS.....	29
2.3.1 - COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA COM FIBRA.....	29
2.4 – CERÂMICAS.....	31
2.4.1 – CONCEITOS GERAIS.....	31
2.4.2 – ALUMINA (Al_2O_3).....	32
2.4.3 ALUMINA (Al_2O_3) ADITIVADA COM NIÓBIA (Nb_2O_5)	32
2.4.4 PROCESSAMENTO CERÂMICO	33
2.4.4.1 – POLIETILENO GLICOL (PEG)	33
2.4.4.2 – SINTERIZAÇÃO	34
2.4.5 – CERÂMICOS COMO PROTEÇÃO BALÍSTICA	34
2.4.6 RELAÇÃO ENTRE MODOS DE FRATURAS E PRESENÇA DE ADIÇÕES	35
2.5 – O CONCEITO DE SINERGIA	36
2.6 BLINDAGEM MULTICAMADAS	36
2.7 COMPÓSITO FINAL: PASTILHA CERÂMICA SOBREPOSTA ÀS PLACAS COMPÓSITA, DE ALUMÍNIO E À ARAMIDA – E SUA APLICAÇÃO BALÍSTICA... ..	38

2.8 COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS MATERIAIS E CONSIDERAÇÕES SOBRE A EFICIÊNCIA BALÍSTICA	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1 ASPECTOS GERAIS.....	42
3.2 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	43
3.2.1 ALUMINA E NIÓBIA.....	43
3.2.2 – FIBRA DE RAMI EM ESTADO NATURAL.....	43
3.2.3 – RAMI EM TECIDO.....	44
3.2.4 - RESINA EPÓXI.....	46
3.2.5 – PLASTILINA.....	47
3.2.6 – ALUMÍNIO.....	47
3.2.7 - ADESIVO ULTRA FLEX.....	48
3.2.8 – ARAMIDA.....	49
3.3 OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS DE CERÂMICOS.....	50
3.3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	50
3.3.2 OBTENÇÃO DO PÓ.....	51
3.3.3 PRENSAGEM DO MATERIAL VERDE.....	52
3.3.4 EVAPORAÇÃO DO LIGANTE.....	52
3.3.5 SINTERIZAÇÃO.....	54
3.4 TÉCNICA DE CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS E TECIDOS.....	54
3.5 OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS DE COMPÓSITO FIBRA-EPÓXI.....	55
3.6 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL CERÂMICO.....	57
3.6.1 ENSAIO DE MICRODUREZA.....	57
3.6.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	57
3.6.3 AVALIAÇÃO POR ULTRASSOM.....	57
3.6.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX).....	59
3.7 ENSAIOS BALÍSTICOS.....	59
3.7.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	59
3.7.2 - IDENTIFICAÇÃO DAS PEÇAS CONSTITUINTES DOS CPs.....	62
3.7.3 - IDENTIFICAÇÃO DOS TIPOS DE CP.....	67
3.7.4 – TIPOS DE ENSAIOS BALÍSTICOS REALIZADOS.....	73
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
4.1 ENSAIOS REALIZADOS NO MATERIAL CERÂMICO.....	77
4.1.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	77
4.1.2 MICRODUREZA.....	79
4.1.3 PROPRIEDADES ELÁSTICAS.....	80
4.1.4 TAMANHO MÉDIO DE GRÃO (TMG).....	80
4.2 ENSAIOS BALÍSTICOS.....	82
4.2.1 ENSAIOS SOBRE A PLASTILINA.....	82

4.2.1.1	Análise pelos critérios da Norma NIJ 0101.04.....	82
4.2.1.2	Análise pela relação da deformação gerada com a energia cinética incidente	91
4.2.1.3	Análise pela relação da deformação gerada com a energia incidente e com a densidade superficial do painel.....	109
4.2.2	MEDIÇÃO DA ENERGIA CINÉTICA ABSORVIDA (SEM PLASTILINA).....	117
5	CONCLUSÕES.....	123
6	SUGESTÕES.....	125
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126
8	APÊNDICES.....	130
8.1	-Apêndice 1: FICHA DE INFORMAÇÃO TÉCNICA DO ADESIVO ULTRA FLEX.....	131
8.2	-Apêndice 2: REGISTRO DE DADOS NUMÉRICOS DO RADAR – EXEMPLO 1.....	132
8.3	-Apêndice 3: REGISTRO DE DADOS NUMÉRICOS DO RADAR – EXEMPLO 2.....	133
8.4	- Apêndice 4: REGISTRO DE DADOS DO RADAR EM GRÁFICO.....	134

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Níveis de produção de rami por região do planeta em kg/ha.....	26
Figura 02 – Parte de uma região de cultivo da planta de rami.....	27
Figura 03 – Visão aproximada da folha da planta de rami e seu formato característico.....	27
Figura 04 – Exemplo de estrutura de montagem da Blindagem Multicamadas (1ª classe)	37
Figura 05 – Estrutura típica do compósito final da 1ª classe de montagem.....	39
Figura 06 (a,b) – Fibra de rami em estado bruto, como fornecido.....	44
Figura 07 (a,b) – Estrutura da fibra bruta de rami.....	44
Figura 08 – (a) Amostras coloridas de tecido de rami; (b) tecido importado, como recebido no IME.....	45
Figura 09 (a,b,c) - Estrutura do tecido de rami como recebido.....	46
Figura 10 – (a) Bastão de plastilina novo, conforme fornecido; (b) Armação do suporte de tiro totalmente preenchido com a plastilina, pronto para o ensaio.....	47
Figura 11 – Tubo comercial do adesivo Ultra Flex.....	48
Figura 12 (a,b) - Aramida como fornecida, analisada no MEV.....	49
Figura 13 – (a) Moinho de bolas Marconi modelo MA 500 aberto; (b) em posição de funcionamento.....	50
Figura 14 - Forno INTI modelo FE 1700	50
Figura 15 – Peneira e seu suporte.....	52
Figura 16 - Agitador de peneiras.....	52
Figura 17 - Matriz de compactação	52
Figura 18 - Prensa hidráulica 30 ton SKAY.....	52
Figura 19 – Nova rota utilizada para a retirada do PEG (TRINDADE; GOMES; LOURO, 2013).....	53
Figura 20 – Proveta graduada com a fibra submersa de (a) aramida e (b) rami bruto.	55
Figura 21 – (a) Peças da matriz separadas; (b) indicação do modo de encaixe das peças; (c) exemplo de placa compósita obtida pela prensagem.....	56
Figura 22 – (a) A munição 7,62mm e seu projétil voador; (b) Visão detalhada do projétil.....	60
Figura 23 - (a) Provete calibre 7,62 mm com mira laser: visão traseira; (b) Visão em perspectiva.....	61
Figura 24 – Sistema Radar Doppler: (a) computador dotado de programa de processamento; (b) fonte emissora dos pulsos.....	61
Figura 25 - Critérios de penetração.....	62
Figura 26 – Placa de Alumínio.....	62
Figura 27 – Pastilha cerâmica.....	63
Figura 28 - Placa Compósita Resina-Tecido de Rami, afixada para o ensaio sem plastilina.....	64

Figura 29 - Placa Compósita Resina-Fibra Bruta de Rami, pronta para o ensaio sem plastilina.....	64
Figura 30 - Placa Compósita Resina-Aramida (visão do pós-impacto).....	65
Figura 31 (a,b) – Conjunto de pedaços de Tecido de Rami, unidos com cola para tecido.....	66
Figura 32 - Tipo Cer+CT+Al.....	70
Figura 33 (a,b) – Tipo Cer+CF+Al.....	70
Figura 34 (a,b) – Tipo Cer+CA+Al.....	70
Figura 35 – Tipo Cer+RamiPuro+Al.....	71
Figura 36 (a,b) – Tipo Cer+AramPura+Al.....	71
Figura 37 (a,b) – Tipo Cer+Al.....	71
Figura 38 (a,b) - Estrutura dos CPs dos tipos TA+Cer+CT+(2 ou 3TA).....	72
Figura 39 (a,b,c) - Estrutura Característica dos CPs dos tipos TA+Cer+(Compósito de Resina)+TA.....	72
Figura 40 (a,b,c) - Tipo TA+Cer+Bloco4TA.....	72
Figura 41 (a,b) – Tipo TA+Cer+CF+RamiPuro.....	72
Figura 42 – Tipo Cer+CT	73
Figura 43 – Tipo Cer+2CT.....	73
Figura 44 (a,b) - Modos de fixação dos CPs na plastilina.....	74
Figura 45 – (a) Placa compósita resina-fibra na posição do ensaio; (b) vista alternativa.....	75
Figura 46 – Difratorômetro de Raios X do IME.....	77
Figura 47 (a,b) – Resultados gráficos da DRX.....	77
Figura 48 – Sobreposição dos resultados gráficos.....	78
Figura 49 – Microdurômetro Digital.....	79
Figura 50 (a,b) – Aparelhos de medição de velocidade de ondas no material.....	80
Figura 51 (a,b) – Imagem do MEV escolhida para o TMG.....	81
Figura 52 (a,b) – Aramida rompida, do CP do tipo TA+Cer+Resina+TA.....	84
Figura 53 (a,b,c) - Aramida pós-impacto, da parte da frente do CP do tipo TA+Cer+CT+TA.....	85
Figura 54 – Deformação média na plastilina.....	87
Figura 55 - Placa CF pós-impacto, do Cer+CF+Al.....	88
Figura 56 (a,b,c,d,e) - Superfícies de fratura dinâmica de cerâmicos utilizados nos ensaios, evidenciando o seu caráter intergranular.....	90
Figura 57 – Relação Deformação/Energia para os CPs não perfurados.....	94
Figura 58 - Placa CT pós-impacto, do CP Cer+CT+Al.....	95
Figura 59 (a,b,c) - Placa CT pós-impacto, do Cer+CT+Al.....	96
Figura 60 (a,b) - Placa CA pós-impacto, do CP Cer+CA+Al.....	97
Figura 61 (a,b) – Peça CA pós-impacto.....	98
Figura 62 (a,b,c,d) - Resina pós-impacto, do CP do tipo Cer+CA+Al.....	99
Figura 63 (a,b,c) - Tecido de rami rompido pelo tiro, do CP Cer+RamiPuro+Al.....	100
Figura 64 (a,b) - Placa de Resina Pura pós-impacto.....	102
Figura 65 (a,b) – CT pós-impacto, ainda sobre a plastilina.....	104
Figura 66 (a,b,c,d) - Placa CT pós-impacto, do CP Cer+CT.....	105
Figura 67 (a,b) – Frente e verso do CP TA+Cer+CF+RamiPuro pós-impacto.....	106
Figura 68 (a,b) - Aspecto do dano causado à plastilina após o impacto, com o TA+Cer+CF+RamiPuro.....	106

Figura 69 (a,b)-Tecido de rami pós-impacto, na parte traseira do CP TA+Cer+CF+RamiPuro.....	107
Figura 70 – Comparação dos aspectos dos CPs com aramida ao fundo após o disparo: (a) com perfuração. (b) sem perfuração.....	108
Figura 71 – Relação Deformação/Energia para os CPs que foram perfurados.....	109
Figura 72 – Estrutura típica do CP Cer+Al.....	111
Figura 73 – DSup referente aos CPs expandidos.....	113
Figura 74 – Gráfico comparativo das Deformações por Energia por DSup dos CPs.....	117
Figura 75 – Gráfico comparativo das ECAs das peças.....	119
Figura 76 (a,b) - Placa CF na zona do furo do tiro vazado.....	119
Figura 77 – Comparação entre as energias neutralizadas no ensaio e o somatório das energias individuais.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos Epóxis	24
Tabela 2 - Análise química da alumina	43
Tabela 3 - Análise química da nióbia HP	43
Tabela 4 - Especificações do alumínio	48
Tabela 5 - Propriedades da aramida	49
Tabela 6 - Densidades das fibras medidas em laboratório	55
Tabela 7 - Abreviatura e massa dos componentes	67
Tabela 8 - Descrição dos tipos de CP e suas massas	69
Tabela 9 - Tipo de ensaio para cada CP	76
Tabela 10 - Resultado da microdureza	79
Tabela 11 - Resultados das Propriedades Elásticas	80
Tabela 12 - Valores medidos para o TMG	81
Tabela 13 - Resultados de deformação para os CPs que não foram perfurados	83
Tabela 14 - Resultados de deformação para os CPs que foram atravessados	88
Tabela 15 - Resultados de deformação/energia para os CPs não perfurados	92
Tabela 16 - Resultados de deformação/energia para os CPs perfurados	103
Tabela 17 - Densidade superficial dos componentes	112
Tabela 18 - DSup referente aos CPs expandidos	113
Tabela 19 - Relação global das Deformações por Energia por DSup	116
Tabela 20 - Média das ECAs das amostras	118
Tabela 21 - ECAs das peças	120
Tabela 22 - Média do Ganho Sinérgico Mínimo	121

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

- CBPF – Centro Brasileiro de Pesquisa Física
CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CP – Corpo-de-Prova
CAEx – Centro de Avaliações do Exército
DOP – *Depth of Penetration (Profundidade de Penetração)*
DRX – Difração de Raios-X
DSup - Densidade superficial ou densidade de área
IME – Instituto Militar de Engenharia
MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura
UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro

SÍMBOLOS

- C_L – Velocidade das Ondas Elásticas Longitudinais
 C_o – Velocidade do Som no Material
 C_R – Velocidade das Ondas Superficiais de Rayleigh
 C_S – Velocidade das Ondas Elásticas Cisalhantes
 E – Módulo de Elasticidade
 G – Módulo de Cisalhamento
 P – Pressão
 m - Massa
 V – Velocidade
 λ – Constante de Lamé
 ν – Coeficiente de Poisson
 ρ – Densidade

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi investigar e comparar diferentes tipos de estruturas de proteção balística, as quais utilizaram essencialmente a fibra de rami como um de seus elementos de composição. Para tanto, buscou-se confeccionar corpos-de-prova com materiais diversos e em diferentes combinações de montagem sequencial; isso resultou em uma diversidade de compósitos de blindagem que, após os testes balísticos, levaram à definição de listas ranqueadas com critérios distintos de classificação. Para tal, houve dois grupos principais de ensaios de tiro: um no qual composições de peças foram montadas sobre um material de apoio (plastilina), e outro no qual peças isoladas, sem plastilina ao fundo, eram totalmente atravessadas pelas munições no ato do disparo.

No primeiro grupo de ensaios, o objetivo foi se medir a deformação do material de fundo após o impacto, caracterizando assim a eficiência balística obtida. Nesta categoria de testes, a ideia central da fabricação dos corpos-de-prova foi agrupar uma peça cerâmica com uma camada de fibra pura ou de compósito fibra-resina polimérica; a partir dessa estrutura-base, houve variações de adição de material para se chegar ao formato final da amostra, originando diversos tipos de estrutura de proteção.

A realização desses ensaios com a plastilina indicou que a fibra de rami teve melhor desempenho balístico do que a fibra de aramida, quando o sistema de blindagem multicamadas incorporou outros materiais convencionais. Além disso, confirmou-se que compósitos resina-fibra têm melhores respostas quando comparado com a fibra isolada, conforme averiguado na literatura. Verificou-se também, com o uso da aramida como última camada, que o emprego da placa de alumínio não é mandatória para garantir a não-perfuração do conjunto.

O segundo grupo de testes balísticos teve como objetivo medir a energia cinética absorvida pela amostra. Após as verificações dos valores obtidos, pode-se concluir que a peça cerâmica é o item das estruturas balísticas de maior poder de blindagem, conforme seu entendimento consagrado, absorvendo de oito a dez vezes mais energia do que as outras peças que compõem o sistema.

As análises comparativas realizadas entre peças isoladas e agrupadas demonstraram o efeito sinérgico que há com a estrutura quando se monta todas as peças juntas. Este resultado enfatizou a existência de propriedades únicas de proteção balística quando há uma junção apropriada de diferentes materiais, mostrando que o efeito do conjunto de peças unidas foi maior do que a soma de suas partes isoladas.

ABSTRACT

The goal of this study was both to investigate and to compare different types of ballistic protection structures, which essentially employed the ramie fiber as one of its elemental composition. Therefore, it was aimed to fabricate test-specimens from different materials and in different assembly combinations. This resulted in a variety of composite armor that, after ballistic tests, led to the definition of sorted lists with different classification criteria. To this purpose, there were two main groups of shooting tests: one in which parts of compositions were mounted on a support material (plasticine), and another in which isolated parts, without plasticine in the background, were completely crossed by the ammunition in the act of shooting.

In the first group of tests, the aim was to measure the deformation of the background material after impact, characterizing the obtained ballistic efficiency. In this category of tests, the central idea of manufacturing the test-specimens was to group a ceramic piece with a pure fiber layer or polymer-fiber composite; from this basic structure, there were variations of adding material to reach the final sample set, giving various types of protective structure.

The performance of those tests with plasticine indicated that the ramie fiber had better ballistic performance than that of aramid fiber, when the multilayer armor system (MAS) incorporated the other conventional materials. In addition, it was confirmed that the resin-fiber composites exhibited better responses when compared with the isolated fiber, as found in the literature. It was also observed, by using aramid as the last layer, the use of aluminum plate is not mandatory to ensure non-perforation.

The second ballistic test group aimed to measure the kinetic energy absorbed by the sample. After checking the values obtained, we can conclude that the ceramic piece is the item of ballistic structures of greater power armor as his established history, taking eight to ten times more energy than the other component parts of the system.

Comparative analyzes between isolated and grouped pieces demonstrated the synergistic effect does exist with the structure assembling all the materials together. These results emphasized the existence of unique properties ballistic protection when occurred an appropriate combination of different materials, showing that the effect of all the parts together was greater than the sum of each part separately.

1 INTRODUÇÃO

1.1 POSICIONAMENTO DA DISSERTAÇÃO

O avanço da sociedade nas últimas décadas trouxe um novo panorama político e sociológico, onde as características dos conflitos armados também sofreram alterações. Os tipos das armas, munições e artefatos evoluíram, e com isso os sistemas de proteção e defesa precisaram e ainda precisam passar por uma reciclagem nos princípios que norteiam a definição de suas características, com o intuito de maximizar seus níveis de eficiência de blindagem balística.

O novo cenário mundial traz uma demanda que requer a busca por novos materiais que sejam ecologicamente corretos para que se proteja os ecossistemas a nível mundial. O Brasil possui a maior biomassa e extensão territorial cultivável do mundo, e, além disso, é um dos maiores produtores de fibras vegetais do planeta; dessa forma, o Brasil tem à sua frente uma bela oportunidade de se destacar internacionalmente na pesquisa, produção industrial e aplicação em compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras naturais, nas mais diversas áreas e setores (SOARES, 2012).

Fibras naturais são alternativas abundantes, ambientalmente corretas e de baixo custo para a substituição, em diversos campos, de fibras sintéticas, como por exemplo a incorporação aos materiais termoplásticos. Um estudo da ONU de 2008 indicou que o consumo de móveis provenientes de fontes sustentáveis (entre elas, fibras naturais como sisal, agave e juta) dobrará até 2020 em todo o mundo, especialmente na Europa. Países de elevado potencial agrícola e de expressiva biodiversidade como o Brasil, através da exploração sustentável e responsável destes recursos, podem trazer para si na prática uma desejada e real vantagem competitiva, podendo-se projetar como importantes participantes no mercado internacional de produtos compósitos e de materiais avançados. Desde 2005, o mercado interno nacional de fibras naturais cresceu em volume 5,5% ao ano, substituindo as fibras sintéticas em aplicações já consagradas, ou até mesmo ocupando novos espaços em setores onde novas tecnologias e materiais avançados se tornam, aos poucos, fatores determinantes de sucesso (Fonte: CGEE, 2010).

Além desse aspecto sobre as fibras naturais, cabe ressaltar que, de um outro lado, os materiais cerâmicos avançados nas últimas cinco décadas têm sido utilizados em sistemas de blindagens, essencialmente contra armas leves e de médio porte, para a proteção tanto individual quanto para veículos leves (CHAGAS, 2014). Sendo assim, a obtenção de um sistema de blindagem multicamadas com o qual se procure estudar e entender o efeito benéfico da cooperação, através da junção de materiais de classes diferentes, torna-se interessante e pode contribuir para os avanços da tecnologia de defesa militar.

1.2 OBJETIVO DO ESTUDO

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Neste trabalho, pretende-se avaliar a eficiência balística de materiais multicamadas voltados à proteção balística, que poderá ter aplicações em blindagem tanto pessoal (individual) quanto de unidades móveis (viaturas, helicópteros, etc). As estruturas a serem avaliadas através de ensaios balísticos serão compostas essencialmente por uma placa cerâmica sobreposta a placas compósitas resina-fibra, resina pura ou aramida em bloco, seguido de uma placa de alumínio ou tecido de aramida. O foco deste estudo residirá na medida da deformação permanente gerada no material de apoio (plastilina) pelo disparo, através de ensaios balísticos nas blindagens multicamadas. Este parâmetro servirá como critério para a caracterização da eficiência balística, bem como das relações das medidas desse trauma com grandezas como energia cinética incidente e densidade de área de cada corpo-de-prova. Por fim, a dimensão do trauma na plastilina também determinará a possibilidade de sobrevivência humana à ameaça imposta, segundo os critérios das normas internacionais.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo geral descrito acima será atingido através dos seguintes objetivos específicos:

a) Estudar o material da blindagem quanto às suas propriedades dinâmicas, com ênfase na análise dos mecanismos de falha e fratura dinâmica, através de observações em microscópio das superfícies de ruptura pós-ensaio;

b) Determinar, através de ensaios balísticos, quais CPs não foram perfurados pela ação do disparo, e também quais estão aprovados segundo os critérios de normas internacionais, com a sua classificação em ordem crescente de desempenho;

c) Analisar o desempenho de proteção e a função exercida na estrutura da blindagem multicamadas por cada uma de suas peças componentes;

d) Definir os melhores resultados de blindagem dentre os CPs aprovados por normas internacionais, quanto aos fatores: peso, operacionalização tática do produto final e relação deformação/energia incidente; e

e) Medir as energias cinéticas absorvidas por peças do conjunto do corpo-de-prova de forma isolada, tanto para comprovar a supremacia do material cerâmico em relação aos demais quanto à capacidade de absorção de energia, como também para permitir comparações com resultados de ensaios sobre a amostra completa, para se verificar o efeito sinérgico de proteção advindo da junção dos materiais.

1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A Seção de Ensino de Engenharia Mecânica e de Materiais do IME já vem há anos investindo recursos, tempo e pessoal nessa tão intrigante e promissora área de blindagem balística, com o objetivo de se compreender cada vez mais os princípios e os materiais - e suas combinações – que contribuam para o “estado da arte” da proteção balística. Objetiva-se dar continuidade ao desenvolvimento de novas abordagens tecnológicas que atendam aos requisitos operacionais estabelecidos pela Força, priorizando a utilização de matéria prima nacional, de forma que se busque uma ampliação sustentável do *know-how* estratégico de nossa engenharia militar brasileira e também para que se alcance menores custos nas futuras implementações fabris.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – POLÍMEROS

2.1.1 – CONCEITOS GERAIS

Os polímeros são materiais orgânicos obtidos por meio de uma técnica chamada *polimerização*, a qual se constitui no conjunto de reações químicas que resulta na união de pequenas moléculas unitárias (monômeros) ou com poucas unidades (oligômeros) a fim de sintetizar moléculas gigantes. Entre eles, estão as borrachas, adesivos e plásticos de uso comercial. Na verdade, o termo “plástico” é utilizado mais apropriadamente para materiais poliméricos com aditivos, tais como fibras e pigmentos. São materiais que proporcionam bom isolamento térmico e uma ótima razão resistência-peso – apesar de possuir uma baixa resistência em termos absolutos (ASKELAND; PHULÉ, 2008).

Uma maneira bem adequada para descrever os polímeros é à luz de seu comportamento térmico e mecânico. Dentro dessa ideia, as três principais categorias são os termoplásticos, os termofixos e os elastômeros. Os termoplásticos são compostos de longas cadeias produzidas por monômeros agregados, e essas estruturas podem ou não ter ramificações, e, ainda, cadeias individuais estão entrelaçadas, mas as ligações entre átomos de diferentes cadeias são relativamente fracas - ligações do tipo van der Waals. Têm por isso comportamento mecânico dútil e plástico, e podem ser cristalinos ou amorfos. Possuem ainda boa moldabilidade térmica (amolecem e fundem com facilidade, adquirindo formas diversas); assim, apresentam ótimas propriedades de reciclagem. Vale ressaltar que os termoplásticos, em sua grande parte, apresentam um comportamento não-newtoniano e viscoelástico. 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 (ASKELAND; PHULÉ, 2008).

Já os termofixos são polímeros em rede com uma estrutura reticulada tridimensional, os quais possuem ligações cruzadas covalentes entre as cadeias moleculares adjacentes (o grau de formação de ligações cruzadas é expressivo).

Essas ligações, ao longo dos processos térmicos, prendem as cadeias umas às outras conferindo resistência, em altas temperaturas, aos movimentos de rotação e de trepidação dessa estrutura; assim, ao receberem calor, esses materiais não amolecem. O rompimento dessas ligações cruzadas e a consequente degradação do polímero só ocorrerá através de um aquecimento a temperaturas bem mais elevadas. De uma forma geral, os polímeros termofixos apresentam maior dureza, maior resistência mecânica e maior rigidez do que os termoplásticos e são mais estáveis em termos dimensionais. A reticulação, a qual é iniciado pelo calor, pressão, etc, é um processo irreversível; é por isso que, uma vez formados, os termofixos não podem ser reciclados ou utilizados novamente. Os grupos funcionais dos polímeros termofixos mais comuns são: fenólicos, aminas, poliésteres, epóxis, uretanos e silicone (CALLISTER, Jr. e ASKELAND; PHULÉ, 2008).

Por fim, os elastômeros são materiais que possuem uma elasticidade semelhante à de uma borracha, de forma que eles têm a capacidade de sofrerem deformações significativas para depois retornarem à sua forma original, similarmente ao que ocorre com as molas. Esse tipo de comportamento foi primeiramente observado na borracha natural, a qual já possuía um grande valor de deformação no regime elástico, superior a 200%. Dentre os critérios que devem ser atendidos para que um polímero possa ser caracterizado como um “elastômero”, pode-se citar: (1) não cristalizar com facilidade; (2) o surgimento da deformação plástica deve ser retardado; e (3) o polímero deve estar acima de sua temperatura de transição vítrea (CALLISTER, Jr., 2007).

2.1.2 – RESINA EPÓXI E SUA APLICAÇÃO EM COMPÓSITOS

Os epóxis estão enquadrados na classe dos polímeros termofixos, conforme definido acima. As moléculas com anel C-O-C rígido são a base de sua formação. É no *bisfenol A* - no qual duas unidades de resina de epóxi são adicionadas - que grande parte dos epóxis comerciais baseiam-se para formarem a sua composição. 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. Eles podem, entre outras aplicações, ser utilizados como

adesivos, os quais são polímeros usados para unir outros polímeros, metais, cerâmicas ou compósitos, e, neste caso, constituem-se em *adesivos quimicamente reativos*. Como este tipo de adesivo, os epóxis constituem-se em sistemas de dois componentes, os quais passam pelo processo de cura quando duas resinas são misturadas (ASKELAND; PHULÉ, 2008).

Entre as suas características principais, pode-se citar: ótima combinação de propriedades mecânicas; boas propriedades elétricas; estáveis em termos dimensionais; adesão eficiente; excelente resistência à corrosão; e baixo custo. Entre as suas aplicações típicas, temos: adesivos, moldes elétricos, componentes para os setores automotivo e aeroespacial, revestimentos de proteção, artigos esportivos e matrizes para compósitos com reforço de fibras (CALLISTER, Jr. e ASKELAND; PHULÉ, 2008). Esta última aplicação típica foi a que inspirou o uso do epóxi neste estudo como material da matriz para o compósito polímero-fibra. A Tabela 1 mostra os valores fornecidos por Askeland e Phulé (2008) salientando propriedades das resinas epóxis.

Tabela 1 - Propriedades dos Epóxis			
Resistência à tração na ruptura (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Densidade (g/cm ³)
103	6	3,5	1,25

Para se ter uma ideia da importância da presença da resina epóxi como matriz em compósitos utilizados na proteção balística, já foi constatado que, em compósitos formados com resina polimérica e tecido, a resina (matriz) pode influenciar de forma significativa o desempenho da estrutura balística, mesmo que a quantidade de matriz presente em tais compósitos seja pequena (cerca de 20-25% em volume). A presença da matriz tem o notável efeito de apresentar grande resistência ao movimento dos fios, mantendo-os unidos. Além disso, após a execução de ensaios de flexão, com a conseqüente ruptura dos corpos-de-prova, verificou-se, através de

evidência fotográfica da área danificada, que uma maior quantidade de fios do compósito tecido-resina participou e ficou envolvida na resistência à ruptura, quando comparado com estruturas feitas apenas por tecido (GOPINATH; ZHENG; BATRA, 2012).

2.2 – FIBRAS NATURAIS 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. Embora o uso de FLCs naturais em artefatos e produtos simplórios tenha ocorrido desde o início da nossa civilização, as suas aplicações sistemáticas como materiais de engenharia têm recebido uma considerável atenção apenas nas últimas décadas, motivadas por benefícios ambientais, sociais e econômicos. Baixa densidade, menor desgaste causado aos equipamentos de processamento e maior flexibilidade estão entre os fatores positivos que justificam o aumento do uso das FLCs em compósitos para componentes automotivos ao redor do mundo. Adicionalmente, a estrutura da fibra vegetal natural da FLC pode atingir níveis de resistência à tração próximos dos valores encontrados para as fibras de vidro, o que lhe deu ainda mais destaque e importância no cenário científico (MONTEIRO et al, 2011).

2.2.1 - FIBRA VEGETAL DE RAMI

Devido ao desenvolvimento de uma consciência ambiental cada vez mais apurada, as fibras vegetais nos últimos anos têm atraído cada vez mais atenção, já que se tem com eles, em relação às fibras sintéticas não renováveis, uma alternativa de baixa emissão de carbono que pode ser utilizada como materiais de reforço em compósitos. Alguns exemplos dessas fibras são o linho, o rami, o cânhamo, a juta, o sisal e o bambu. Entre estes citados, a fibra de rami tem sido considerada como uma das candidatas mais promissoras para a indústria de compósitos, em virtude de seus

bons preços e disponibilidade comercial, e também de suas alta resistência específica, biodegradabilidade e reciclabilidade. Na China, as fibras de celulose renováveis são abundantes, especialmente as fibras de rami, as quais são chamadas de "plantas da China" (LI et al, 2013).

O rami (*Boehmeria nivea*) faz parte da família das *Urticaceae*, e é a ausência de pelos urtigantes que a distingue de outros membros dessa família. Ele é multiplicado por rizomas que apresentam gemas – embora produza sementes -, das quais nascem caules eretos, com folhas verdes na parte superior e branco-prateado na inferior, produzindo flores verdes-brancas, masculinas e femininas, derivando-se daí a produção de sementes. A China, já citada acima, é a maior produtora mundial de rami (Fig. 01), que utiliza a grande maioria de sua produção no mercado interno e na indústria de tecidos e similares (OLIVEIRA, 2007).

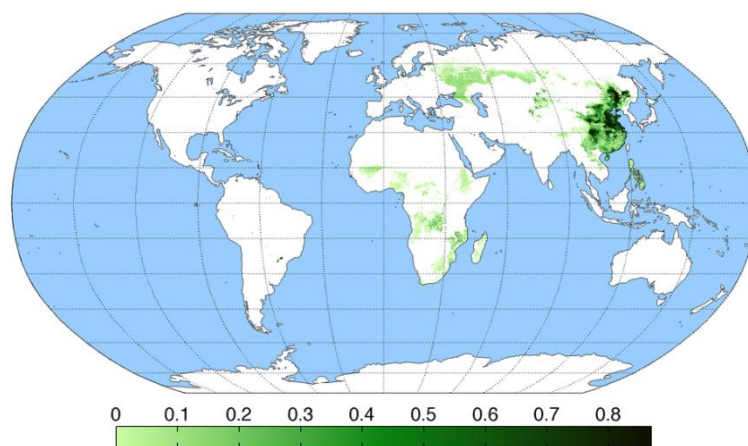


Figura 01 – Níveis de produção de rami por região do planeta em kg/ha (Fonte: Wikipedia)

O rami é uma das fibras naturais de mais baixo custo e, devido às suas características físicas, é a de maior resistência e durabilidade dentre todas as fibras vegetais até então estudadas. A sua fibra é uma excelente matéria-prima para a manufatura de produtos que são tecidos ou entremeados; sua resistência é considerada três vezes superior à do cânhamo, quatro vezes à do linho e oito vezes a do algodão, sendo inclusive mais resistente do que a poliamida. A sua fibra é a mais longa – variando de 5cm a 30cm - e também uma das mais finas fibras

vegetais. Devido ao seu perfil químico e à sua composição, o rami apresenta uma ótima resistência contra bactérias e agentes atmosféricos (SOARES, 2012).



Figura 02 – Parte de uma região de cultivo da planta de rami (Fonte: Wikispaces)



Figura 03 – Visão aproximada da folha da planta de rami e seu formato característico (Fonte: CN Seed)

A fibra de rami é classificada quimicamente como celulósica, assim como o linho, o algodão, etc. Algumas de suas vantagens são: resistente ao mofo e ao ataque de insetos; extremamente absorvente, sofrendo facilmente a impregnação de corantes; incremento da resistência quando molhado; boa resposta às altas temperaturas da água durante a lavagem, situações nas quais apresenta baixíssima

contração superficial; e podem ser branqueados ou tingidos. Há também, em contrapartida, alguns inconvenientes: baixa elasticidade, resiliência praticamente ausente, baixa resistência à abrasão, e pode ser, dependendo dos processos de manufatura, duro e quebradiço (PETRULYTE et al, 2013).

2.2.2 – RAMI EM TECIDO E SUA APLICAÇÃO EM COMPÓSITOS PARA PROTEÇÃO BALÍSTICA

Blindagens feitas de compósitos que usam tecidos estão sendo amplamente usados pelos militares e outras corporações similares. O colete à prova-de-balas tem a função de impedir que o projétil o atravesse totalmente, mas também deve atuar de forma que um impacto não induza um abaulamento significativo na sua face posterior, pois, apesar do projétil poder não atravessar completamente o material do colete, tal deformação pode muitas vezes ocasionar graves lesões ao usuário. A magnitude da protuberância gerada na blindagem pode ser reduzida através da incorporação uma camada de material fibroso, como os tecidos, dentro de sua estrutura (GOPINATH; ZHENG; BATRA, 2012).

As propriedades de resistência ao impacto e à perfuração dos tecidos e seus compósitos com resina dependem de uma série de fatores, tais como: (a) as propriedades do fio: elevada resistência à tração, boa performance numa ampla faixa de temperaturas, boa aderência com a matriz e baixa densidade; (b) a estrutura do tecido: tipo de tecido, o número de filamentos por fio e a densidade de tecelagem; (c) dados do projétil: sua geometria, massa e velocidade de impacto; (d) o modo de interação dos múltiplos fios; (e) as condições de contorno que definem o campo-blindagem; (f) o atrito entre os fios e o projétil; e (g) tipo da resina usado para a laminação (AFSHARI; CHEN; KOTEK, 2012).

Os compósitos feitos com fibras contínuas e alinhadas são bem conhecidos por sofrerem danos extensos de delaminação, no sentido das fibras. Dessa forma, os compósitos confeccionados em contrapartida com tecido apresentam maior resistência à fratura, que é de cerca de 4 a 5 vezes maior, em comparação com os laminados com fibras unidirecionais. Entre as características únicas e vantajosas desses diferentes tipos de mecanismos de falha, podemos citar: a aspereza inerente ao tecido; a disponibilidade de regiões ricas em resina entre os fios e entre os

tecidos; a propagação de fendas ao longo do padrão ondulante dos fios, criando uma grande área de superfície de fratura; e a distribuição das tensões em várias frentes de trincas de delaminação (HOSUR et al, 2004).

Pode-se considerar que o desempenho balístico de um material depende da sua capacidade para absorver a energia de impacto que se cria inicialmente num ponto específico, e à sua capacidade para espalhar essa energia de forma rápida e eficiente. Sendo assim, infere-se que, para a blindagem à base de fibra têxtil, são considerados fatores de grande importância a tenacidade e a deformação de ruptura da fibra, e a sua velocidade sônica (JACOBS; DINGENEN, 2001).

Por fim, é importante registrar que Marsyahyo et al. (2009) fizeram um estudo envolvendo estruturas de rami (entremeado como tecido) mergulhado em matriz epoxídica, visando à avaliação de seu comportamento balístico, o que se assemelha bastante com uma das linhas de estudo desta Dissertação. Esta publicação, importante por sua similaridade com este trabalho, concluiu que determinadas estruturas de rami-epóxi, com as características específicas apresentadas, resistiram aos tiros nos ensaios do Nível II NIJ, mas que não foram suficientes para fornecer a proteção adequada nos ensaios do Nível IV NIJ.

2.3 - COMPÓSITOS

2.3.1 - COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA COM FIBRA

Os polímeros termofixos são os mais comuns para aplicações de cunho estrutural, gerando produtos de grande resistência. A resina epóxi é uma das maiores aplicações como material que assume o papel da matriz no compósito; o epóxi proporciona baixas taxas de contração durante a cura e promove uma ótima aderência com a fibra (SOARES, 2012).

Nas próximas décadas, continuará ocorrendo um crescente interesse na aplicação de PMCs (do inglês “polymer-matrix composite”, ou compósitos de matriz polimérica) reforçados com fibras naturais. Estas fibras, especialmente as lignocelulósicas, são abundantes, renováveis, biodegradáveis e neutras em relação às emissões de CO₂. Compósitos de fibras naturais são menos caros e não exigem tanta energia para o seu processamento, como ocorre para a fibra de carbono. Cada

fibra lignocelulósica tem específicas características morfológicas em sua superfície que afetam o comportamento mecânico dos compósitos de diversas maneiras, podendo melhorar as suas propriedades mecânicas de forma apreciável. A incorporação dessas fibras em estruturas compósitas é algo altamente promissor para um futuro em que se vise a materiais menos caros, mais resistentes e ecologicamente corretos (MONTEIRO et al, 2009).

O desempenho dos materiais que seguem o modelo polímero-fibra depende principalmente do tipo da matriz e da fase dispersa, e também da fração volumétrica dos componentes. A principal responsável pela transferência da carga mecânica da matriz para o reforço é a interface fibra/matriz, e suas propriedades acabam por se tornarem 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).

Um fato indesejável para o material é a possível separação das fases do compósito (chamada por vezes de *delaminação*), e ela pode ocorrer durante o processo de fabricação 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 (GHASEMNEJAD et al, 2012).

Um adequado tratamento das fibras naturais ajudar a estabilizar a área de contato entre essa fase dispersa e a matriz, aumentando a capacidade da fibra em transmitir as tensões sob cargas que interajam com as diversas superfícies internas. Tem-se então que a natureza e condições das fibras influenciam tanto as propriedades mecânicas quanto as tribológicas no comportamento dos compósitos; sendo assim, uma boa seleção das fibras é algo necessário para obter compósitos de alto desempenho (SHALWAN; YOUSIF, 2013).

O comportamento mecânico final de um material compósito depende primordialmente dos princípios e conceitos que regem o mecanismo de adesão entre a fibra de reforço e o meio circundante. A adesão entre fibra e matriz é uma função

de diversos fatores, entre os quais pode-se citar o nível da rugosidade existente entre as superfícies de contato (PARK et al, 2006).

O desempenho de um compósito pode ser melhorado aumentando-se a transferência de solicitação mecânica da matriz plástica para a fibra, a qual possui uma resistência mecânica maior e reforçará, dessa forma, o plástico (MATTOSO et al, 1996). Nesse contexto, porém, a promoção de uma, na verdade, *fraca* interação entre a matriz e a fibra se torna preferível, uma vez que isto facilita que ocorra uma separação de maior duração entre a matriz e o fio *durante* a solicitação mecânica, permitindo às fibras estender a falha para além do que o polímero, sozinho, teria condições (GOPINATH; ZHENG; BATRA, 2012).

Faruk et al. (2012) verificaram que a resistência ao impacto mais elevada para sistemas resina-fibra ocorre quando o material compósito apresenta um teor de fibra de *45% em peso*; esse dado, em conjunto com outros estudos pesquisados, fez este trabalho utilizar, por fim, a proporção de *30% em volume de fibra* como um dos parâmetros a serem utilizados para a confecção das amostras que possuem fibra e resina em sua composição; isso foi motivado, entre outros fatores, pela proximidade existente entre os valores da densidade da resina polimérica (epóxi) e da fibra de rami e da aramida.

2.4 – CERÂMICAS

2.4.1 – CONCEITOS GERAIS

As cerâmicas, definidas basicamente como materiais *cristalinos inorgânicos*, podem ser consideradas como os materiais de caráter “mais natural” existentes no planeta, pois estão presentes tanto na natureza (areia e rochas, entre outros) como no corpo humano (por exemplo, a hidroxiapatita). Não são bons condutores de calor; possuem alta rigidez e resistência mecânica, mas também possuem uma acentuada fragilidade. As cerâmicas mais utilizadas em aplicações tecnológicas e industriais são a alumina e a sílica (ASKELAND; PHULÉ, 2008). Neste trabalho, voltado para a eficiência balística, a alumina exercerá um papel fundamental como elemento provedor de resistência ao impacto.

2.4.2 – ALUMINA (Al_2O_3)

É um material que possui inúmeras aplicações, em especial naquelas sujeitas a grandes temperaturas, e onde seja conveniente também uma alta resistência mecânica. Pode ser empregada também como substrato de baixa constante dielétrica em circuitos eletrônicos, e uma de suas aplicações já consagradas é a de isolante em velas de ignição de automóveis. Na área de saúde (medicina e odontologia) outras aplicações peculiares e muito interessantes também são encontradas (ASKELAND; PHULÉ, 2008).

2.4.3 - ALUMINA (Al_2O_3) ADITIVADA COM NIÓBIA (Nb_2O_5)

A microestrutura da alumina pode ser melhor controlada pelo uso de aditivos em pequenas concentrações. Dentre os diversos aditivos possíveis de serem utilizados para a sinterização auxiliada por fase líquida da alumina, o IME vem estudando a adição de nióbia, obtendo material com propriedades mecânicas que atendam às aplicações de blindagem balística, não atingindo-se, no entanto, a densificação total; todavia, conseguiu-se reduzir a temperatura de sinterização de forma apreciável (CHAGAS, 2014).

O óxido de nióbio, ou simplesmente nióbia, é encontrado na natureza no estado sólido e possui boa estabilidade química. Tem aparência branca, não é solúvel na água e é inerte (CHAGAS, 2014). Como aditivo de sinterização, a nióbia, ao ser utilizada, introduz "íons aliovalentes" que influenciam o processo de sinterização de forma a melhorá-la, pois propicia melhores condições para a ocorrência da difusão e incrementa a concentração dos defeitos nesse óxido (TRINDADE, 2012).

A sinterização e suas implicações para as amostras que se submeteram a 1600°C por uma hora foram menos satisfatórios do que para outras amostras de alumina que receberam adições de nióbia e foram sinterizadas a 1400°C por três horas. Isto confirma o papel da nióbia de promover, entre outras coisas, uma melhor sinterização a temperaturas mais baixas. Estes aditivos permanecem nos contornos dos grãos de alumina, controlando o seu crescimento e intensificando a eliminação

de poros ao longo dessas fronteiras, o que, como resultado, incrementa a densidade das amostras pós-sinterização. A presença de nióbia, que faz gerar precipitados como uma segunda fase nos contornos de grãos da alumina, aumenta a absorção de energia durante o impacto, devido ao fato de promover um modo *intergranular* de fragmentação. Sendo assim, o desempenho balístico das aluminas sem aditivos e sinterizadas a 1600°C foi pior do que as aluminas com nióbia sinterizadas a temperaturas mais baixas; isso tudo ocorre devido ao modo *transgranular* de fragmentação das primeiras, que proporciona baixa dissipação de energia no momento do impacto. Como um fator adicional, a presença de nióbia também aumenta a dureza do corpo cerâmico, o que contribui para erodir a ponta do projétil de forma mais eficiente (LOURO; GOMES; COSTA, 2001).

2.4.4 – PROCESSAMENTO CERÂMICO

2.4.4.1 – POLIETILENO GLICOL (PEG)

O PEG é um dos ligantes que podem ser utilizados em processamento cerâmico, estando enquadrado no tipo “ligante molecular”. Os “ligantes moleculares” 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. O PEG se inclui no primeiro tipo, ou seja, trabalha com o princípio da adesão, pois as suas moléculas são adsorvidas nas partículas cerâmicas. A funcionalidade da molécula polimérica pode ser não-iônica, aniônica ou catiônica. A maioria dos ligantes poliméricos utilizados em processamento cerâmico são não-iônicos ou, em menor frequência, aniônicos. (REED, 1995).

O PEG é um óxido etileno polimérico, com a estrutura $\text{HO} - [\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{O}]_n - \text{H}$. As faixas de peso molecular nos quais é encontrado comercialmente variam de 200 a 8000 g/mol. Os ligantes PEG são solúveis em água, muito puros e, em uma ampla faixa de solventes, possui uma solubilidade limitada (REED, 1995).

2.4.4.2 – SINTERIZAÇÃO

Produtos que foram desidratados e volatilizados (orgânicos), e que já estejam no seu formato final - o chamado “corpo verde” -, passam, como uma última etapa do processamento cerâmico, por um tratamento térmico em forno com o intuito de desenvolver uma microestrutura e propriedades condizentes com o que se deseja para o produto acabado. Este processo, denominado “sinterização”, ocorre em três etapas: (1) as reações iniciais, as quais incluem uma combustão orgânica completa e a eliminação de produtos gasosos da decomposição e da oxidação; (2) a chamada “consolidação” do produto, na qual, ao longo do material, as partículas se juntarão mais, formando um agregado, obtendo maior resistência mecânica; e (3) o resfriamento, até atingir a temperatura ambiente (REED, 1995).

2.4.5 – CERÂMICOS COMO PROTEÇÃO BALÍSTICA

Em aplicações militares, os materiais cerâmicos são utilizados como componentes de sistemas balísticos, com a finalidade de promoverem uma blindagem eficiente. Os fatos que motivam tal uso são as características que esse tipo de material possui, tais como uma elevada resistência à compressão dinâmica e dureza, mesmo para uma densidade pouco expressiva (LOURO; LINDFORS; MEYERS, 1988).

Os cerâmicos exibem um comportamento de choque peculiar, bem diferente do dos metais. As principais características que diferenciam as respostas dos cerâmicos das dos metais são aquelas nas quais as matrizes possuam, entre outras características: grande impedância de choque, apesar de sua baixa densidade; elevadas velocidades sônicas; um comportamento dútil muito limitado; acentuado limite elástico de Hugoniot sob compressão de choque; e uma baixa resistência ao estilhaçamento. À luz da abordagem na qual a fragmentação é devida a nucleação, crescimento e coalescimento das trincas, a extensão da fragmentação é de fato muito sensível à duração do pulso de tensão. A 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 (LOURO; MEYERS, 1989).

O impacto de um projétil sobre a superfície de uma placa cerâmica gera ondas de choque compressivas que se propagam através dessa placa. Assim que atingem a superfície livre, estas ondas de tensão são refletidas de volta como ondas de tração. O cerâmico irá fraturar se a magnitude da onda de tração refletida exceder a resistência de tração dinâmica do material. Devido ao impacto inicial, fendas radiais são formadas no fundo do material cerâmico, e viajam a partir desse fundo para o topo da placa cerâmica. Enquanto isso, um cone de fratura é formado na zona de impacto sobre a parte superior da pastilha cerâmica, crescendo para a sua face traseira. No caso de um sistema de blindagem compósita onde o cerâmico é suportado por um material dúctil ao fundo, 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. A espessura da camada de adesivo – caso haja um material desse tipo sendo usado para fixar o cerâmico ao material de apoio - também determina a percentagem de ondas de tensão que serão refletidas e transmitidas (KRISHNAN et al, 2010).

4.1.2 RELAÇÃO ENTRE MODOS DE FRATURAS E PRESENÇA DE ADIÇÕES

Quando os contornos de grãos são mais fracos do que o material do grão em si, a fratura provocada por impacto balístico é *intergranular*. A trajetória a ser percorrida pela trinca requer uma energia superior à requerida para propagação de uma falha *transgranular*. A presença de aditivos que seguem uma tendência de ficarem segregados nos contornos de grãos, fragilizando-os, provoca a fratura intergranular. (TRACY et al., 1986).

Foram avaliadas por Louro, Gomes e Costa (2001) composições de cerâmicos à base de Al_2O_3 com adições de magnésia (até 1,15% em peso), sílica (até 0,8% em peso) e nióbia (2% a 8% em peso), na condição de sinterização de 3h a 1400°C, comparando-as com uma amostra de referência, que é a alumina sem aditivos sinterizada a 1600°C em 1h. Os melhores resultados de proteção balística, com base na energia de impacto absorvida, foram obtidos pelas amostras contendo 4% de nióbia. A presença da nióbia também contribuiu para um incremento no tamanho

de grão da alumina. Resumindo, a maior absorção de energia ocorrida com as amostras com adição de 4% de nióbia está associada à predominância da fratura *intergranular* nos contornos de seus grãos (LOURO; GOMES; COSTA, 2001).

2.5 – O CONCEITO DE SINERGIA

Sinergia, um termo de origem grega (*synergía*), trata-se de um trabalho ou esforço para realizar uma determinada tarefa que tenha um certo nível de complexidade. Em última análise significa cooperação, e possibilita que diversos agentes ou esforços simples e individuais sejam agrupados de forma organizada para se atingir um determinado objetivo maior, ou para que se realize um certo empreendimento o qual não poderia ser cumprido com um número de agentes menor que o estipulado para tal. A sinergia é classicamente conhecida como a situação na qual “o todo é maior que a soma das partes” (Fonte: site Significados).

É interessante notar que a noção de sinergia não passa apenas pelo viés do ganho *quantitativo*, mas também pelo aspecto de uma supremacia *qualitativa*. O conjunto não é apenas “maior” que a soma de suas partes, mas também tem uma natureza tal que possibilite um trabalho específico, conceitualmente diferente da atividade que se poderia realizar com os constituintes em separado. No item seguinte dar-se-á sequência às ideias apresentadas neste tópico.

2.6 - BLINDAGEM MULTICAMADAS

Dando prosseguimento ao item anterior, busca-se neste estudo a *ação sinérgica* quantitativa e qualitativa dos materiais cerâmico, polimérico, fibroso e do alumínio, com os quais se pretende realizar um “trabalho de equipe” balístico. Trata-se de substâncias ou componentes que pertencem a diferentes Classes de Materiais (Metais e suas Ligas, Fibras Naturais, Polímeros e Cerâmicos) e cujas principais características já foram apresentadas anteriormente. Levando-se em conta o sentido do deslocamento do projétil após o disparo, ou seja, aproximando-se do alvo, os

diferentes tipos de materiais utilizados nos ensaios com plastilina foram montados nos dois seguintes tipos de sequência:

- a) 1ª classe de montagem das peças: (1) placa cerâmica, (2) camada intermediária (que pode ser a placa compósita resina-fibra, ou um conjunto de pedaços de tecido seco, ou até mesmo sem essa placa intermediária), (3) placa de alumínio e, por fim, a (4) plastilina, que irá mimetizar a consistência do corpo humano, conforme podemos ver no exemplo de estrutura da Fig. 04 (nesta figura há adicionalmente um nível de aramida à frente do cerâmico, com o intuito de apenas indicar uma possibilidade de variação para esse tipo de amostra); e
- b) 2ª classe de montagem das peças: (1) um nível de tecido de aramida, (2) placa cerâmica, (3) camada intermediária (que pode ser a placa compósita resina-fibra, placa feita 100% de resina, ou um bloco de tecidos de aramida), (4) um ou mais níveis de tecido de aramida ao fundo e, por fim, a (5) plastilina.

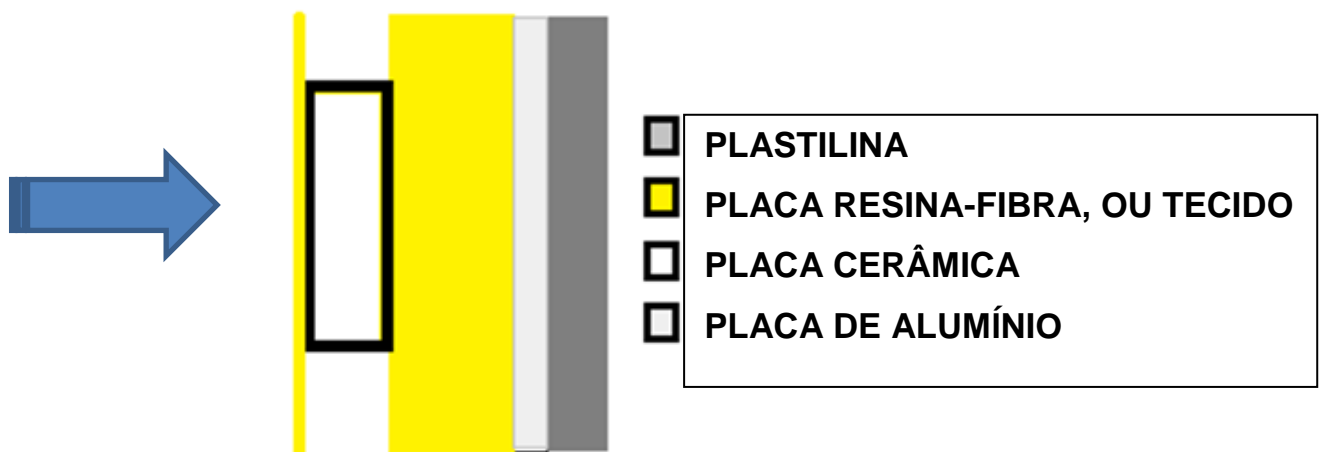


Figura 04 – Exemplo de estrutura de montagem da Blindagem Multicamadas (1ª classe)
(CHAGAS, 2014)

O material-base da camada mais à frente – e, assim, o primeiro a interagir de forma efetiva com o projétil - é o cerâmico, devido às suas excelentes propriedades de alta dureza, o que permite erodir e fragmentar o projétil, dissipando boa parte da

energia cinética inicial. A energia remanescente é então absorvida pelas camadas subsequentes.

Ainda explorando essa ideia, logo após a chegada do projétil na estrutura-blindagem, ocorrendo assim o processo da sua penetração, ele é erodido pelos fragmentos cerâmicos mantidos no alvo pelas placas posteriores e pelos efeitos de inércia. A penetração ao longo do material cerâmico fragmentado ocorre até ser alcançada a interface com a placa posterior, iniciando-se a etapa do movimento dos estilhaços do projétil e dos fragmentos cerâmicos de encontro a esta placa compósita ou à aramida, a qual é usada como o próximo nível de proteção. Essa placa posterior tem a função de suportar os fragmentos do cerâmico e do projétil, atuando como uma espécie de “camada retentora” dos estilhaços produzidos, a fim de produzir uma eficiente estrutura de blindagem balística (GOMES, 2004).

Prosseguindo na análise dos eventos de impacto, a terceira e última camada geral, que é a placa de alumínio ou o tecido de aramida, terá a função de absorver a parte final da energia cinética ainda existente, a qual provocará em sua estrutura uma deformação plástica, mas sem permitir em princípio que qualquer fragmento do projétil a atravesse completamente. Esse abaulamento do último nível será por fim transferido ao material seguinte, a plastilina, a qual sofrerá também um trauma. É o valor da maior profundidade dessa deformação permanente criada na plastilina que se constituirá num dos principais parâmetros para a caracterização da eficiência balística do sistema da Blindagem Multicamadas.

2.7 – COMPÓSITO FINAL: PASTILHA CERÂMICA SOBREPOSTA ÀS PLACAS COMPÓSITA, DE ALUMÍNIO E À ARAMIDA - E SUA APLICAÇÃO BALÍSTICA

Sistemas de blindagem cerâmica são concebidos levando em conta diversos fatores, que incluem basicamente as principais propriedades dos seus componentes. A natureza e a espessura dos materiais balísticos podem ter uma influência significativa sobre a propagação de trincas, devido às suas habilidades inerentes de reduzir a tensão dinâmica. Placas de cerâmica com uma espessura de 7 a 9 mm, ligadas com tecidos de, por exemplo, aramida, podem ser eficientes contra uma variedade razoável de projéteis; nestes casos, o número de camadas de tecido a ser

utilizado depende das exigências balísticas, do tipo de tecido e do desempenho da placa cerâmica. Em termos gerais, quanto mais fina a placa cerâmica, maior é o número de camadas de tecido de fibra necessário. Em muitos casos, projetos mais complicados que prevêm, por exemplo, a colocação de estruturas adicionais, posterior e anteriormente à pastilha cerâmica, usando-se diferentes materiais (por exemplo, alumínio mais aramida, ou outras combinações), aumentam o desempenho balístico. No entanto, essa diversidade de materiais pode diminuir a produtividade ao se implementar uma fabricação sistemática e, em consequência, aumentar o custo da blindagem. Em geral, os sistemas de proteção balística são projetados com base nos requisitos de desempenho, peso e capacidade de fabricação (MEDVEDOVSKI, 2006).

Nesta estrutura geral proposta para o compósito final, onde um de seus exemplos de montagem está ilustrada na Fig. 05, o objetivo é basicamente, como já mencionado anteriormente, usar a camada de cerâmico para deformar e estilhaçar o projétil, e usufruir das camadas seguintes (compósito resina-fibra, resina pura, conjunto de tecidos secos, placa de alumínio e aramida) para absorver a energia restante, aumentando a resistência à penetração da blindagem como um todo. Verificou-se que os níveis de energia absorvida no impacto aumentam com a taxa de carregamento, bem como se tornou interessante constatar que o rompimento da fibra, com um caráter cada vez menos frágil, causa um aumento na capacidade de se absorver energia à medida que a taxa de carregamento aumenta (TASDEMIRCI; HALL, 2009).

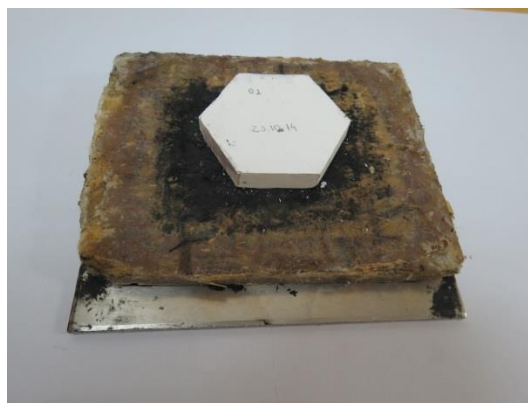


Figura 05 – Estrutura típica do compósito final da 1ª classe de montagem

O compósito tem um papel fundamental no comportamento final da blindagem, tanto do ponto de vista da fibra como da resina, e também do tipo de fibra utilizado (seja em estado natural ou em tecido). A definição de uma específica composição volumétrica da fibra, o uso de agentes endurecedores com a resina, assim como uma conseqüente implementação de um gradiente de rigidez no laminado, influenciam diretamente no dano observado na estrutura de proteção após os ensaios (AJDELSZTAJN; BASTIAN, 1999).

2.8 - COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS MATERIAIS E CONSIDERAÇÕES SOBRE A EFICIÊNCIA BALÍSTICA

A resposta dinâmica é um quesito de projeto importante em aplicações militares como mísseis, armamentos e blindagens, e algumas aplicações civis como sismologia e mineração. A taxa de deformação nas condições de impacto pode atingir valores localizados de $10^3/s$ ou até mais, difíceis de serem obtidos através de ensaios convencionais em laboratório-padrão. Alguns poucos dispositivos são capazes de atingir este valor com reprodutibilidade e confiabilidade, sendo os mais indicados os de impacto unidimensional (CARDOSO, 2005). Porém, a fim de se avaliar a eficiência balística de estruturas compósitas, os testes de tiro real são ainda a melhor técnica de ensaio para promover-se uma grande proximidade com a realidade, mantendo-se o estande de tiro ainda como o melhor laboratório para este tipo de estudo tecnológico.

A compreensão do comportamento de estruturas compósitas submetidas a impacto delinea um campo importante, mas constitui-se ao mesmo tempo em um complexo problema. Isto ocorre devido principalmente à dependência de um grande número de fatores, tais como o comportamento mecânico de cada material constituinte, os mecanismos de falha envolvidos, os princípios de transferência de carga, entre outros, que estão muitas vezes associados com numerosas incertezas, tornando-os complexos. Em virtude disso, a previsão acurada do comportamento balístico leva a um problema que ficará por um bom tempo em aberto, onde as investigações são realizadas de maneiras diferentes, desde modelos empíricos simples até as técnicas numéricas extremamente sofisticadas. Os modelos

analíticos que muitos pesquisadores já desenvolveram são na verdade ainda bastante dependentes de dados experimentais (MOHAN; VELU, 2014).

À medida em que se afasta do ponto de impacto, o pico de tensão surgido na colisão diminui ao longo das direções radiais de afastamento. Isto é um reflexo do fenômeno da atenuação das ondas de tensão, a qual é causada por múltiplas reflexões de ondas no material, e também pelas transmissões dessa energia em várias interfaces ao longo do caminho de propagação. Estudos experimentais já foram realizados sobre a atenuação de ondas de tensão durante o impacto balístico para alguns tipos de compósitos de matriz polimérica, e uma das conclusões a partir desses experimentos é a de que, à medida que onda de tensão se propaga para longe do ponto de impacto, a atenuação dessas ondas citada acima leva à redução também dos valores máximos de deformação obtidos (PANDYA et al, 2012).

Abordando mais especificamente a alumina, que é o material cerâmico base do nosso estudo, já foi verificado que a sua fragmentação é muito sensível a diversos fatores, tais como: pressão, estado de tensão, duração do impulso, parâmetros da microestrutura, tamanho de grão e nível de pureza. É válido enfatizar também que uma expressiva fragmentação já foi obtida por tensões de compressão consideravelmente mais baixas do que o limite elástico de Hugoniot (LOURO; LINDFORS; MEYERS, 1988).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ASPECTOS GERAIS

A fabricação dos corpos de prova de materiais cerâmicos consiste na mistura do pó de alumina com um ligante e um aditivo de sinterização em um moinho de bolas. Após secagem em estufa, o pó é macerado, peneirado e, então, submetido à prensagem uniaxial, originando os corpos verdes que são sinterizados em fornos do IME destinados a isso.

A fabricação dos corpos de prova de compósito (rami-epóxi, aramida-epóxi e epóxi puro) consiste na prensagem em matriz metálica apropriada dos materiais envolvidos, de forma a se obter, com exceção da placa de resina pura, uma fração de *30% em volume de fibra* em todas as amostras confeccionadas.

A pastilha (placa) cerâmica é uma peça fundamental para a eficiência da blindagem balística. Por este motivo, ela é o único item que se faz presente nos diferentes CPs testados nos ensaios sobre a plastilina. Sem o componente cerâmico, os tiros provocariam a perfuração completa dos CPs em todas as combinações possíveis, dada a sua característica de elevada dureza e resistência à compressão.

Como item tão essencial na estrutura, é importante que algumas de suas propriedades sejam medidas, de forma a se reunir o maior número possível de informações sobre esse material cujas aplicações balísticas são tão notórias. Nos itens do Capítulo 4 (Resultados e Discussões) serão fornecidos os resultados obtidos para os seguintes ensaios ou testes: Difração de Raio-X, Microdureza, levantamento de Propriedades Elásticas e determinação do Tamanho Médio de Grão. Apenas este último será realizado com material cerâmico advindo de ensaios balísticos, ou seja, fraturado dinamicamente, de modo intergranular. Para as propriedades elásticas serão também lançados os resultados encontrados para a placa de alumínio.

3.2 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 ALUMINA E NIÓBIA

As tabelas 2 e 3 apresentam as análises químicas da alumina e da nióbia utilizadas, conforme informação dos fornecedores.

Tabela 2 - Análise química da alumina

ELEMENTO	ANÁLISE	ESPECIFICAÇÃO
Al ₂ O ₃ (%)	99,4	min. 99,1
SiO ₂ (%)	0,04	max. 0,06
Fe ₂ O ₃ (%)	0,04	max. 0,06
Na ₂ O (%)	0,11	max. 0,15
umidade a 300° C (%)	0,2	max. 0,5

Tabela 3 - Análise química da nióbia HP

ELEMENTO	ANÁLISE
Nb ₂ O ₅ (%)	99,5
Ta (ppm)	745
Ti (ppm)	240
Fe (ppm)	136
Si (ppm)	66
Sn (ppm)	95

3.2.2 – FIBRA DE RAMI EM ESTADO NATURAL

Há um grupo pouco conhecido de fibras lignocelulósicas, dentre as quais algumas destas são típicas de regiões tropicais do planeta. Exemplos dessas fibras que são usadas como reforço de compósitos poliméricos são, no nosso país, o rami, a piaçava, o curauá e a bucha. A fibra de rami em estado natural (Fig. 06), em especial, tem como uma de suas vantagens a elevada resistência à tração, que pode alcançar quase 900 MPa, o que é superior até aos valores encontrados na literatura para outras fibras importantes, como o sisal e a juta. Outra característica interessante do rami é a sua cristalinidade. Em outros estudos já se verificou que compósitos poliméricos com fibras de rami podem sim ser usados para fabricar componentes estruturais, os quais acabam por apresentar desempenho da mesma ordem de grandeza que outras fibras naturais consagradas (MARGEM; NETO;

MONTEIRO, 2010). É possível avaliar a morfologia da fibra de rami em estado natural em escalas aumentadas pelo MEV (Fig. 07).

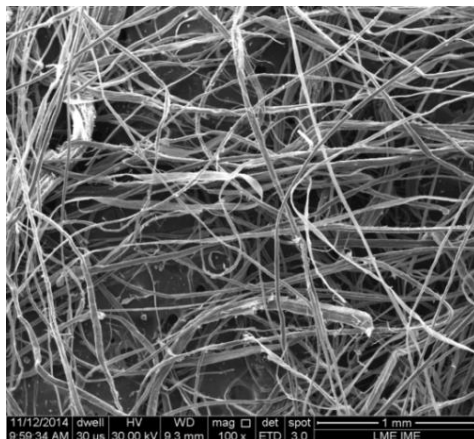


(a)

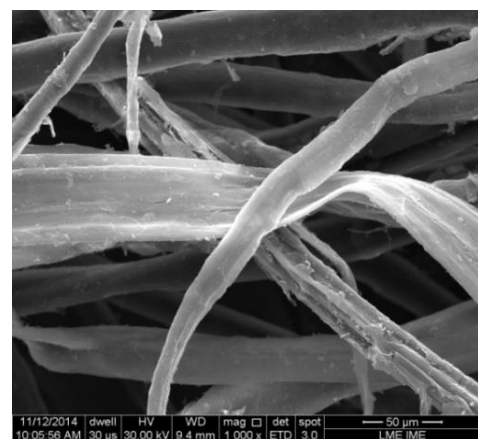


(b)

Figura 06 (a,b) – Fibra de rami em estado bruto, como fornecido



(a)



(b)

Figura 07 (a,b) – Estrutura da fibra bruta de rami

3.2.3 – RAMI EM TECIDO

Após a realização de uma pesquisa de mercado pela internet e através de diversos contatos telefônicos no país, constatou-se que não há atualmente no Brasil a comercialização de tecidos feitos 100% com a fibra natural de rami, o que motivou a aquisição do tecido em questão no exterior, tendo sido por fim encontrado um fornecedor na China - a empresa *Rose Natural Healthy Items Wholesale* -, a qual viabilizou a aquisição do tecido de rami por meio de um fabricante localizado na cidade chinesa de Guangzhou.

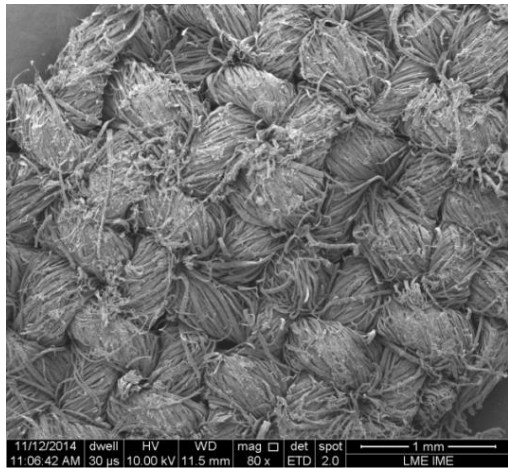
Dados do tecido de rami adquirido (Fig. 08), segundo o fornecedor chinês:

- a) Tipo de tecido: canvas;
- b) Técnica de fabricação: *woven* (entremeado de forma alternada e em duas direções ortogonais entre si);
- c) Material: 100% Rami;
- d) Tipo de produto: Tecido orgânico;
- e) Padrão: Pigmentado;
- f) Usos mais comuns: cortinas, sofás, fronhas, etc;
- g) Densidade superficial: 245 g/m²;
- h) Espessura média: não informada;
- i) Características: Não totalmente fechado (possui pequenos interstícios de vazios), *eco-friendly*, natural, não prejudicial à saúde; e
- j) *Thread Count* (contagem para a fiação): 8 x 8.



Figura 08 – (a) Amostras coloridas de tecido de rami (Fonte: fornecedor); (b) tecido importado, como recebido no IME.

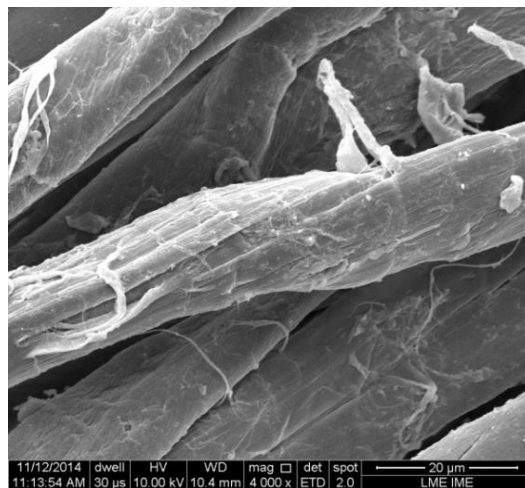
O tecido de rami revela um tecimento entremeado, e uma estrutura na qual os fios, em cada uma das direções ortogonais principais, ficam bem unidos e paralelos entre si (Fig. 09).



(a)



(b)



(c)

Figura 09 (a,b,c) - Estrutura do tecido de rami como recebido

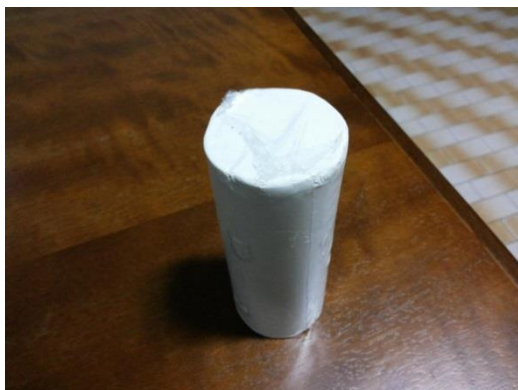
3.2.4 - RESINA EPÓXI

O polímero a ser utilizado como o material da matriz da placa compósita a ser confeccionada é a resina epóxi comercial do tipo éter diglicidílico do bisfenol A (DGEBA), endurecida com trietileno tetramina (TETA), utilizando-se a proporção estequiométrica de 13 partes de endurecedor para 100 partes de resina. A utilização de uma placa feita de rami e epóxi, com *30% em volume da fibra*, ocorre neste trabalho motivada, entre outros fatores, por existir excelentes resultados nos valores de tenacidade ao impacto com este tipo de compósito, quando comparado com outros tipos de conjugados resina-fibra (MONTEIRO; MARGEM; SANTOS Jr, 2009).

Neste texto, a partir deste ponto, toda vez que o termo “epóxi” for citado como um dos elementos presentes nas peças dos corpos-de-prova, ele estará na verdade se referindo à mistura já curada de epóxi com endurecedor, na proporção citada acima.

3.2.5 – PLASTILINA

Trata-se da Massa para Modelar CORFIX®, não tóxica, não ressecante, inodora, cor “branco 301”, referência do fabricante: 60510, densidade aproximada de 1,7g/cm³, e adquirido pelo CAEx em caixas unitárias de 500g de massa líquida (Fig. 10). O fabricante é a Indústria de Tintas CORFIX LTDA (www.corfix.com.br), localizada em Porto Alegre-RS. Composição básica (segundo descrição na embalagem do produto): parafina, ceras, carga mineral e pigmentos atóxicos. Trata-se do material que é usualmente adquirido e usado pelo CAEx, com base na Norma NIJ 0101.04, para as suas atividades de avaliação do comportamento balístico, promovendo a simulação da proteção pessoal (individual) ao possibilitar a obtenção de uma estrutura que possua uma consistência média similar à do corpo humano.



(a)



(b)

Figura 10 – (a) Bastão de plastilina novo, conforme fornecido; (b) Armação do suporte de tiro totalmente preenchido com a plastilina, pronto para o ensaio (CAEx).

3.2.6 – ALUMÍNIO

O alumínio estará presente neste estudo através do uso de uma placa quadrada composta por este metal, onde cada lado medirá aproximadamente 15 cm, com

espessura de 5 mm. As suas principais características são dadas na Tabela 4, conforme os resultados encontrados por Chagas (2014).

Tabela 4 – Especificações do alumínio (CHAGAS, 2014)

MATERIAL	DENSIDADE	MÓDULO DE ELASTICIDADE	MÓDULO DE CISALHAMENTO	DUREZA VICKERS
ALUMÍNIO T 6061	2,7 g/cm ³	68 GPa	25 GPa	15

3.2.7 - ADESIVO ULTRA FLEX

Para promover a união entre os componentes dos corpos-de-prova, foi utilizado o adesivo ULTRA FLEX (Fig. 11). O **Ultra Flex Cura Rápida Adesivo de Poliuretano** é um adesivo elástico à base de poliuretano monocomponente, de alta viscosidade, para diversas aplicações de colagem e de vedação, com propriedade de não escorrimento (*non-sag*), e que cura ao entrar em contato com a umidade ambiente, formando um elastômero de alta resistência. De tecnologia totalmente nacional, o **Ultra Flex Cura Rápida Adesivo de Poliuretano** é utilizado em diversas áreas, tais como a indústria automobilística, naval, blindagens, etc, equiparando-se aos similares importados. O Apêndice 1 apresenta a Ficha de Dados Técnicos emitido pelo fornecedor, contendo as principais propriedades desse adesivo.



Figura 11 – Tubo comercial do adesivo Ultra Flex

3.2.8 – ARAMIDA

A aramida (Kevlar) é um tecido feito de fibra sintética e que possui excelentes propriedades mecânicas, inclusive uma alta resistência à tração. Este tipo de material tem sido utilizado com frequência e de forma consagrada ao redor do mundo em estruturas que tenham a finalidade de proteção balística. A Tab. 5 apresenta as propriedades da aramida utilizada neste trabalho.

Tabela 5 - Propriedades da aramida (CHAGAS, 2014)

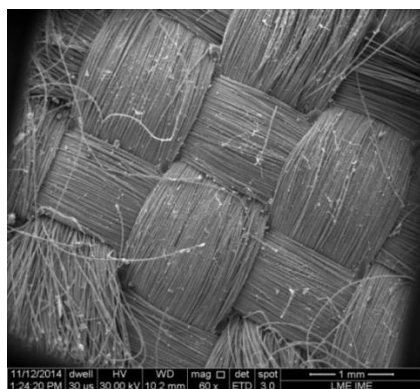
ESTILO S745 Greige	UNIDADE	DESCRIÇÃO	ESPECIFICAÇÃO
PROPRIEDADES DO FIO			
Tipo do fio	-----	Fio de Aramida	Kevlar® 29
Título do fio	denier	Massa em gramas para 9000 m de fio	3000
PROPRIEDADES DO TECIDO			
Tipo de tecimento	-----	-----	Plana
Densidade (Urdume e Trama)	epi	Quantidade de fios por polegada linear	16 – 18
Gramatura seca	g/m ²	Gramatura do tecido depois de seco por 4 horas a 105°C	413 – 465
Espessura	mm	Espessura do tecido	0,53 – 0,64

Legenda:

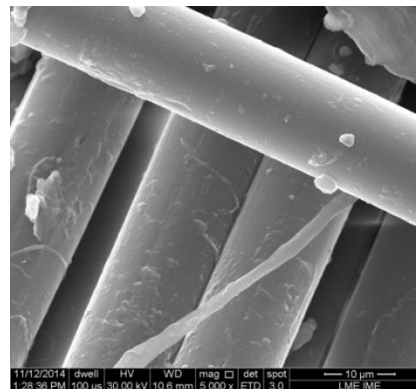
Greige = Loom State = Tecido Cru (sem tratamento).

epi = ends per inch = fios por polegada linear.

Vê-se duas imagens do MEV dessa fibra sintética no estado como fornecida (Fig. 12), em escalas diferentes, que ressaltam a sua morfologia.



(a)



(b)

Figura 12 (a,b) - Aramida como fornecida, analisada no MEV.

3.3 OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS DE CERÂMICOS

3.3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A fabricação das amostras de cerâmicos consiste na mistura do pó de alumina com um ligante e um aditivo de sinterização em um moinho de bolas de alumina, MARCONI modelo MA 500 (Fig. 13). Após secagem em estufa, o pó foi macerado, peneirado e, então, submetido à prensagem uniaxial, originando os corpos verdes que foram sinterizados no forno INTI, modelo FE 1700 (Fig. 14).



Figura 13 – (a) Moinho de bolas Marconi modelo MA 500 aberto; (b) em posição de funcionamento (IME)



Figura 14 - Forno INTI modelo FE 1700 (IME)

Foi utilizado pó de alumina produzido pela empresa nacional Treibacher Scheifmittel, fabricado de maneira similar à da alumina APC-2011SG da marca Alcoa, com tamanho médio de partícula de $3\mu\text{m}$. O aditivo de sinterização foi a nióbia HP da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM). O

polietileno glicol (PEG) de massa molar 400 da VETEC atuou como o ligante. A composição utilizada neste trabalho foi de 94,53% de alumina, 3,94% de nióbia e 1,53% de PEG.

De forma resumida, houve que, após a fase do moinho de bolas e com sua posterior secagem no forno, o material presente na travessa de vidro (Alumina APC-2011SG + Nióbia + PEG) foi macerado e peneirado em peneira de malha 0,355 mm (MESH 42). Em seguida, os pós resultantes foram prensados a 35 MPa. As amostras a verde foram sinterizadas a 1400° C por 3 horas.

3.3.2 OBTENÇÃO DO PÓ

Para a obtenção do pó das amostras, os componentes envolvidos (alumina e nióbia) e o PEG foram pesados em uma balança digital, GEHAKA modelo BK 300, com precisão de 0,001g. Posteriormente, os três componentes foram misturados e moídos em água no moinho de bola de alumina por 8 horas. As quantidades utilizadas na moagem foram as seguintes:

- 1400 g de Al_2O_3
- 58,3 g de Nb_2O_5
- 22,6 g de PEG
- 1500 g de água
- 1300 g de bolas de alumina

Ao final desse processo, o pó foi colocado na estufa ELKA para secagem a uma temperatura de 80° C. O pó seco foi macerado manualmente e peneirado em uma peneira com abertura de 0,355 mm (Fig. 15), a qual foi colocada em um agitador de peneiras marca +GF+ tipo PSA (Fig. 16) por 15 minutos. O material passante neste procedimento de peneira foi então armazenado, objetivando-se a etapa seguinte.



Figura 15 – Peneira e seu suporte (IME)



Figura 16 - Agitador de peneiras (IME)

3.3.3 PRENSAGEM DO MATERIAL VERDE

A prensagem para a obtenção da peça a verde foi realizada em matrizes hexagonais planas (Fig. 17), com um valor de massa de pó, para cada pastilha, de $100 \pm 0,01$ g, de modo que a peça final após a sinterização tivesse uma espessura de $10,4 \pm 0,4$ mm. A prensagem foi uniaxial, usando o método dos dois punções móveis e da camisa flutuante, através de uma prensa hidráulica 30 ton SKAY (Fig. 18). A pressão de compactação a verde obtida de 35 MPa, pois a força limite utilizada na prensagem era de 12 ton.



Figura 17 - Matriz de compactação (IME)



Figura 18 - Prensa hidráulica 30 ton SKAY (IME)

3.3.4 EVAPORAÇÃO DO LIGANTE

Trindade, Gomes e Louro (2013) elaboraram uma nova rota de eliminação do PEG do corpo verde, na qual a temperatura varia de 25° a 375° C, tendo-se nesse

processo um patamar em 158° C (Fig. 19). No método anterior a esse, a evaporação do ligante era feita entre as temperaturas de 25° a 500° C, com uma taxa de 1° C/min e com um patamar de uma hora na temperatura final, o que se mostrou não mais necessário, pois foi verificado que a retirada do ligante e da água ocorre em uma temperatura inferior a 373° C. A nova taxa de aquecimento escolhida por eles foi de 0,5° C/min, pois o tempo de exposição a uma determinada temperatura e a celeridade de aquecimento também exercem um efeito considerável na estabilidade térmica dos polímeros, dado que este tipo de material em geral tem baixa condutividade térmica.

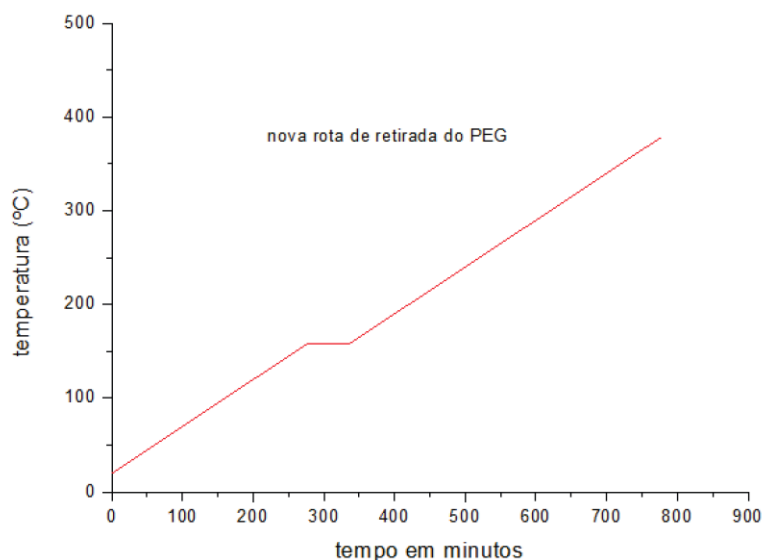


Figura 19 – Nova rota utilizada para a retirada do PEG (TRINDADE; GOMES; LOURO, 2013)

Pela nova rota, o tamanho médio dos poros foi menor do que na antiga, porém as densidades não sofreram alteração significativa em termos estatísticos. Sendo assim, a nova rota promoveu um aumento na quantidade de poros menores por unidade de volume, o que pode ser explicado pela diminuição da pressão de saída dos gases ocasionada pelo patamar de temperatura mais baixo do novo procedimento. Pode-se concluir adicionalmente que a velocidade de aquecimento empregada no processo é também um quesito importante. Embora tenha sido empregado um tempo maior, os resultados da nova rota indicam que ela é mais eficiente do que a antiga, possibilitando uma melhor densificação na sinterização, já

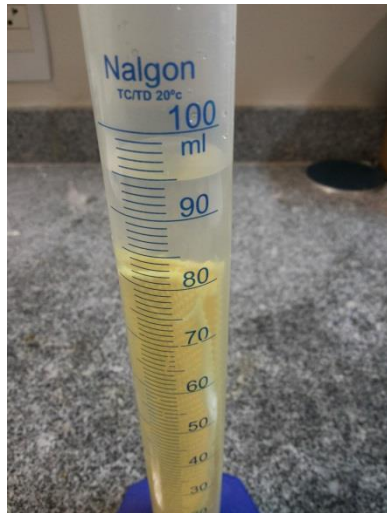
que se obteve um menor diâmetro médio de poros (TRINDADE; GOMES; LOURO, 2013).

3.3.5 SINTERIZAÇÃO

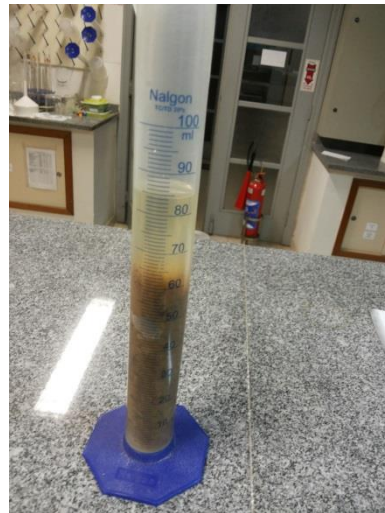
As sinterizações foram feitas no forno INTI do Laboratório de Cerâmicas do IME. O controle de temperatura foi feito por meio de programadores acoplados aos fornos. Ao final do processo, o resfriamento se deu a uma taxa de 3° C/min até a temperatura de 700° C, ponto a partir do qual o forno foi desligado e as amostras resfriaram dentro do próprio forno.

3.4 TÉCNICA DE CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS E TECIDOS

O rami, tanto em tecido quanto em fibra bruta, e a aramida (Kevlar) foram caracterizados em laboratório através do valor de suas densidades. O procedimento para a obtenção dessa magnitude foi bastante simples: uma quantidade específica de fibra foi cortada e esfacelada em pedaços de pequenas proporções. Essa porção de material era pesada e sua massa era registrada (m); depois disso, uma proveta graduada era preenchida com água até um nível exato de volume V_1 , com um valor discreto. Em seguida, a porção de material fibroso, cuja massa já era conhecida, era lançada dentro da proveta, até que todos os pedaços estivessem totalmente submersos (Fig. 20). Deixava-se então passar um tempo para que o líquido pudesse impregnar bem as fibras ao máximo e, após isso, fazia-se a leitura do novo volume V_2 , que era agora o volume ocupado dentro da proveta pelo conjunto água-fibra. Com isso, depreendia-se que a diferença entre os volumes observados ($V_2 - V_1$) era exatamente o volume do material sólido adicionado (rami ou aramida). Dividindo-se a massa (m) pelo volume ($V_2 - V_1$), obteve-se o valor da densidade da fibra.



(a)



(b)

Figura 20 – Proveta graduada com a fibra submersa de (a) aramida e (b) rami bruto.

Para cada tipo de fibra, foram realizadas 05 (cinco) medições, com diferentes valores de massa, e o valor médio encontrado para cada caso está expresso na Tab. 6. Estes valores foram usados para a determinação da massa de fibra que era utilizada na confecção das placas compósitas, considerando-se que 30% do volume interno da matriz teve que ser preenchido pelas fibras.

Tabela 6 – Densidades das fibras medidas em laboratório

Tipo de Fibra/Tecido	Densidade média (g/cm³)
Fibra de Rami (manta)	1,05
Tecido de Rami	1,30
Aramida (Kevlar)	1,32

3.5 OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS DE COMPÓSITO FIBRA-EPÓXI

Foram acondicionados no espaço interno da matriz de aço (Fig. 21a-b) a resina epóxi e a fibra em questão (rami natural, rami em tecido ou aramida). Para cada um desses três tipos de fibra, houve a porcentagem *em volume da fibra de 30%*, gerando assim três tipos diferentes de amostras para os ensaios balísticos que utilizaram os compósitos resina-fibra.

As dimensões do espaço interno da matriz são de 10 x 120 x 150 mm, o que gerou um volume final para a placa confeccionada de 180,00 cm³. No caso do rami natural, as fibras foram mantidas alinhadas ao longo da dimensão de 150 mm. Sendo previsto 30% desse espaço para as fibras, estas tiveram, considerando-se o valor de suas densidades, uma quantidade de massa introduzida no molde de maneira que elas ocuparam um volume de 54,00 cm³. Após o acondicionamento dos componentes no interior da matriz metálica, procedeu-se ao seu fechamento, onde o conjunto foi curado sob prensagem à temperatura ambiente por um período mínimo de 24 horas. O valor da pressão utilizada sobre a tampa no processo era específico para cada um dos três tipos de fibra, pois o parâmetro a ser alcançado não era a pressão em si, mas sim que, com a aplicação da carga, a tampa afundasse no interior do espaço da matriz de 2 a 3 mm, objetivando-se que a espessura final da peça produzida fosse de 10 mm. Ao final do procedimento, foram obtidos os compósitos pretendidos, que ficaram conforme exposto na Fig. 21(c).



(a) (b) (c)
Figura 21 – (a) Peças da matriz separadas; (b) indicação do modo de encaixe das peças; (c) exemplo de placa compósita obtida pela prensagem.

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. Por outro lado, os tecidos têxteis em geral que reforçam os compósitos polímero-fibra, os quais possuem geralmente a orientação de “fibras entremeadas ortogonais”, proporcionam um desempenho mecânico ainda melhor do que as fibras contínuas e alinhadas (ZHOU et al, 2014).

3.6 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL CERÂMICO

3.6.1 ENSAIO DE MICRODUREZA

A dureza pode ser descrita como a resistência ao desgaste, à abrasão, ao corte, à usinagem e ainda, ao risco; em última instância, ela é a medida da resistência à penetração de um indentador mais duro. Como o seu valor é função do método de ensaio utilizado, ela não é uma propriedade fundamental do material analisado (ASKELAND; PHULÉ, 2008).

A microdureza é definida por um valor (“pressão de indentação”), que pode ser obtido pela razão entre a carga de indentação aplicada e a área da impressão residual na superfície da amostra, a qual foi calculada por um microdurômetro digital existente no IME.

A metodologia empregada para determinação dos valores de dureza das amostras obedeceu à norma ASTM C 1327-03, que fornece o método de ensaio padrão para obtenção de dureza Vickers em cerâmicas avançadas.

3.6.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Não apenas os cerâmicos, mas as peças que compuseram os corpos-de-prova de uma forma geral que sofreram fratura dinâmica nos ensaios balísticos, tiveram as suas superfícies de rompimento analisadas pelo MEV do IME, quando então foram feitas as micrografias dessas superfícies. Foram utilizados aumentos de imagem os mais diversos, desde 100 até 30.000 vezes.

Nessa análise em MEV das amostras fraturadas, buscou-se associar o comportamento balístico à microestrutura encontrada e à influência dos diferentes materiais utilizados.

3.6.3 AVALIAÇÃO POR ULTRASSOM

Qualquer onda de som com uma frequência superior a 20 kHz é denominada de “ultrassom”. Ele tem um comprimento de onda muito mais curto - apesar dele se comportar de modo similar ao som audível - e, portanto, pode ser refletido a partir de

superfícies muito pequenas, tais como defeitos no interior dos materiais, tornando-o adequado quando se prioriza a execução de testes não destrutivos (CHAGAS, 2014).

Para a determinação das velocidades das ondas elásticas e cisalhantes, medidas dessas celeridades nas amostras cerâmicas foram realizadas no CEPEL, utilizando-se de sensores de ondas elásticas (C_L) e cisalhantes (C_S), e também de um osciloscópio para detectar o sinal refletido pela superfície oposta da amostra. C_L e C_S são denominações também utilizadas para os valores das velocidades da onda longitudinal e transversal, respectivamente. A partir da distância entre as superfícies e do tempo entre o sinal enviado e recebido, obteve-se as velocidades das ondas no material. Sabe-se que as trincas viajam a uma velocidade limite, a qual é dada pelas ondas elásticas superficiais de Rayleigh (C_R), também conhecida por “velocidade das ondas de superfície de Rayleigh”, ao passo que a máxima velocidade de ondas em um material é dada pelas ondas elásticas longitudinais. A partir de C_L e C_S , obteve-se C_R e também as seguintes propriedades elásticas dos materiais: o módulo de cisalhamento (G), a constante de Lamé (λ), o módulo de elasticidade (E), o coeficiente de Poisson (ν) e a velocidade das ondas elásticas longitudinais unidimensionais (C_o), através da utilização das seguintes equações (MEYERS, 1994 e GOMES, 2004):

$$C_L = ((\lambda + 2G) / \rho)^{1/2} \quad \text{Eq. 01}$$

$$C_S = (G / \rho)^{1/2} \quad \text{Eq. 02}$$

$$C_R = ((0,862 + 1,14 \nu) / (1 + \nu)) C_S \quad \text{Eq. 03}$$

$$C_o = (E / \rho)^{1/2} \quad \text{Eq. 04}$$

$$G = E / (2(1 + \nu)) \quad \text{Eq. 05}$$

$$\lambda = \nu E / ((1 + \nu)(1 - 2\nu)) \quad \text{Eq. 06}$$

Com o apoio do CEPEL, realizou-se medições das velocidades de onda longitudinais (C_L) e transversais (C_S) tanto nas pastilhas cerâmicas quanto nas placas de alumínio. O aparelho utilizado foi o Medidor por ultrassom da General

Eletric, modelo DMS2. Foram também realizadas tentativas de medição desses parâmetros nos outros componentes do sistema da blindagem multicamada, tais como a aramida e as placas compósitas fibra-resina, mas os equipamentos utilizados não conseguiram fornecer nenhum valor válido para esses materiais. Uma explicação para isso foi a excessiva porosidade, heterogeneidade e presença de descontinuidades que são característicos dos materiais poliméricos e fibrosos.

Além das fórmulas apresentadas acima, utilizou-se também uma outra equação, derivada a partir delas, de forma a possibilitar a obtenção do coeficiente de Poisson a partir do módulo de cisalhamento e da constante de Lamé, conforme a seguir:

$$\nu = \lambda / (2(G + \lambda)) \quad \text{Eq. 07}$$

3.6.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

A difração de raios X (DRX) consiste numa técnica executada através de um ensaio não destrutivo. Na atualidade, ela possibilita a determinação precisa de estruturas cristalinas e fases presentes. É a lei de Bragg que orienta a técnica de DRX para amostras em forma de pó ou de sólidos policristalinos, a qual é conhecida também como difratometria $\theta - 2\theta$ (CHAGAS, 2014).

O ensaio por difração de raios X (DRX) da cerâmica foi realizado em um difratômetro de raios X do IME, com geometria parafocal Bragg-Bretano, empregando-se a técnica de rotação θ - 2θ . A fonte utilizada é o Cobre ($\lambda_{Cu K\alpha_1} = 1,549060 \text{ \AA}$, voltagem de 40 KV e corrente de 40 mA). A varredura em 2θ foi executada com passo de $0,0492^\circ$ no intervalo angular de $9,9870^\circ$ a $89,9997^\circ$ nos espectros equatoriais.

3.7 ENSAIOS BALÍSTICOS

3.7.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

De início, vale frisar que de fato não é muito difícil encontrar na literatura resultados para ensaios balísticos. Contudo, fazer comparação entre esses

resultados pode às vezes tornar-se uma tarefa árdua. Itens como técnicas de confecção dos materiais envolvidos, descrição qualitativa e quantitativa dos compósitos utilizados, tipos de munições, condições dos ensaios, etc, são parâmetros comumente divergentes. Portanto, fica difícil, por vezes, encontrar resultados que sejam pragmaticamente comparáveis (WESTIN, 2011).

Os ensaios balísticos visam à verificação da capacidade ou poder de absorção de energia cinética de um corpo ou objeto. Tais testes, nesta Dissertação, foram feitos para avaliar o comportamento balístico tanto com perfuração total (sem material de apoio ao fundo), quanto sem perfuração total em corpos-de-prova que tiveram em sua parte posterior um material de apoio (plastilina ao fundo). Com isso, foram realizados ensaios para a determinação da energia cinética absorvida (sem material de apoio), e também ensaios para a avaliação do nível da proteção balística alcançada, através da análise da deformação plástica provocada na plastilina, devido ao ensaio realizado.

As condições gerais dos ensaios foram:

- a) Munição: calibre 7,62 mm M1 (comum), conforme fornecida comercialmente ao Exército; o projétil (sua ponta) apresenta uma massa de valor médio igual a 9,33 gramas (Fig. 22);



(a)



(b)

Figura 22 – (a) A munição 7,62 mm e seu projétil voador; (b) Visão detalhada do projétil.

- b) Distância ao alvo (distância da boca da arma até o ponto de contato com o material a ser atingido): 15 metros, conforme prevê a norma ABNT NBR 15000 para as munições 7,62 mm;
- c) Ângulo de incidência no alvo: ortogonal; e

d) 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 mm (Fig. 23), um sistema radar (fig. 24) e um dispositivo de fixação do alvo.

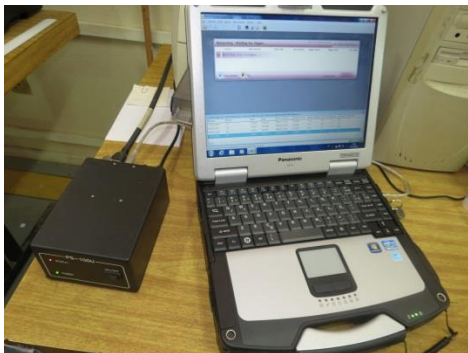


(a)



(b)

Figura 23 - (a) Provete calibre 7,62 mm com mira laser: visão traseira; (b) Visão em perspectiva.



(a)



(b)

Figura 24 – Sistema Radar Doppler: (a) computador dotado de programa de processamento; (b) fonte emissora dos pulsos.

Os critérios de penetração denominados “Critério do Exército”, “Critério da Marinha” e “Critério de Proteção” (ZUKAS et al., 1982) são os três que podem ser adotados para a definição de uma perfuração, conforme ilustrado na Fig. 25.

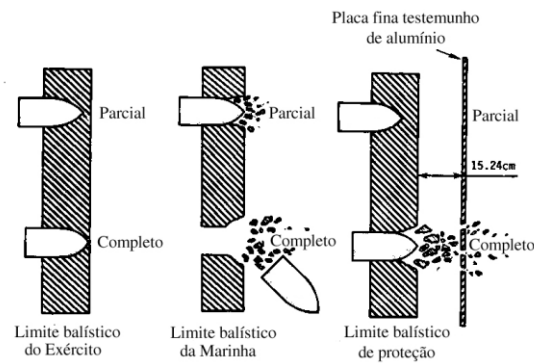


Figura 25 - Critérios de penetração (ZUKAS et al., 1982).

O critério adotado neste texto para a ocorrência de “perfuração” considera a passagem da luz através do orifício ocasionado pelo impacto do projétil, ou quando a ponta do mesmo torna-se visível, aparecendo na parte posterior da blindagem. Ademais, o tipo de trauma gerado na plastilina em caso de perfuração é característico e facilmente identificável (CHAGAS, 2014).

3.7.2 - IDENTIFICAÇÃO DAS PEÇAS CONSTITUINTES DOS CPs

a) PLACA DE ALUMÍNIO

Utilizou-se uma placa quadrada de alumínio (Al T6061) onde cada lado mede aproximadamente 15 cm, com espessura de 5 mm (Fig. 26). Algumas de suas propriedades já foram descritas na Tabela 4. O valor médio de sua massa é de 304,20 g, e a abreviatura usada neste texto a partir de agora para identificar esta peça será “AI”.

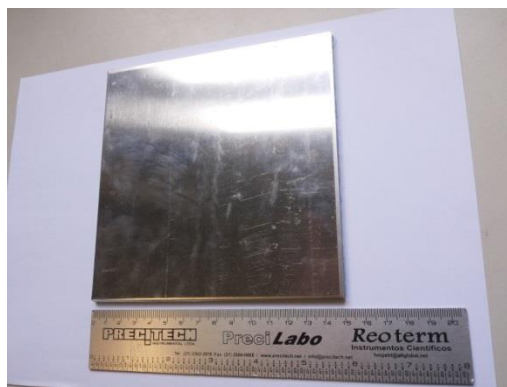


Figura 26 – Placa de Alumínio

b) PASTILHA CERÂMICA

Utilizou-se uma placa cerâmica composta de 96% de Al_2O_3 e de 4% de Nb_2O_5 . Possui tom esbranquiçado e um formato cilíndrico de seção reta hexagonal regular, cujas dimensões médias são 33 mm para o lado do hexágono e 10,5 mm para a altura (Fig. 27). Foi confeccionado conforme os procedimentos descritos no item “Materiais e Métodos”. O valor médio de sua massa é de 97,70 g, e a abreviatura usada neste texto a partir de agora para identificar esta peça será “**Cer**”.

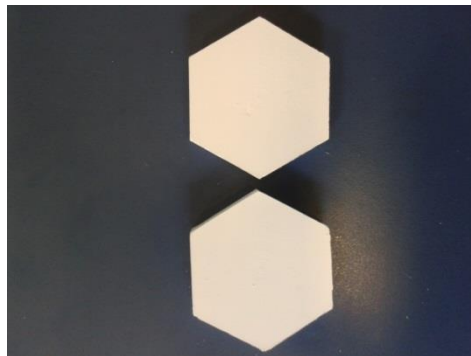


Figura 27 – Pastilha cerâmica

c) PLACA COMPÓSITA RESINA-TECIDO DE RAMI

Preparou-se uma placa compósita formada basicamente por dois materiais distintos: resina epóxi solidificada e pedaços sobrepostos de tecido manufaturado a partir da fibra de rami - tecido 100% rami (Fig. 28). O tecido em questão tem as características conforme já apresentadas neste texto. A placa é retangular e suas dimensões são 12x15x1 cm, totalizando 180 cm³ de volume; 30% desse volume é ocupado pelo tecido de rami, e os outros 70% pela resina epóxi, que terá sofrido um processo de cura pela adição de um agente endurecedor, conforme já abordado. O valor médio da massa dessa placa ao final de sua confecção é de 215,10 g, e a abreviatura usada neste texto a partir de agora para identificar esta peça será “**CT**”.



Figura 28 - Placa Compósita Resina-Tecido de Rami, afxada para o ensaio sem plastilina

d) PLACA COMPÓSITA RESINA-FIBRA BRUTA DE RAMI

Preparou-se uma placa compósita formada basicamente por dois materiais distintos: resina epóxi e porções sobrepostas da fibra de rami em estado bruto - manta de fibra (Fig. 29). A placa é retangular e suas dimensões são 12x15x1 cm, totalizando 180 cm³ de volume; como no caso do CT, 30% desse volume é destinado à fibra bruta de rami. O valor médio da massa dessa placa é de 201,60 g, e a abreviatura usada neste texto a partir de agora para identificar esta peça será “CF”.



Figura 29 - Placa Compósita Resina-Fibra Bruta de Rami, pronta para o ensaio sem plastilina

e) PLACA COMPÓSITA RESINA-ARAMIDA

Preparou-se uma placa compósita formada basicamente por dois materiais distintos: resina epóxi e um conjunto de pedaços de aramida (Kevlar). A placa é retangular e possui as mesmas dimensões das duas placas acima (Fig. 30); novamente, 30% desse volume é ocupado pela fibra de aramida. O valor médio

da massa dessa placa é de 216,18 g, e a abreviatura usada neste texto a partir de agora para identificar esta peça será **“CA”**.



Figura 30 - Placa Compósita Resina-Aramida (visão do pós-impacto).

f) PLACA DE RESINA PURA

Preparou-se uma placa formada apenas pela resina epóxi solidificada. A placa é retangular e suas dimensões são 12x15x1 cm, totalizando 180 cm³ de volume; 100% desse volume é preenchido pela resina, a qual terá sofrido um processo de cura pela adição de um agente endurecedor. O valor médio da massa dessa placa ao final de sua confecção é de 207,00 g, e a abreviatura usada neste texto a partir de agora para identificar esta peça será **“Resina”**.

g) CONJUNTO DE PEDAÇOS DE TECIDO DE RAMI

Preparou-se um conjunto de diversos pedaços quadrados e iguais de tecido de rami, cujo lado mede 15 cm, sobrepostos entre si e unidos mediante a aplicação de cola para tecido (Fig. 31). Esse bloco formado tem a espessura média de 10 mm. O valor médio da massa desse bloco é de 292,50 g, e a abreviatura usada neste texto a partir de agora para identificar esta peça será **“RamiPuro”**.



(a)



(b)

Figura 31 (a,b) – Conjunto de pedaços de Tecido de Rami, unidos com cola para tecido.

h) CONJUNTO DE PEDAÇOS DE ARAMIDA

Preparou-se um conjunto formado por diversos pedaços quadrados e iguais de tecido de aramida, de 15 cm de lado, unidos entre si com cola especial aplicada pelo fornecedor, formando um bloco com cerca de 10 mm de espessura. O valor médio da massa desse bloco é de 297,00 g, e a abreviatura usada neste texto a partir de agora para identificar esta peça será **“AramPura”**.

i) TECIDO DE ARAMIDA (um nível)

Utilizou-se um pedaço quadrado de aramida (um nível de tecido), de 15 cm de lado, com uma espessura média de 1,25 mm, tratando-se na verdade este “um nível” citado de uma resultante da junção de dois níveis mais primários, colados previamente pelo fabricante. O valor médio da massa desse tecido (já colado de fábrica) é de 24,0 g, e a abreviatura usada neste texto a partir de agora para identificar esta peça será **“TA”**.

j) BLOCO DE ARAMIDA de 5mm

Utilizou-se um bloco formado por pedaços quadrados e iguais de tecido de aramida, de 15 cm de lado, unidos entre si com cola especial aplicada pelo

fornecedor, formando um bloco com cerca de 5 mm de espessura. Na verdade, a peça deste item constitui-se na junção de exatamente 04 (quatro) TA's. O valor médio da massa desse bloco é de 148,50 g, e a abreviatura usada neste texto a partir de agora para identificar esta peça será “**Bloco4TA**”.

Tabela 7 – Abreviatura e massa dos componentes

Descrição do componente	Abreviatura	Massa média medida em laboratório (g)
Placa de Alumínio	Al	304,2
Pastilha Cerâmica	Cer	97,7
Placa Compósita Resina-Tecido de Rami	CT	215,1
Placa Compósita Resina-Fibra Bruta de Rami	CF	201,6
Placa Compósita Resina-Aramida	CA	216,2
Placa de Resina Pura	Resina	207,0
Conjunto de Pedacos de Tecido de Rami	RamiPuro	292,5
Conjunto de Pedacos de Aramida	AramPura	297,0
Tecido de Aramida (um nível)	TA	24,0
Bloco de Aramida de 5mm	Bloco4TA	148,5

3.7.3 - IDENTIFICAÇÃO DOS TIPOS DE CP

Cada CP deste estudo foi identificado por uma expressão do tipo “A+B+C”, onde o número de termos nesse somatório será igual ao número de peças que constituem o CP em análise. Considerando a direção e o sentido do movimento normal de avanço do projétil (aproximação do alvo), a expressão “A+B+C” indica que “A” é a primeira peça da estrutura do CP, “B” o segundo item, e “C” o terceiro; ou

seja, nesta notação, “A” é o componente que terá o primeiro contato com o projétil quando este tocar o alvo.

A junção mecânica entre as peças foi promovida pela aplicação do adesivo Ultraflex, cujas características técnicas estão descritas no Apêndice 1. Para a colagem de cada interface peça-peça, foi usado uma quantidade de adesivo que proporcionasse uma excelente aderência, o que acabou criando uma estreita camada de cola curada, cuja espessura teve um valor que variava de 0,5mm a 1mm.

Nos CP onde o TA é o primeiro e o último elemento do conjunto (“TA+... + TA”), e apenas neles, além da já citada aplicação do Ultraflex entre as superfícies dos componentes, foram adicionalmente colocados quatro parafusos (com arruelas e porcas) nos quatro cantos da estrutura. Esse procedimento teve dois objetivos: (1) que o TA à frente da estrutura confinasse de forma eficiente a peça seguinte na estrutura, para aumentar a eficiência da atuação do cerâmico como um fragmentador do projétil; e (2) que o TA ao fundo continuasse preso à estrutura do CP durante o processo de choque dinâmico ocasionado pelo disparo, para poder atuar como uma “rede retentora” dos estilhaços das demais peças do CP, fazendo inclusive com que o valor médio da indentação na plastilina fosse diminuído de forma significativa.

A Tabela 8 fornece a relação de todos os CPs envolvidos no estudo e sobre os quais foram realizados disparos ao longo dos ensaios balísticos, com seus respectivos valores médios de massa. A lista totaliza 19 (dezenove) tipos diferentes de arranjos do sistema de proteção blindada.

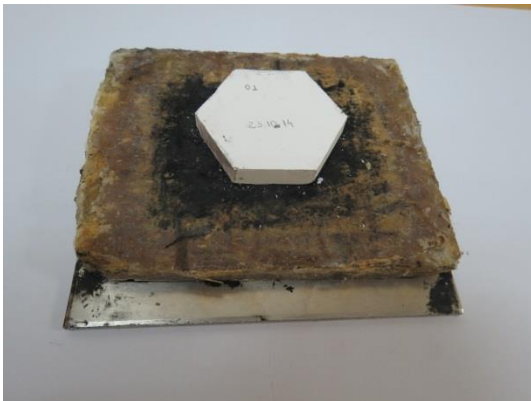
Tabela 8 – Descrição dos tipos de CP e suas massas

Descrição do Corpo-de-Prova	Massa média (g)
Cer + CT + Al	617,0
Cer + CF + Al	603,5
Cer + CA + Al	618,1
Cer + RamiPuro + Al	694,4
Cer + AramPura + Al	698,9
Cer + Al	401,9
TA + Cer + CT + 3TA	408,8
TA + Cer + CT + 2TA	384,8
TA + Cer + CT + TA	360,8
TA + Cer + CF + TA	347,3
TA + Cer + Resina + TA	352,7
TA + Cer + Bloco 4TA	270,2
TA + Cer + CF + RamiPuro	615,8
Cer + CT	312,8
Cer + 2CT	527,9
CT	215,1
CF	201,6
Al	304,2
Cer	97,7

Para se ter uma noção em termos visuais do aspecto de cada tipo de CP, da forma como ficavam montados e prontos para os ensaios, as Figuras de 32 a 43 mostram o resultado final da confecção de cada uma dessas estruturas.



Figura 32 - Tipo Cer+CT+Al



(a)



(b)

Figura 33 (a,b) – Tipo Cer+CF+Al



(a)



(b)

Figura 34 (a,b) – Tipo Cer+CA+Al

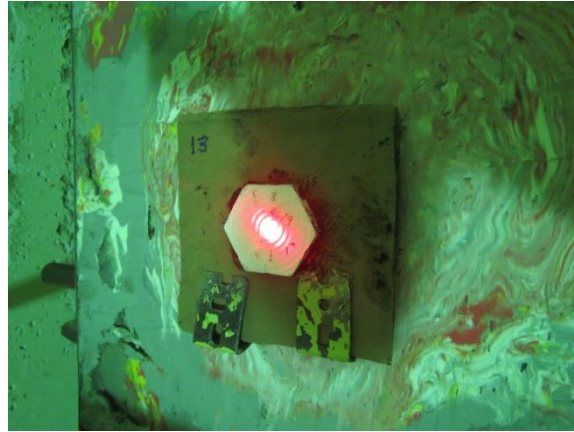


Figura 35 – Tipo Cer+RamiPuro+Al



(a)



(b)

Figura 36 (a,b) – Tipo Cer+AramPuro+Al

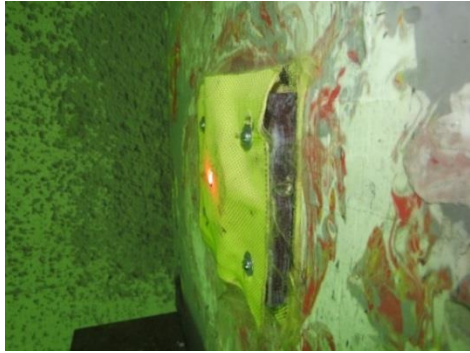


(a)



(b)

Figura 37 (a,b) – Tipo Cer+Al



(a)



(b)

Figura 38 (a,b) - Estrutura dos CPs dos tipos TA+Cer+CT+(2 ou 3TA)



(a)



(b)



(c)

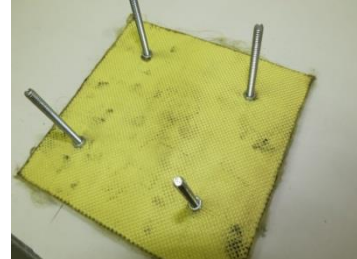
Figura 39 (a,b,c) - Estrutura Característica dos CPs dos tipos TA+Cer+(Compósito de Resina)+TA



(a)



(b)



(c)

Figura 40 (a,b,c) - Tipo TA+Cer+Bloco4TA



(a)



(b)

Figura 41 (a,b) – Tipo TA+Cer+CF+RamiPuro

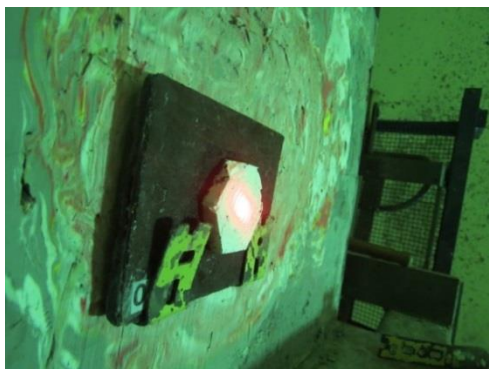


Figura 42 – Tipo Cer+CT



Figura 43 – Tipo Cer+2CT

3.7.4 – TIPOS DE ENSAIOS BALÍSTICOS REALIZADOS

Neste trabalho, foram realizados basicamente dois tipos de ensaios balísticos: um no qual se executava disparos sobre CPs posicionados sobre a plastilina, e outro no qual o CP era fixo numa estrutura vazada, sem plastilina ao fundo, conforme descrito a seguir:

1) Medição de Deformação na Plastilina

Neste grupo de ensaios, a estrutura do CP era posicionada firmemente sobre a plastilina, proporcionando um contato total da última peça do CP com a superfície desse material de apoio. Nos CPs onde o item de fundo é o AI, esse contato expressivo e direto entre as superfícies é promovido pela colocação de calços de metal curvados na base do CP (Fig. 44a); no caso dos CPs que possuíam parafusos nos seus quatro cantos, a fixação era feita através dos prolongamentos dos parafusos no corpo da plastilina (Fig. 44b).



Figura 44 (a,b) - Modos de fixação dos CPs na plastilina.

Após o impacto balístico, a plastilina permanece deformada, sendo portanto um parâmetro muito útil e interessante para a averiguação da energia absorvida pelo alvo. Neste grupo de ensaios, a caracterização da eficiência balística baseou-se na medida da profundidade da indentação, a qual representa uma “assinatura de impacto” criada na plastilina pela energia cinética residual trazida pelo projétil. O critério adotado neste estudo para essa caracterização será, numa primeira análise específica, o seguinte: a proteção balística será considerada “eficiente” se a medida da profundidade da deformação gerada na massa de plastilina, após o impacto, for igual ou inferior a 44 mm, conforme prevê a Norma NIJ 0101.04.

2) Medição de Energia Cinética Absorvida (ECA)

Nesta classe de testes, os CPs foram constituídos não da junção de vários itens, mas sim de uma única peça, a qual é fixada numa estrutura metálica e sem a plastilina ao fundo (Fig. 45), de modo a permitir que o tiro, que executa uma trajetória da boca da arma até o CP, atravesse totalmente esse objeto e continue sua trajetória no ar para além dos 15 m de distância da arma. Ocorrendo tal evento físico, surgirão dois valores importantes para este grupo de ensaios: a velocidade do projétil em sua aproximação, imediatamente antes de tocar o CP (V_1), e a velocidade desse mesmo projétil imediatamente após ter atravessado o material (V_2). Com o uso desses dois parâmetros e de posse da massa do projétil (considerada constante nesse processo), pode-se calcular a Energia Cinética Absorvida (ECA) pelo CP neste evento, através da seguinte fórmula:

ECA = Energia Cinética Inicial - Energia Cinética Final;

$$ECA = [(mV_1^2) - (mV_2^2)]/2 \quad \text{Eq. 08}$$

onde:

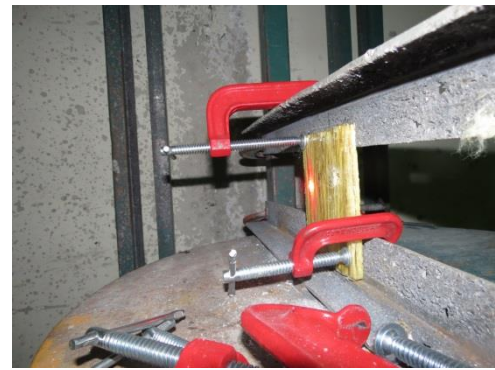
m = massa do projétil, expressa em kg (seu valor exato é 0,00933kg);

V₁ e V₂ expressas em m/s; e

ECA expressa em joules.



(a)



(b)

Figura 45 – (a) Placa compósita resina-fibra na posição do ensaio; (b) vista alternativa.

A Tabela 9 relaciona o tipo de ensaio balístico para cada tipo de CP. Nota-se que todos os CPs que possuem mais do que uma peça são destinados aos ensaios com plastilina, e que os demais (com apenas um item) são voltados para os testes de medição da ECA, o que é uma consequência direta das características e objetivos do tipo de ensaio.

Tabela 9 – Tipo de ensaio para cada CP

Corpos-de-Prova listados por Tipo de Ensaio Balístico	
Medição da Deformação na Plastilina	Medição da ECA
Cer + CT + Al	
Cer + CF + Al	
Cer + CA + Al	
Cer + RamiPuro + Al	
Cer + AramPura + Al	
Cer + Al	CT
TA + Cer + CT + 3TA	CF
TA + Cer + CT + 2TA	Al
TA + Cer + CT + TA	Cer
TA + Cer + CF + TA	
TA + Cer + Resina + TA	
TA + Cer + Bloco 4TA	
TA + Cer + CF + RamiPuro	
Cer + CT	
Cer + 2CT	

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIOS REALIZADOS NO MATERIAL CERÂMICO

4.1.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

O ensaio por difração de raios X (DRX) das amostras cerâmicas foi realizado em um difratômetro de raios X do IME, da marca X'Pert PRO – PANalytical, mostrado na Fig. 46, com geometria parafocal Bragg-Bretano, empregando-se a técnica de rotação θ - 2θ .



Figura 46 – Difratômetro de Raios X do IME.

Os resultados obtidos de DRX estão mostrados na Fig. 47.

Amostra 1:

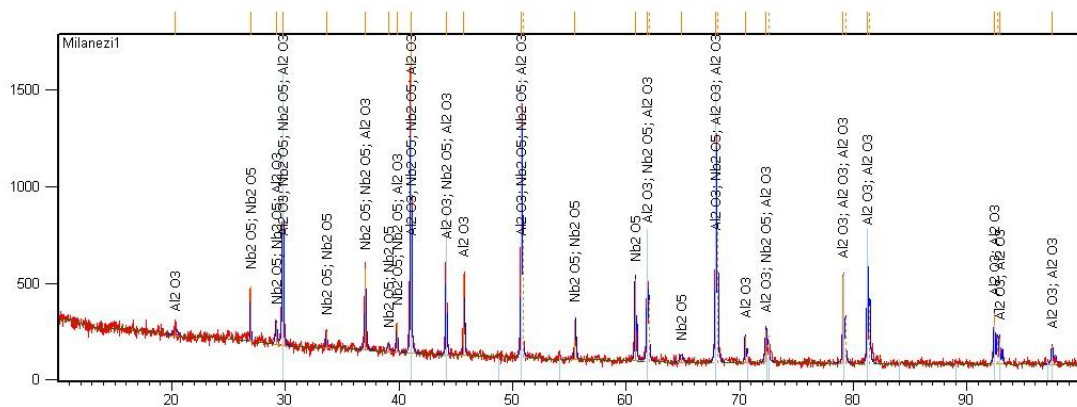


Fig 47(a)

Amostra 2:

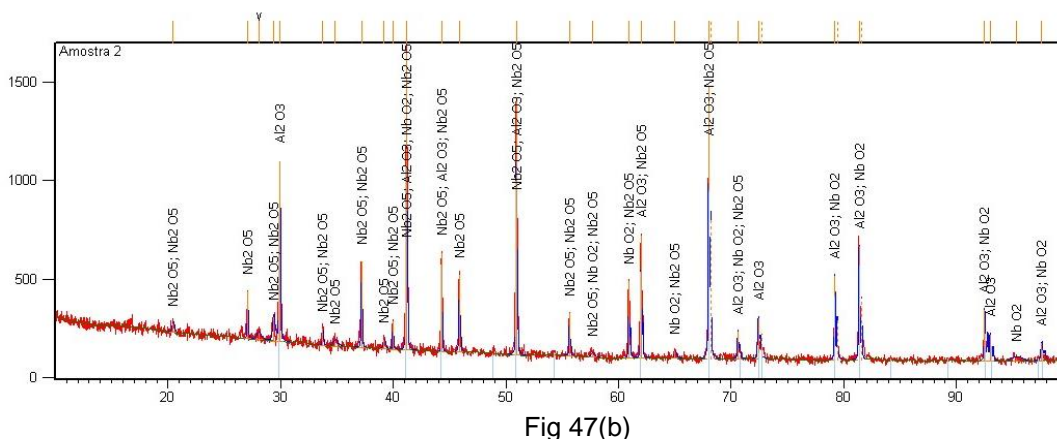


Figura 47 (a,b) – Resultados gráficos da DRX: Intensidade versus posição [°2Theta] (Cobalto)

Os resultados das difrações de duas amostras cerâmicas processadas comprovaram a presença predominante dos dois principais componentes da placa confeccionada: Al_2O_3 e Nb_2O_5 . A Fig. 48 mostra uma sobreposição dos gráficos anteriores, cujo objetivo foi enfatizar a regularidade dos métodos de fabricação dos CPs e a verificação da similaridade entre as amostras, o que é desejável para ensaios repetitivos que utilizem vários CPs e utilizem tratamentos estatísticos.

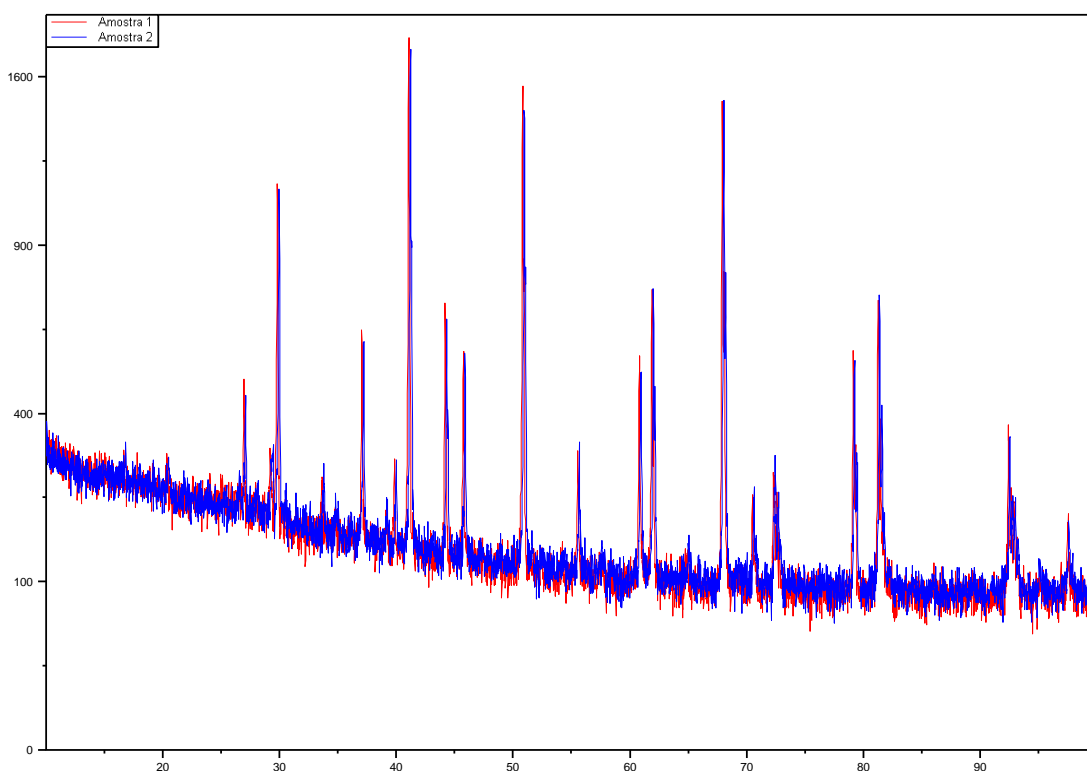


Figura 48 – Sobreposição dos resultados gráficos (Intensidade versus posição 2Theta(°))

4.1.2 MICRODUREZA

Realizou-se o ensaio de microdureza Vickers (HV), nas amostras cerâmicas, na escala **HV 03**, a qual é caracterizada pela aplicação da carga de 300 g sobre a amostra por 15 s. As medições foram realizadas no IME, no Microdurômetro digital Buehler, modelo Micromet 2003, nº 1600-5300 (Fig. 49). Foi utilizado o indentador de pirâmide HV padrão, e os resultados HV encontrados, na escala mencionada, estão mostrados na Tabela 10.



Figura 49 – Microdurômetro Digital (IME)

Tabela 10 – Resultado da microdureza

Medições	Resultado	Média e DP
1	443,9	385,62±36,88
2	367,6	
3	345,1	
4	392,0	
5	379,5	

O valor médio obtido é condizente com a faixa de valores encontrada na literatura para o material avaliado, que é o cerâmico composto por 96% de alumina e 4% de nióbia.

4.1.3 PROPRIEDADES ELÁSTICAS

Na Tabela 11 estão expressos os valores medidos e aqueles posteriormente calculados. Os dados de entrada são C_L , C_s (ambos medidos no aparelho) e a densidade ρ (obtida na literatura), e o restante das grandezas foram calculadas com a aplicação desses três valores no conjunto das sete fórmulas listadas no item 3.6.3.

Tabela 11 – Resultados das Propriedades Elásticas

Material	C_L (m/s)	C_s (m/s)	ρ (kg/m ³)	G (GPa)	λ (GPa)	ν	E (GPa)	C_R (m/s)	C_o (m/s)
Pastilha Cerâmica	8485,5	5160	4004,9	106,633	75,1019	0,21	257,33	4693,56	8015,87
Placa de Alumínio	6776	3158	2700	26,927	70,1143	0,36	73,309	2955,19	5210,72



(a)



(b)

Figura 50 (a,b) – Aparelhos de medição de velocidade de ondas no material (CEPEL)

4.1.4 TAMANHO MÉDIO DE GRÃO (TMG)

Um dos fatores importantes na análise microestrutural de um material policristalino é o seu tamanho médio de grão. Por isso, dentre as imagens de MEV das superfícies pós-fratura da pastilha cerâmica, foi selecionada uma na qual foram feitas diversas indicações de medidas em vermelho dos grãos presentes. A imagem em questão foi escolhida com base nos seguintes critérios:

- a) Característica intergranular da fratura dinâmica;
- b) Boa qualidade da resolução; e
- c) Representatividade da imagem em relação às demais observadas, onde houvesse grande distribuição dos tamanhos de grão, com uma heterogeneidade nesses valores que tornassem a imagem selecionada uma excelente aproximação com a média geral observada ao longo dos ensaios do MEV.

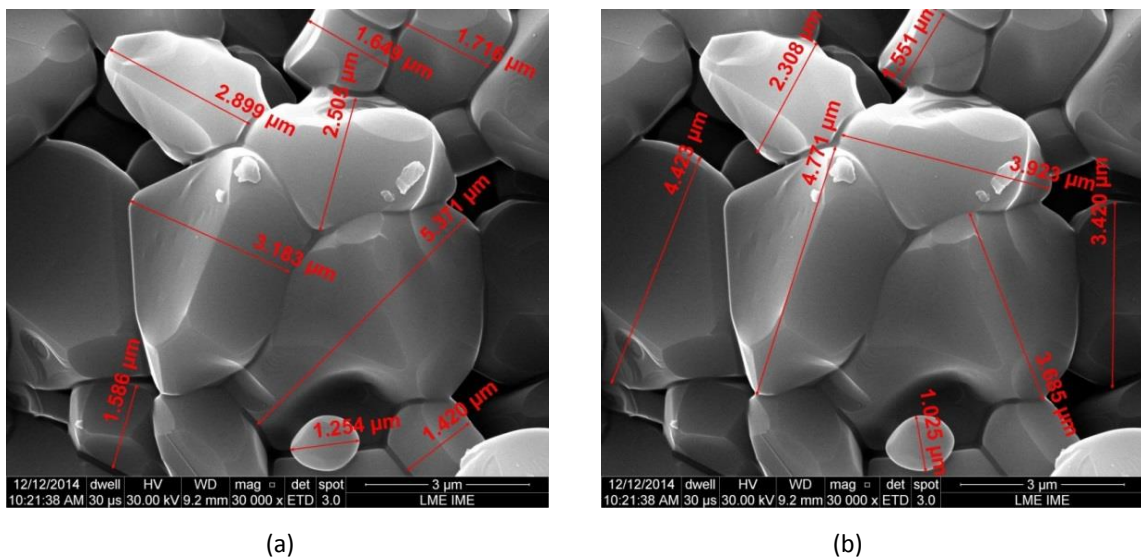


Figura 51 (a,b) – Imagem do MEV escolhida para o TMG

Tabela 12 – Valores medidos para o TMG

Valores encontrados nas imagens (μm)			TMG (μm) e DP
2,899	1,586	4,771	2,746±1,346
1,649	1,254	3,923	
1,716	1,42	3,42	
2,505	2,308	3,685	
3,183	1,551	1,025	
5,371	4,423	-----	

Após a seleção, a micrografia da Fig. 51 foi escolhida para cumprir essa função, tendo sido duplicada para facilitar a colocação dos valores encontrados.

Conforme consta na Tab. 12 acima, foram realizadas 17 (dezesete) medições, e o valor obtido do TMG com o desvio padrão foi de $2,746 \pm 1,346 \mu\text{m}$.

4.2 ENSAIOS BALÍSTICOS

4.2.1 ENSAIOS SOBRE A PLASTILINA

4.2.1.1 Análise pelos critérios da Norma NIJ 0101.04

A Norma NIJ Standard 0101.04 descreve e estabelece as condições gerais de execução e análise de ensaios balísticos a nível internacional para coletes individuais à prova de tiro. Ela prevê como parâmetros de verificação para a aprovação dos painéis balísticos os seguintes critérios:

- a) O não-atravesamento do CP pelo projétil. Após o impacto no alvo, pelo menos a última peça do CP deverá estar não-perfurada, podendo estar abaulada ou deformada; e
- b) a medida da maior profundidade da assinatura balística provocada no material de apoio (plastilina) pelo disparo deve, para caracterizar a aprovação do material testado, ter um valor **de até 44mm**.

Adicionalmente, é válido frisar que existem ainda no texto da referida Norma condições específicas de ensaio a serem atendidas (Tipo III), que são as seguintes:

- a) o tipo de munição (7,62 mm M1);
- b) a massa do projétil (numa faixa de valores que variam em torno dos 9,5 g); e
- c) a faixa de velocidades na qual o projétil deve atingir o alvo (de 810 m/s a 860 m/s).

Considerando-se nesta primeira análise apenas os dois parâmetros principais da NIJ 0101.04 (perfuração e deformação), obteve-se os resultados apresentados nas Tabelas 13 e 14, para CPs não perfurados e perfurados, respectivamente.

a) CPs que não foram perfurados:

Tabela 13 – Resultados de deformação para os CPs que não foram perfurados

Tipo do CP		
Cer + CF + Al	Deformação (mm)	Deformação média (mm)
1	19,57	17,74
2	18,31	
3	15,10	
4	17,99	
Cer + CT + Al	Deformação (mm)	Deformação média (mm)
1	15,27	17,03
2	21,41	
3	15,55	
4	16,97	
5	15,93	
Cer + Al	Deformação (mm)	Deformação média (mm)
1	24,95	23,48
2	22,00	
Cer + RamiPuro + Al	Deformação (mm)	Deformação média (mm)
1	17,93	18,85
2	19,76	
TA + Cer + CT + 1TA	Deformação (mm)	Deformação média (mm)
1	40,19	41,85
2	42,52	
3	42,84	
TA + Cer + CT + 2TA	Deformação (mm)	Deformação média (mm)
1	39,47	39,47
TA + Cer + CT + 3TA	Deformação (mm)	Deformação média (mm)
1	35,30	35,30
Cer + CA + Al	Deformação (mm)	Deformação média (mm)
1	17,21	18,00
2	18,08	
3	18,70	
TA + Cer + Resina + TA	Deformação (mm)	Deformação média (mm)
1	52,37	56,21
2	53,85	
3	62,40	
TA + Cer + CF + TA	Deformação (mm)	Deformação média (mm)
1	48,02	46,26
2	49,32	
3	41,44	

Cer + AramPura + Al	Deformação (mm)	Deformação média (mm)
1	25,11	21,25
2	17,56	
3	21,07	

De acordo com os resultados mostrados na Tabela 13, pode-se ver que, dentre os CPs que não foram atravessados, os dos tipos TA+Cer+Resina+TA e TA+Cer+CF+TA não atenderam aos requisitos da Norma considerada, pois seus valores médios de assinatura no material ultrapassaram os 44 mm. Os demais CPs desta tabela foram aprovados pela Norma NIJ 0101.04.

Vê-se na Fig. 52 o aspecto do tecido de aramida da parte da frente do CP do tipo TA+Cer+Resina+TA. Pode-se notar que a aramida não foi apenas atravessada pelo tiro, mas também participou do processo de resistência mecânica e de dissipação de energia, o que pode ser evidenciado pelo grande espaçamento entre seus fios rompidos e pelo aspecto das suas pontas, desfiadas em decorrência de um esforço de natureza *trativa*, advindo das reflexões das ondas de choque, que atuam no sentido contrário ao movimento do projétil.

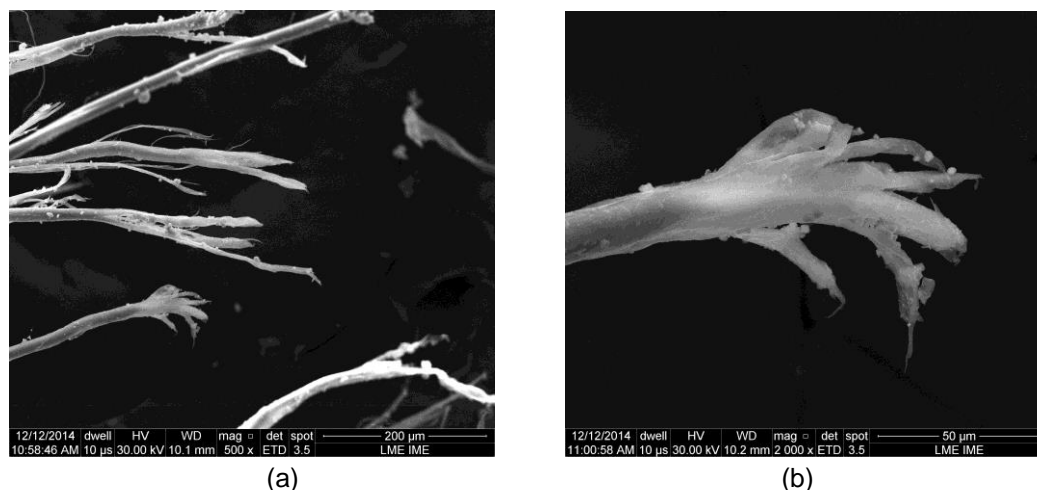


Figura 52 (a,b) – Aramida rompida, do CP do tipo TA+Cer+Resina+TA

Este fato reforça ainda mais a importância da colocação de um nível de TA como o primeiro elemento da estrutura do CP, pois ele cria uma resistência adicional para reter os fragmentos cerâmicos e os demais estilhaços durante a ocorrência das múltiplas reflexões de ondas que transcorrem no processo de impacto dinâmico. A promoção desse confinamento das peças permite aumentar o poder de proteção

balística. Como a velocidade da onda de choque é cerca de dez vezes maior que a velocidade do projétil, a camada retentora à frente possibilita que os diversos componentes do CP permaneçam unidos entre si mesmo depois do início da propagação dessas ondas, que advém do contato projétil-CP. Por estarem bem próximos uns dos outros, os itens da estrutura têm a possibilidade de permanecerem presentes fisicamente, ao invés de serem ejetados do alvo antes do término do processo dinâmico, o que aumenta a eficiência da blindagem. Na Fig. 53, há outras imagens que reforçam o conceito exposto, aplicado ao CP do tipo TA+Cer+CT+TA. Nota-se a presença de alguns grãos de alumina que permaneceram aderidos aos fios de aramida, provavelmente devido ao efeito da força eletrostática advinda do grande atrito surgido por ocasião do impacto.

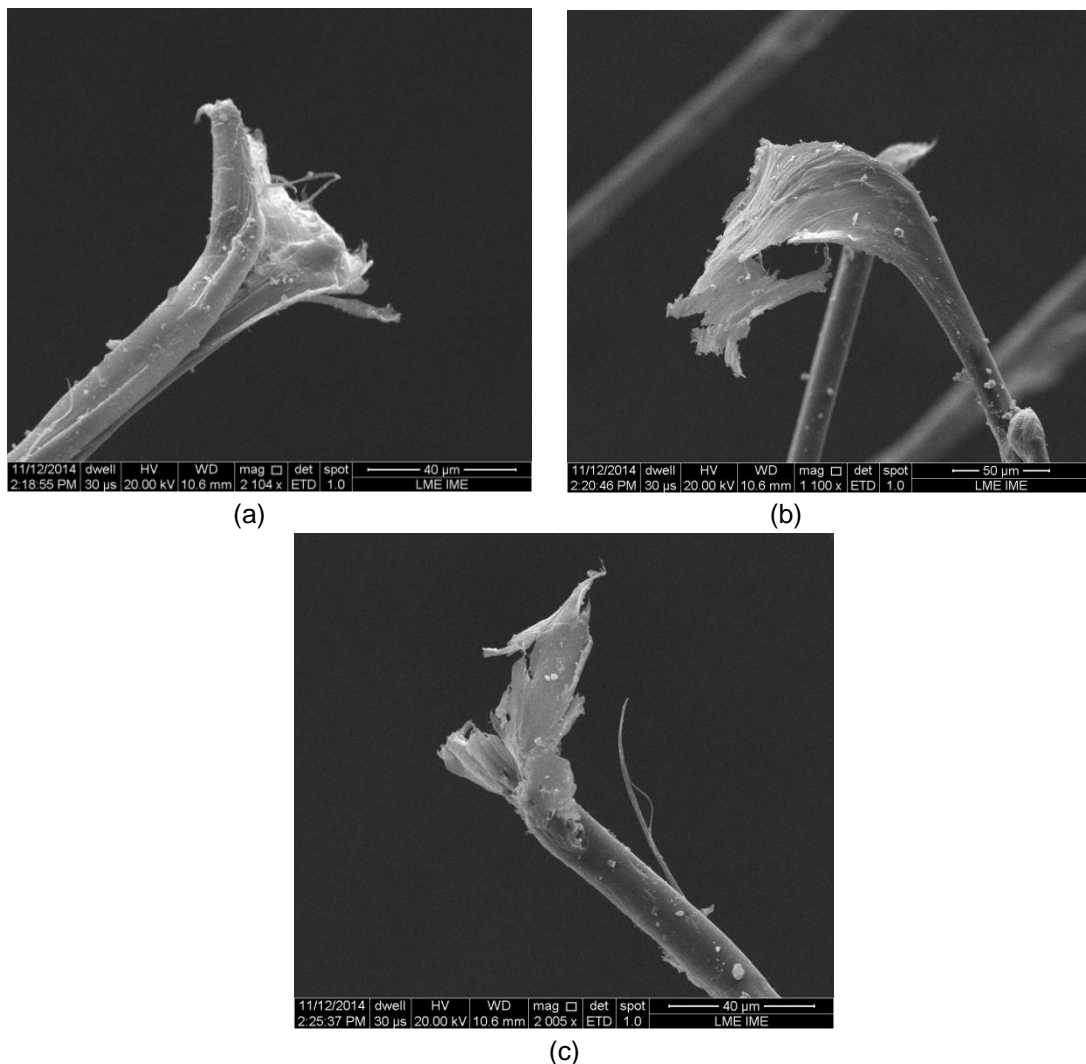


Figura 53 (a,b,c) - Aramida pós-impacto, da parte da frente do CP do tipo TA+Cer+CT+TA.

Cabe ressaltar a aprovação do CP do tipo TA+Cer+CT+TA, contrastando com as duas reprovações anteriormente referenciadas. Como a única diferença entre esses CPs é a placa compósita do recheio da estrutura, ficou evidente o melhor desempenho do tecido de rami em relação à sua fibra bruta quando utilizada como fase dispersa no conjugado resina-fibra. Nota-se também que este compósito comporta-se, balisticamente, melhor do que aquele com uma placa feita exclusivamente de resina epóxi. O motivo para isso é que a adição do rami no epóxi, seja em tecido ou em manta, diminui a fragilidade dessa peça, reforçando-a devido à expressiva resistência mecânica das fibras naturais, e também por se criar um caminho maior de fratura dinâmica para a propagação das trincas na placa epoxídica com fibra, promovendo-se uma área de falha mecânica bem maior do que na placa de resina pura.

Outro ponto relevante refere-se ao fato de que, dentre todas as amostras que foram aprovadas pela NIJ em seus dois critérios, o TA+Cer+CT+TA destaca-se por ser o *corpo-de-prova* mais leve dentre eles, conforme mostrado na Tabela 8, que apresenta as massas médias das diversas estruturas investigadas. O peso é sempre um fator crítico nas análises de materiais envolvidos em blindagem balística, devido às questões ligadas à mobilidade e autonomia. Posteriormente, será complementada a consideração referida ao *peso* do material efetivamente usado em blindagens.

Na Fig. 54, apresenta-se um gráfico que fornece um resumo dos resultados obtidos de medição da endentação na plastilina nos ensaios balísticos para os CPs que não se romperam totalmente com o tiro.

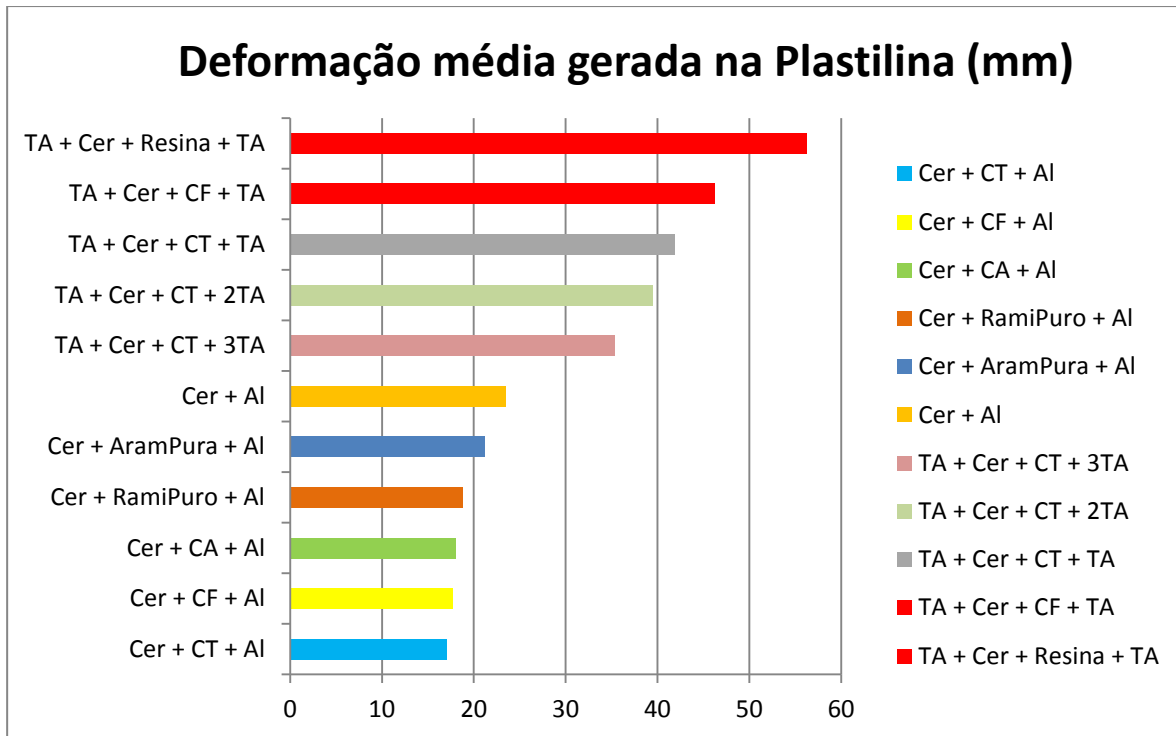


Figura 54 – Deformação média na plastilina

O 2º melhor resultado dessa 1ª análise, o CP Cer+CF+Al, teve esse desempenho em grande parte devido ao modo com que a fratura dinâmica do CF ocorreu, além do fato da presença da placa de alumínio, este o qual é um metal de alta ductilidade. Na Fig. 55, vê-se a fratura do compósito no pós-impacto, revelando um grande emaranhamento das fibras brutas entre si e com a resina epóxi. Pode-se notar que a área final das fraturas acompanhou aproximadamente o perfil das superfícies das fibras, e não das superfícies longas e planas que seriam características de uma fratura frágil da resina solidificada, fato que justifica a inclusão de fibras num meio epoxídico como reforço estrutural. Pode-se também observar nas extremidades da amostra as pontas de fibras fraturadas por solicitação de tração, comprovando a participação do rami na absorção da energia de impacto.

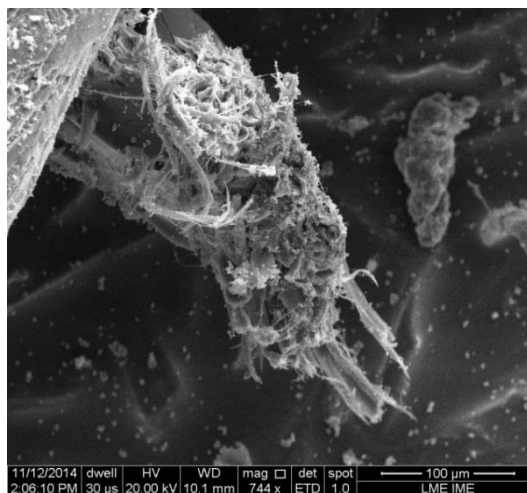


Figura 55 - Placa CF pós-impacto, do Cer+CF+Al

b) CPs que foram atravessados:

Tabela 14 – Resultados de deformação para os CPs que foram atravessados

Tipo do CP	Deformação (mm)	Deformação média (mm)
Cer + 2CT		
1	72,08	72,08
Cer + CT		
1	82,00	82,00
TA + Cer + CF + RamiPuro		
1	81,23	81,23
TA + Cer + Bloco 4TA		
1	72,46	79,29
2	86,31	
3	85,45	
4	68,59	
5	83,62	

Conforme pode-se verificar acima, os quatro tipos de CP relacionados na Tabela 14 foram reprovados pela NIJ 0101.04 quanto aos seus dois critérios (ocorrência da perfuração e deformação excessiva na plastilina). O tipo Cer+2CT foi aquela estrutura com o resultado menos desfavorável quanto ao trauma medido na plastilina, atingindo um valor médio de 72,08mm.

Finalizando esta 1ª discussão, é válido lembrar que em todas as amostras houve a importante presença do corpo cerâmico (Cer), composto por 96% de

alumina e 4% de nióbia. Uma das respostas dinâmicas esperadas para o Cer é que ele, ao se romper em razão do disparo, sofra uma fratura do tipo intergranular, e não transgranular. A desejada fratura intergranular é aquela cujas trincas se propagam no corpo cerâmico ao longo das fronteiras de seus grãos de alumina, preservando-os, ao invés de quebrar ou fraturar cada um desses grãos de forma individual, que é o que ocorre na falha do tipo transgranular. A fratura intergranular possibilita uma maior absorção de energia de impacto, pois força a ocorrência da trinca ao redor dos grãos, ou seja, numa trajetória ou área muito maior do que na transgranular, o que significa que mais energia de impacto será absorvida, o que é desejável para sistemas de proteção balística. Nas nossas peças de alumina com adições de nióbia, observou-se a predominância dessa fratura intergranular, devido à formação de uma segunda fase nos contornos de grãos da alumina, como resultado do processo de sinterização. Na Fig. 56, pode-se observar a superfície de amostras cerâmicas pós-impacto em cinco imagens, nas quais ocorreram esse tipo de fragmentação, devido à preservação dos grãos em geral após o choque dinâmico. Nota-se também que a distribuição dos inteiros grãos se dá de forma tridimensional, ao invés de haver uma área com tendências de maior planificação, a qual ocorreria se os corpos granulares fossem rompidos (fratura transgranular), com menor absorção de energia. Um dado a mais que reforça a ocorrência da falha intergranular é a presença regular de sulcos arredondados ao longo das áreas externas de cada grão observado nas micrografias obtidas. Esses buracos suaves indicam que ali, antes do impacto, estavam alojados porções de outros grãos, os quais se desgrudaram no ato do choque, mas sem romper internamente nenhuma dessas unidades envolvidas.

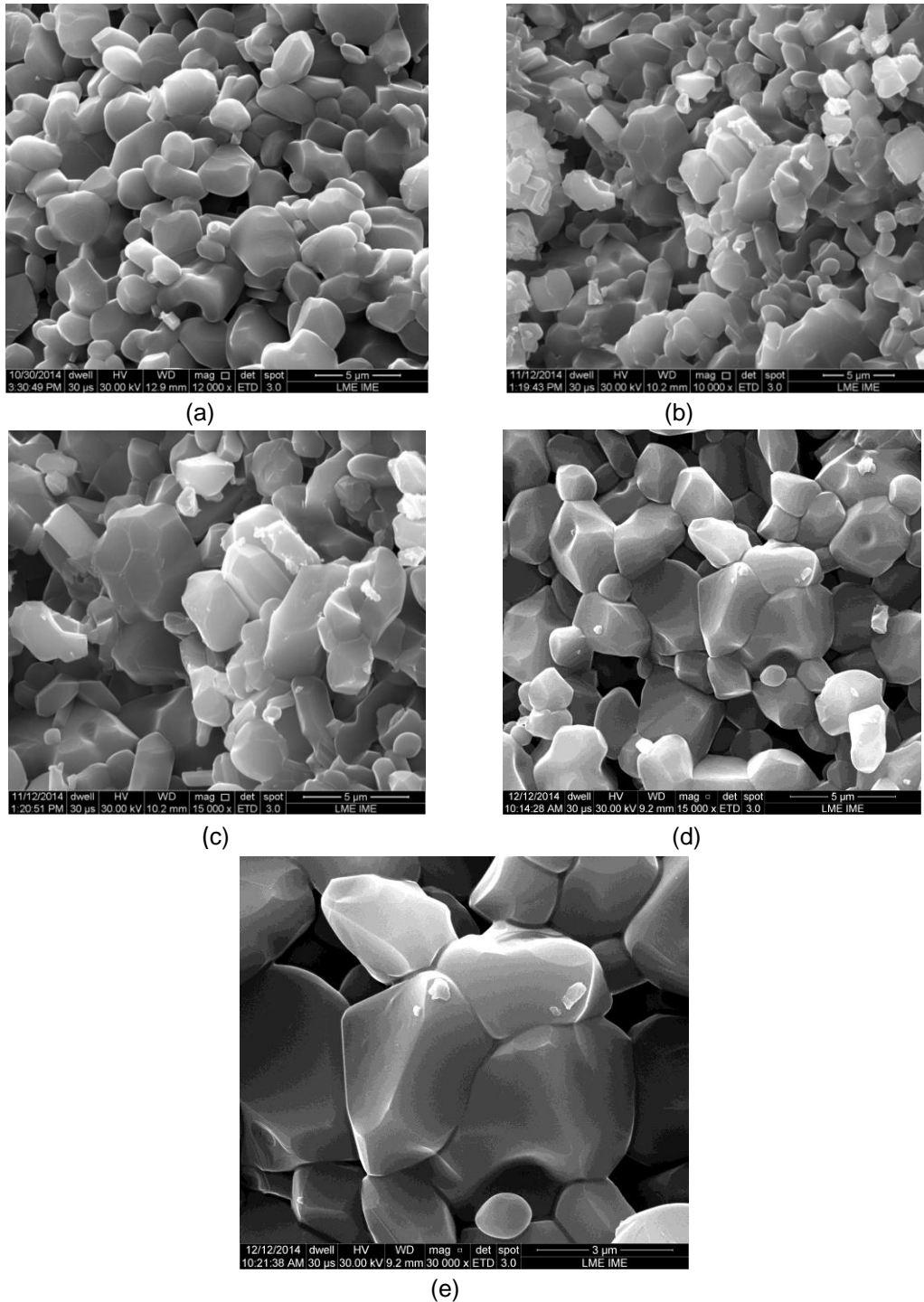


Figura 56 (a,b,c,d,e) – Superfícies de fratura dinâmica de cerâmicos utilizados nos ensaios, evidenciando o seu caráter intergranular.

Nas duas análises a seguir, outros fatores além daqueles anteriormente considerados com base na NIJ 0101.04 serão levados em conta para a avaliação do comportamento balístico.

4.2.1.2 Análise pela relação da deformação gerada com a energia cinética incidente

Outro tipo de análise que se faz necessária é aquela estabelecida através da relação da profundidade encontrada no material de apoio com a energia cinética que incide no alvo no momento do impacto. É fato notável que a causa do surgimento do trauma no CP – e em consequência na plastilina – é o impacto dinâmico do projétil sobre o conjunto, sendo que este projétil em movimento possui uma certa massa m e toca o CP sob uma certa velocidade V , denominada “velocidade de impacto”. Com isso, a partir desses dois parâmetros, tem-se condições de estimar a energia cinética, calculada pela equação:

$$E_c = mV^2/2 \qquad \text{Eq.09}$$

onde:

E_c = Energia cinética incidente no alvo, no momento do impacto.

Pode-se considerar esta energia como sendo a causa principal da ocorrência dos danos que foram observados nas peças do CP e na massa de apoio. Sendo assim, a magnitude da deformação na plastilina está diretamente relacionada ao valor da E_c que chega no alvo.

Em vista desse conceito, não é apropriado comparar os diversos CPs contabilizando apenas os valores médios dos traumas gerados no material de fundo, sem levar em conta a energia que gerou tal deformação. Na verdade, o trauma é uma consequência mecânica desta variável de entrada, que é a energia cinética que efetivamente foi transferida ao alvo.

Para os disparos de todos os ensaios realizados, adotou-se o mesmo valor para a massa do projétil (a ponta da munição, que é o objeto lançado para fora da arma no ato do tiro), que é 9,33 g, um dado fornecido pelo fabricante. Já a velocidade do disparo é um parâmetro que varia de tiro para tiro, pois algumas condições, tais como o estado da arma e as características da carga presente no estojo de cada munição produzida, fazem variar de forma significativa o valor da velocidade de saída na boca da arma e, conseqüentemente, o valor da velocidade de impacto. Daí surge a necessidade de se medir essa grandeza para cada tiro em particular, o que foi feito com o uso do radar Doppler do CAEx, o qual gerou diversos

relatórios numéricos e gráficos pelo seu programa, os quais possibilitaram a coleta das informações necessárias aos cálculos. Para se ter uma noção do tipo de relatório e gráfico que o software do Radar gerou e de suas características, alguns exemplos desses documentos estão registrados nos Apêndices de 2 a 4.

Nas duas tabelas e nos dois gráficos a seguir (Tabelas 15 e 16 e Figuras 57 e 71), separados pelos itens “a” e “b”, estão registrados de forma direta e sucinta os resultados encontrados nos diversos ensaios promovidos, onde a informação principal almejada ao final dos cálculos foi a obtenção da média dos valores das relações Deformação/Energia encontrados para cada tipo de CP, expressa na última coluna mais à direita (indicado nas tabelas por “Rel D/E”).

a) CPs que não foram perfurados:

Tabela 15 – Resultados de deformação/energia para os CPs não perfurados

Tipo do CP					
	Deformação média (mm)	Vel de Impacto (m/s)	En Cinética (kJ)	Relação Deformação/Energia (mm/kJ)	Média da Rel D/E
Cer + CF + Al					
1	19,57	834,07	3,245	6,030	5,447
2	18,31	820,98	3,144	5,823	
3	15,10	843,52	3,319	4,549	
4	17,99	846,10	3,340	5,387	
Cer + CT + Al					
1	15,27	830,42	3,217	4,747	5,343
2	21,41	829,28	3,208	6,674	
3	15,55	834,89	3,252	4,782	
4	16,97	824,80	3,174	5,347	
5	15,93	813,27	3,085	5,163	
Cer + Al					
1	24,95	831,50	3,225	7,736	7,331
2	22,00	825,12	3,176	6,927	
Cer + TecRami + Al					
1	17,93	822,81	3,158	5,677	5,927
2	19,76	828,09	3,199	6,177	

TA + Cer + CT + 1TA	Deformação média (mm)	Vel de Impacto (m/s)	En Cinética (kJ)	Relação Deformação/Energia (mm/kJ)	Média da Rel D/E
1	40,19	839,08	3,284	12,237	12,609
2	42,52	841,37	3,302	12,876	
3	42,84	849,89	3,370	12,714	
TA + Cer + CT + 2TA	Deformação média (mm)	Vel de Impacto (m/s)	En Cinética (kJ)	Relação Deformação/Energia (mm/kJ)	Média da Rel D/E
1	39,47	850,05	3,371	11,709	11,709
TA + Cer + CT + 3TA	Deformação média (mm)	Vel de Impacto (m/s)	En Cinética (kJ)	Relação Deformação/Energia (em mm/kJ)	Média da Rel D/E
1	35,30	845,52	3,335	10,585	10,585
Cer + CA + Al	Deformação média (mm)	Vel de Impacto (m/s)	En Cinética (kJ)	Relação Deformação/Energia (em mm/kJ)	Média da Rel D/E
1	17,21	845,99	3,339	5,155	5,363
2	18,08	845,81	3,337	5,418	
3	18,70	852,47	3,390	5,516	
TA + Cer + Resina + TA	Deformação média (mm)	Vel de Impacto (m/s)	En Cinética (kJ)	Relação Deformação/Energia (em mm/kJ)	Média da Rel D/E
1	52,37	848,63	3,360	15,588	16,721
2	53,85	853,18	3,396	15,858	
3	62,40	845,35	3,334	18,718	
TA + Cer + CF + TA	Deformação média (mm)	Vel de Impacto (m/s)	En Cinética (kJ)	Relação Deformação/Energia (em mm/kJ)	Média da Rel D/E
1	48,02	848,85	3,361	14,286	13,718
2	49,32	850,82	3,377	14,605	
3	41,44	851,12	3,379	12,263	
Cer + AramPura + Al	Deformação média (mm)	Vel de Impacto (m/s)	En Cinética (em kJ)	Relação Deformação/Energia (em mm/kJ)	Média da Rel D/E
1	25,11	829,15	3,207	7,829	6,545
2	17,56	840,45	3,295	5,329	
3	21,07	835,18	3,254	6,475	

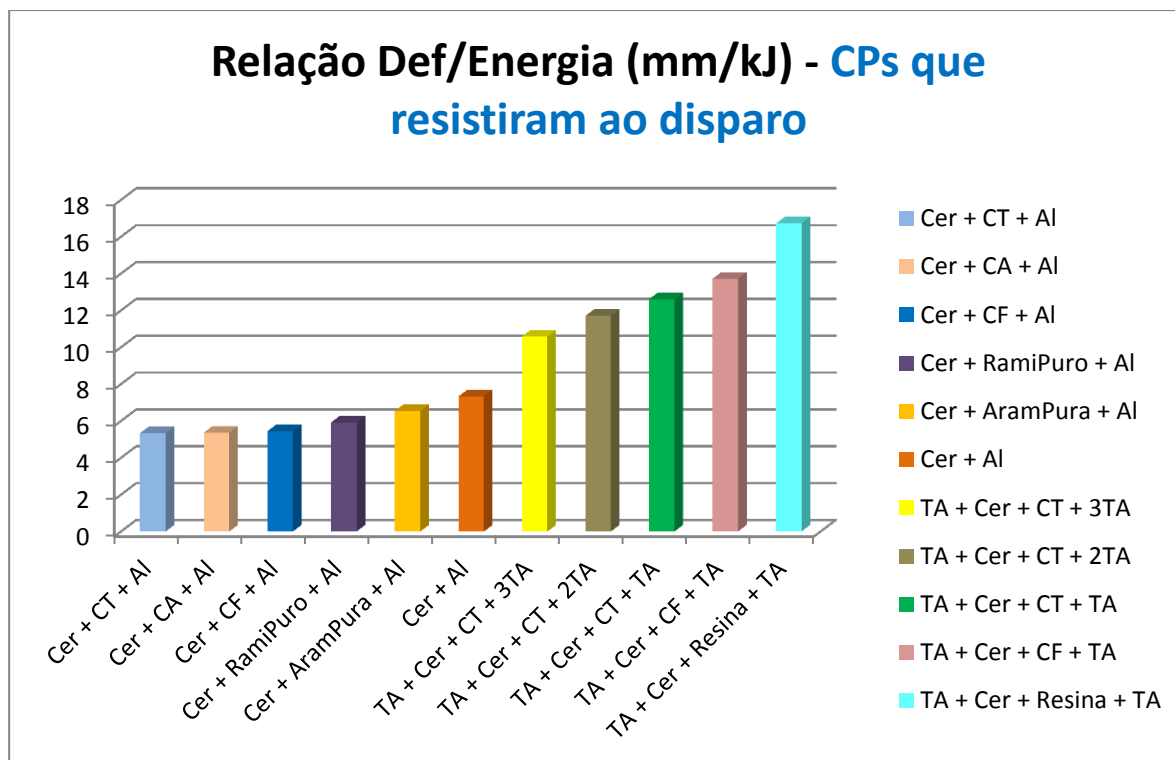


Figura 57 – Relação Deformação/Energia para os CPs não perfurados (mm/kj)

O melhor resultado encontrado para a relação deformação/energia foi o Cer+CT+Al, pois foi o que apresentou o *menor* valor para esse quociente, corroborando o resultado anterior. Isso é assim avaliado porque o que se almeja é uma eficiente proteção balística, onde os valores de trauma na plastilina devem ser os menores possíveis; sendo assim, para cada kJ de energia que impacta no CP, busca-se por uma quantidade cada vez menor de milímetros a serem gerados no material de apoio. Assim, tem-se no gráfico acima, da esquerda para a direita, em ordem crescente das razões mm/kJ obtidas, a configuração da melhor para a pior resposta de cada CP em termos da relação citada. Nota-se que o resultado menos favorável foi o do TA+Cer+**Resina**+TA, com o valor médio de 16,721mm de abaulamento para cada kJ incidente.

Foi possível ainda observar nesse gráfico uma interessante separação em dois grandes grupos de CPs: os seis melhores resultados (que são os seis primeiros, mais à esquerda) são aqueles que possuem a placa de alumínio como última peça da estrutura, o que explica a maior resistência apresentada, se

comparada aos CPs que possuem o tecido de aramida como o último item, que são os cinco resultados mais à direita, com os maiores valores.

Analisando-se outros casos mais pontuais ainda dentro desse gráfico, pode-se adicionalmente observar o seguinte:

- a) No 1º grande grupo, que possui a placa de alumínio como “fundo”, é surpreendente constatar que *o tecido de rami se mostrou mais eficiente balisticamente do que a aramida, seja misturada com epóxi (CT x CA) seja em estado puro, como vendido (RamiPuro x AramPura)*. Para buscar algumas explicações para isso, na Fig. 58 tem-se uma porção da fronteira da placa CT pós-impacto, do CP Cer+CT+Al. Esta imagem mostra a expressiva quantidade de material cerâmico que ficou retido nas extremidades rompidas do tecido de rami embebido em epóxi, fazendo diminuir a quantidade de alumina que conseguiu chegar à placa de alumínio, melhorando o desempenho da proteção.

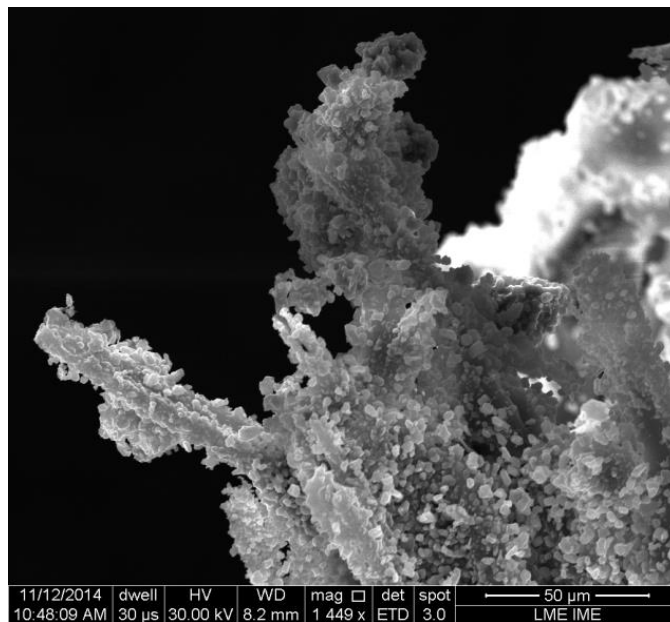


Figura 58 - Placa CT pós-impacto, do CP Cer+CT+Al.

Na Fig. 59, tem-se uma outra parte da fronteira da placa CT pós impacto, também do CP Cer+CT+Al. Nesta imagem, vê-se em três escalas diferentes a morfologia da superfície da fratura surgida com o impacto, na qual os fios do tecido de rami contribuem diretamente na resistência ao rompimento da peça. Nas Figuras 59(a) e (b), vê-se que a área obtida com a falha é totalmente irregular, seguindo

essencialmente os contornos da trama do tecido em meio à resina. Na verdade, é possível notar que houve uma excelente dispersão do epóxi no rami, durante o processo de cura na fabricação, dado que se pode observar nas fotos um elevado grau de coesão entre os fios mesmo após o tiro. Na Fig. 59(c) percebe-se que o rompimento dos fios de rami se deu por tração, auxiliando assim efetivamente na absorção de energia durante o processo de crescimento da trinca.

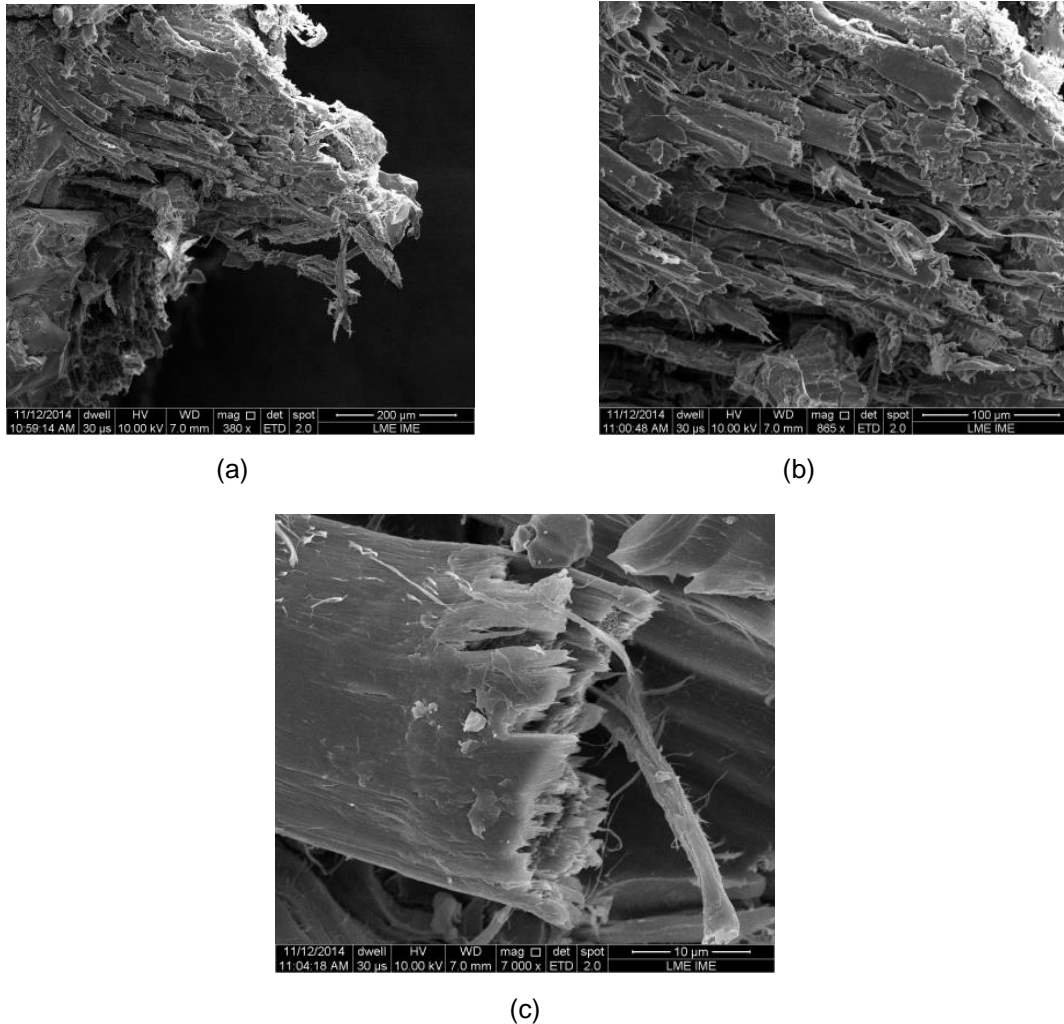


Figura 59 (a,b,c) - Placa CT pós-impacto, do Cer+CT+Al.

Continuando-se na análise da interessante superioridade observada a partir do tecido de rami em relação à aramida, especificamente para os tipos de CPs estudados neste texto, deve-se observar o CA pós-impacto do CP do tipo Cer+CA+Al (Fig. 60). Pode-se perceber em (a) que os fios da aramida não estão

mais alinhados e unidos, e também que não estão totalmente imersos na camada de resina solidificada, a qual pode ser vista como sendo o material planificado, abaixo dos fios. Isso denota uma molhabilidade da aramida no epóxi menor do que a do tecido de rami, resultando numa perda de resistência (MONTEIRO; MARGEM; SANTOS Jr, 2009). Na Fig. 60(b), observa-se uma outra região do CA na qual pode-se constatar a parte final de alguns fios de aramida, após a falha do material, envoltos por resina de maneira pouco expressiva, devido a uma baixa adesão. Além disso, vê-se nesta imagem um espaçamento entre os fios maior do que o observado anteriormente para os fios de rami no CT, o que produz no CA uma menor efetividade na resistência ao rompimento quando comparado à uma situação onde a molhabilidade fosse maior (MARGEM; NETO; MONTEIRO, 2010).

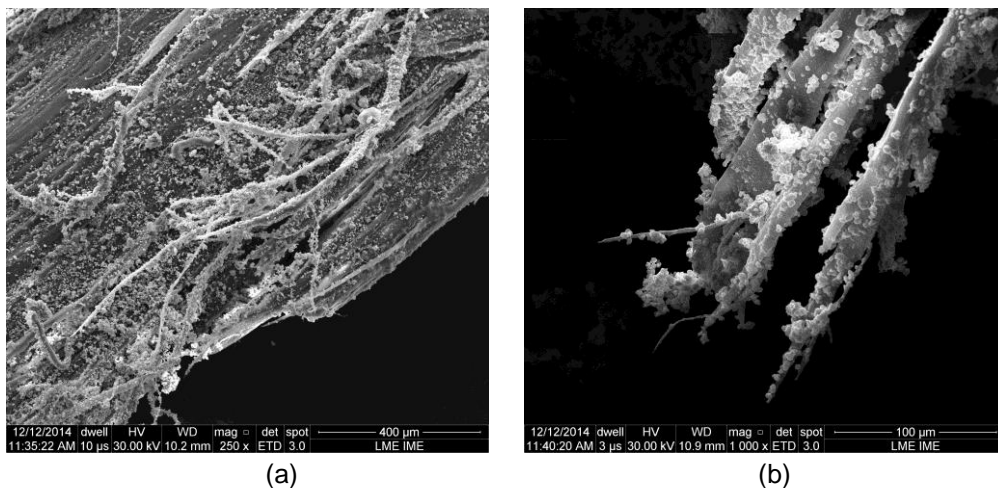


Figura 60 (a,b) - Placa CA pós-impacto, do CP Cer+CA+Al.

Analisando-se o CA no pós-impacto, pode-se perceber que a camada mais externa dessa peça era composta primordialmente pela resina solidificada, como se observa na Fig. 61. É possível notar que, com a ação do disparo, essa crosta de epóxi foi dizimada da região do impacto, configurando-se ao redor dela, de forma quase circular, os limites da resina que permaneceu recobrendo o corpo. Isso reforça a existência da baixa molhabilidade da aramida no epóxi comentada acima (MONTEIRO et al, 2009).



(a)



(b)

Figura 61 (a,b) – Peça CA pós-impacto.

Alguns pedaços dessa resina, de cor branca nas fotos, foram coletados e levados para análise no MEV, o qual gerou as micrografias da Fig. 62. Nessas quatro fotos, pode-se verificar a área de fratura da resina do CA formadas por diversas superfícies lisas e descontínuas entre si, e também algumas regiões com trincas e sequências de semi-planos em degraus. Todas essas descrições caracterizam uma fratura de natureza essencialmente frágil. É possível também constatar a presença de muitos grãos cerâmicos aderidos ao longo da amostra.

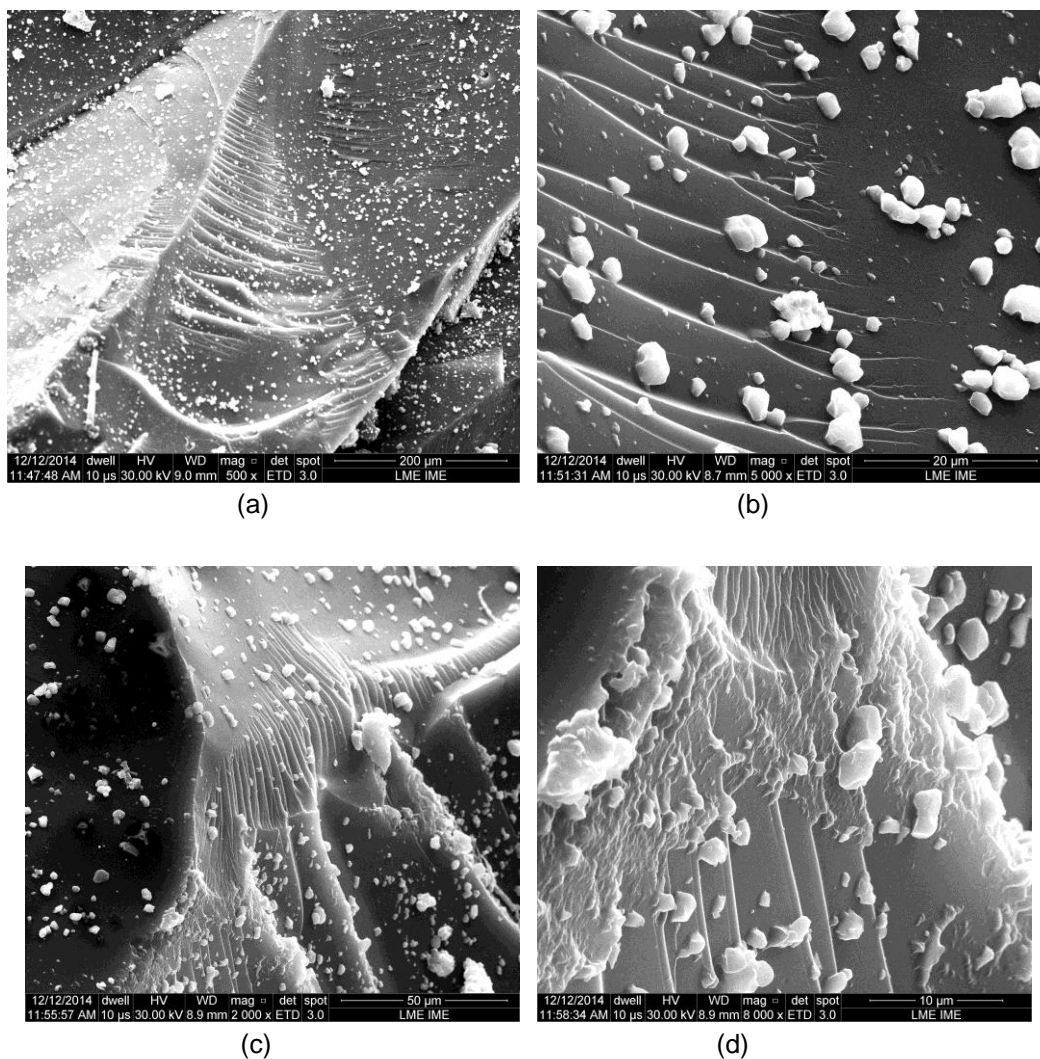
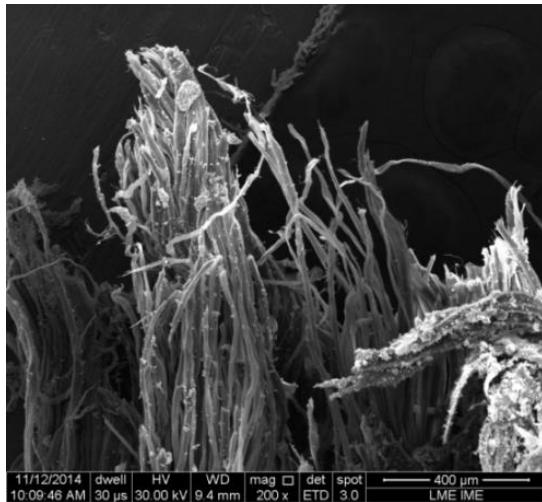


Figura 62 (a,b,c,d) - Resina pós-impacto, do CP do tipo Cer+CA+Al.

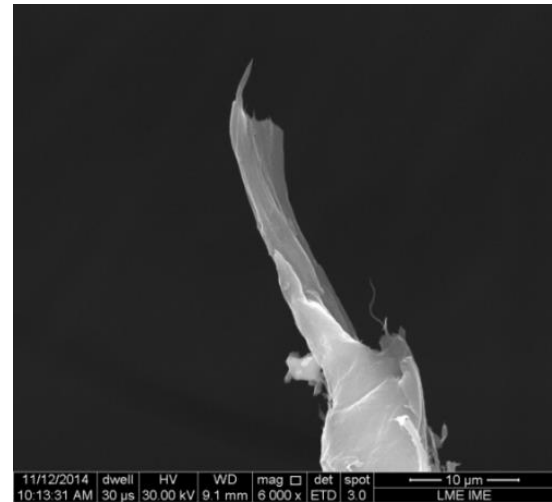
Dessa forma, grande parte do CA foi, no impacto, rompido de maneira frágil, devido à uma apreciável parcela de resina curada que ficou isolada da efetiva mistura resina-aramida ao longo do corpo do compósito. Esse fato contribuiu para explicar o melhor desempenho balístico do Cer+CT+Al em relação ao Cer+CA+Al.

Por fim, complementando as elucidações anteriores, a Fig. 63 mostra o tecido de rami pós-impacto, do CP do tipo Cer+RamiPuro+Al. Na Fig.63(a) pode-se ver, com apenas 200 vezes de aumento, o aspecto morfológico de uma parte da porção

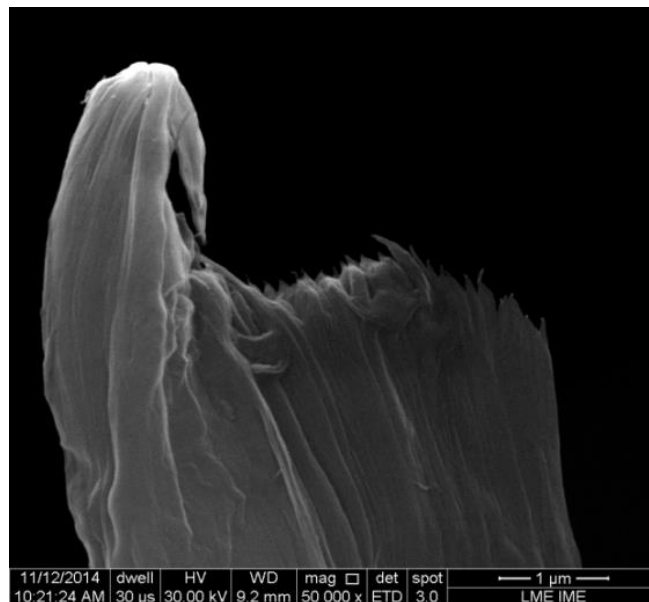
rompida. Em (b) vê-se uma imagem com 6000 vezes de aumento mostrando a configuração assumida pela extremidade do fio rompido, ressaltando-se mais uma vez a sua efetiva participação no esforço trativo de resistência à formação da trinca, contribuindo para a coesão do material. Observou-se a mesma natureza de solitação mecânica em (c), desta vez ampliada em 50.000 vezes. Notam-se as diversas micropontas formadas na extremidade do fio.



(a)



(b)



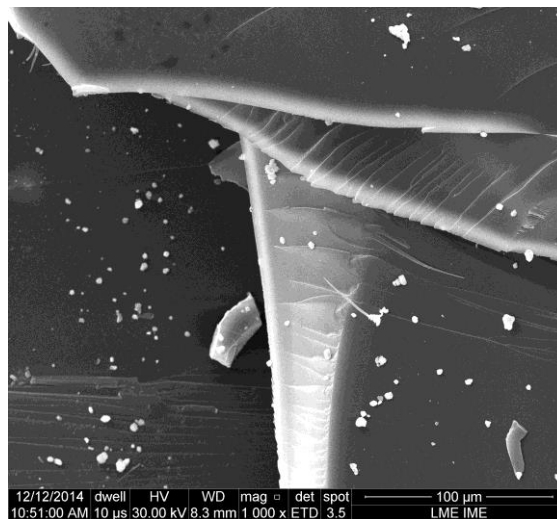
(c)

Figura 63 (a,b,c) - Tecido de rami rompido pelo tiro, do CP Cer+RamiPuro+Al.

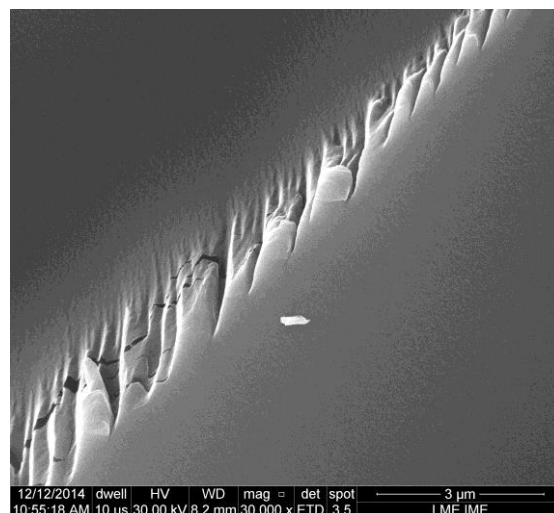
- b) No 1º grande grupo do gráfico, o pior resultado ficou com o Cer+Al, o que faz sentido, pois dentre esses primeiros seis resultados, é o único CP que não apresenta “recheio” entre o Cer e a Al, o que faz diminuir o seu poder de proteção;
- c) Ainda neste 1º grande grupo, considerando agora apenas os CPs “com recheio” entre o Cer e o Al, percebe-se que os resultados daqueles cuja peça central é um compósito (CT, CA ou CF) são mais satisfatórios do que aqueles que usam nesta posição um tecido seco e sem resina (RamiPuro ou AramPura). Isso reforça ainda mais o fato de que um conjugado resina-fibra atua balisticamente melhor do que o seu equivalente em fibra pura ou em resina pura, já que, quando estes dois tipos de materiais estão unidos, um reforça o outro, criando um efeito sinérgico;
- d) No 2º grande grupo, que engloba os cinco últimos resultados (mais à direita), os três primeiros resultados, que são os CPs dos tipos TA+Cer+CT e que terminam com os itens 3TA, 2TA e TA, mostraram uma coerência na qualidade dos resultados em relação ao número de tecidos de aramida que constituíram a parte final do CP, considerando-se que um número maior de barreiras de aramida devem de fato contribuir para uma maior proteção;
- e) Tanto no 1º quanto no 2º grande grupo de resultados, o CT se saiu melhor do que o CF. Isso é explicado pelo fato de que o tecido, sendo um produto manufaturado e que apresenta por isso maior regularidade ao longo de sua área, atua de forma mais eficiente em toda a área dos 180 cm² do CP. Além disso, a fibra natural de rami, utilizada em forma de manta, é unidirecional e não entrelaçada, enquanto o tecido é entremeadado em duas direções básicas, ortogonais entre si, sendo fabricado de forma uniforme e firme, proporcionando grande coesão entre os fios e baixíssimo espaçamento entre eles – o que não ocorreu com a manta de fibra bruta; e
- f) No 2º grande grupo, é interessante notar que, dentre seus cinco resultados, o do TA+Cer+Resina+TA foi o pior. Isso se explica pela maior fragilidade dessa placa de epóxi puro, quando comparada com CT ou CF. Não havendo rami misturado com a resina, esta deixa de ser reforçada por esta importante fibra natural, resultando num menor poder de blindagem. A ausência da fibra mergulhada no epóxi faz a energia necessária para a ocorrência da fratura

mecânica da peça ser menor, pois a fibra promoveria mais ductilidade nessa placa. O rami forçaria caminhos mais longos para a propagação da trinca, proporcionando uma área maior para a superfície final de fratura, e com isso a necessidade de mais energia para a ocorrência desse rompimento diferenciado. Ademais, a própria resistência mecânica da fibra, que precisa ser rompida, também favorece o desempenho da blindagem.

Na Fig. 64, vê-se uma imagem do MEV da placa de resina pura do CP do tipo TA+Cer+Resina+TA. Visualizam-se características do seu modo de fratura essencialmente frágil: existência de superfícies pouco rugosas, planos descontínuos sobrepostos e diversas fissuras.



(a)



(b)

Figura 64 (a,b) - Placa de Resina Pura pós-impacto.

b) CPs que foram atravessados:

Tabela 16 – Resultados de deformação/energia para os CPs perfurados

Tipo do CP					
Cer + 2CT	Deformação média (mm)	Vel de Impacto (m/s)	En Cinética (kJ)	Relação Deformação/Energia (mm/kJ)	Média da Rel D/E
1	72,08	831,64	3,226	22,340	22,340
Cer + CT	Deformação média (mm)	Vel de Impacto (m/s)	En Cinética (kJ)	Relação Deformação/Energia (mm/kJ)	Média da Rel D/E
1	82,00	815,28	3,101	26,445	26,445
TA + Cer + CF + RamiPuro	Deformação média (mm)	Vel de Impacto (m/s)	En Cinética (kJ)	Relação Deformação/Energia (mm/kJ)	Média da Rel D/E
1	81,23	854,87	3,409	23,827	23,827
TA + Cer + Bloco 4TA	Deformação média (mm)	Vel de Impacto (m/s)	En Cinética (kJ)	Relação Deformação/Energia (mm/kJ)	Média da Rel D/E
1	72,46	857,11	3,427	21,143	23,561
2	86,31	848,74	3,360	25,684	
3	85,45	842,79	3,314	25,788	
4	68,59	850,27	3,373	20,337	
5	83,62	849,29	3,365	24,851	

A razão de Cer+CT e de Cer+2CT não terem resistido ao tiro e terem sido perfurados reside no fato de que é importante que a última peça do conjunto seja um material mais dúctil (como a placa de Alumínio) ou mais maleável e resistente à tração (como o tecido de aramida), para que tais itens possam exercer a função de uma “rede retentora”, a qual irá receber e reter os fragmentos advindos das peças posteriores. Esta última camada em consequência se deforma e, dessa maneira, promove a “assinatura de impacto” que encontramos na plastilina após a retirada do conjunto no fim do ensaio. Como o último item dessas duas estruturas citadas aqui é o CT, ele se despedaça pela ação compressiva dos fragmentos cerâmicos, pois ele

é um material essencialmente frágil, não apresentando o mesmo nível de ductilidade que, por exemplo, a placa de alumínio utilizada em outros CPs possui.

Na Fig. 65 vê-se o aspecto do CT após o impacto em questão, onde ele se rompeu em fragmentos de grandes proporções e que adentraram na massa de apoio de forma significativa, causando uma deformação média acima dos 70 mm.



(a)



(b)

Figura 65 (a,b) – CT pós-impacto, ainda sobre a plastilina.

Na Fig. 66, vê-se a placa CT pós-impacto, do CP do tipo Cer+CT, em diversas escalas e em partes diferentes da amostra. Nota-se nas quatro fotos os mesmos aspectos morfológicos e de mecanismo de fratura já apresentados anteriormente em outras placas CT ao longo do texto.

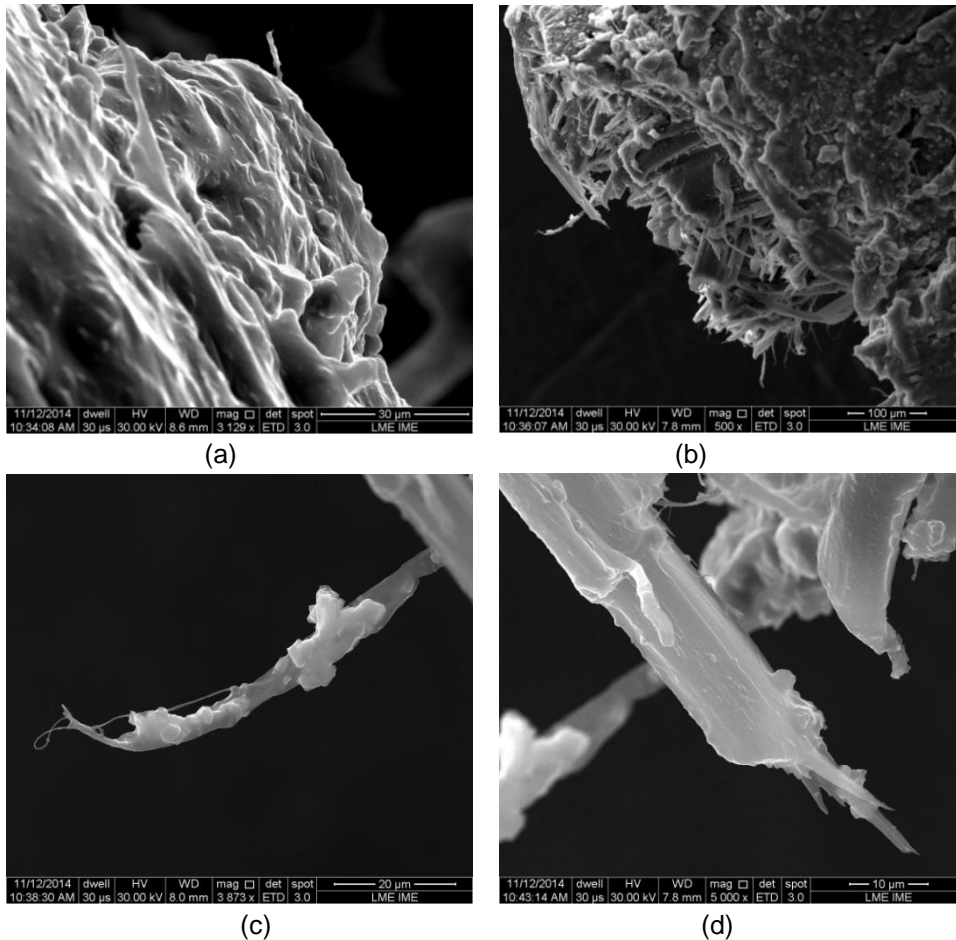


Figura 66 (a,b,c,d) - Placa CT pós-impacto, do CP Cer+CT.

Prosseguindo nas análises, abordando o tipo TA+Cer+CF+RamiPuro, constatou-se que ele foi atravessado e teve uma média alta na relação deformação/energia: 23,827 mm/kJ. Pode-se perceber que ele é bem similar ao do tipo TA+Cer+CF+TA, que não foi perfurado e cuja média das relações deformação/energia deu 13,718 mm/kJ, a qual é bem menor – por isso melhor – do que o CP em análise. Ficou evidente então a grande superioridade do TA em relação ao RamiPuro na função de se constituir na última peça da estrutura e de exercer, dessa forma, o papel de “rede retentora” dos estilhaços do CF. A explicação para isso é que, nesses dois tipos de conjunto, a camada traseira (TA ou RamiPuro) está presa à estrutura também pelos parafusos, porcas e arruelas afixados nos quatro cantos do painel e, com a força do deslocamento dos estilhaços do compósito para trás, esta última peça recebe grande sollicitação mecânica de tração, principalmente na sua parte central, que é a parte mais afastada dos quatro pontos de apoio dos parafusos. Com a energia do impacto, forçando-se os estilhaços para

trás e empurrando-se com grande energia a camada de fundo, os fios da aramida e do rami são fortemente tracionados, como consequência do abaulamento ou estufamento criado pela expansão dos fragmentos. Constatou-se neste ensaio que a resistência à tração do TA é muito maior que a do RamiPuro, o que se destaca mais ainda pelo fato de que a espessura da aramida utilizada nessa situação ser de cerca de 1,25 mm, enquanto que a do RamiPuro é oito vezes maior: 10 mm. Na Fig. 67 vê-se a frente e o verso do CP do tipo TA+Cer+CF+RamiPuro no pós-impacto. Na Fig. 68 tem-se o aspecto do dano causado na plastilina após o impacto nesse mesmo CP.



(a)



(b)

Figura 67 (a,b) – Frente e verso do CP TA+Cer+CF+RamiPuro pós-impacto.



(a)



(b)

Figura 68 (a,b) - Aspecto do dano causado à plastilina após o impacto, com o TA+Cer+CF+RamiPuro.

Na Fig. 69, vê-se o tecido de rami rompido na parte traseira do CP do tipo TA+Cer+CF+RamiPuro. Percebe-se o esforço de tração sofrido pelo fio pelo aspecto de suas pontas. É possível notar uma grande quantidade de grãos de alumina

aderidos ao tecido, o que é explicado por ter havido a perfuração completa do CP, possibilitando ao material cerâmico chegar ao lado oposto da estrutura.

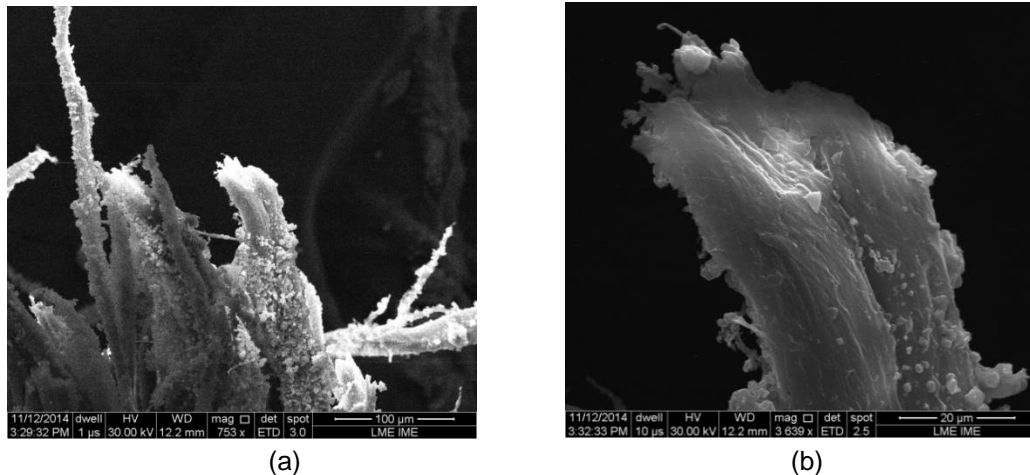


Figura 69 (a,b)-Tecido de rami pós-impacto, na parte traseira do CP TA+Cer+CF+RamiPuro.

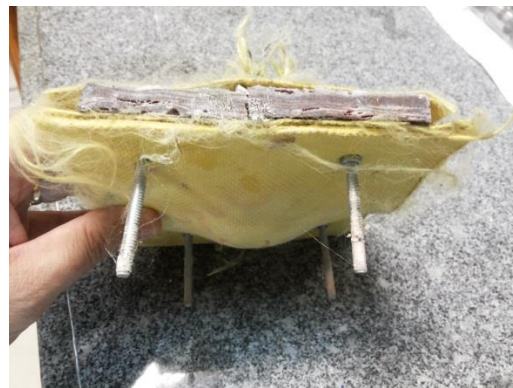
Analisando por fim o tipo TA+Cer+Bloco4TA, que também “vazou” perante o impacto do tiro, observa-se que ele teve a alta média de 23,561 mm/kJ. Nota-se que a colocação de um bloco de 5 mm de espessura de aramida como a última camada (o que equivale a 4 TA's) não foi suficiente para segurar o tiro de 7,62 mm a 15 m, o que aconteceu com todos os 5 disparos realizados. Além disso, é revelador perceber que, porém, outros CPs similares, dos tipos TA+Cer+CT+TA, TA+Cer+CF+TA e TA+Cer+Resina+TA, resistiram ao impacto e não foram perfurados. Quando colocam-se lado a lado os tipos TA+Cer+Bloco4TA e TA+Cer+(placa compósita)+TA, percebe-se que na verdade a placa compósita (CT, CF ou Resina) ocupa um lugar que seria equivalente a 3 TA's do Bloco4TA do outro tipo, para esta aplicação em especial. Assim sendo, os três tipos de placas compósitas aqui mencionadas, quando posicionadas na estrutura do CP entre o Cer e a última camada de TA, possuem uma eficiência de blindagem balística superior a 3 (três) TA's, o que é impressionante. Isso reforça ainda mais a importância da utilização de uma placa resina-fibra dentro da estrutura do CP, em conjunto com o Cer e com a aramida. A explicação para isso é que o tipo de pastilha cerâmica que usamos neste estudo (com as suas características específicas) provoca, como previsto, a

fragmentação e erosão do projétil, mas de uma forma tal que se faz necessária uma placa intermediária entre o Cer e a camada final de TA. As características da estrutura do tecido de aramida do fundo não são propícias para reter fragmentos que projetem no plano desse tecido estilhaços de pequena área, que acabaram exercendo um esforço de *cisalhamento* de grande magnitude sobre os fios, mas sim pedaços de grande superfície, que solicitem as fibras de forma *trativa*. Os fragmentos advindos das placas compósitas apresentaram um valor considerável de área, possibilitando que a última camada de TA possa atuar efetivamente como uma “rede de proteção” através de um esforço essencialmente de tração, impedindo o avanço dos fragmentos para além dela.

Na Fig. 70, vê-se o aspecto da parte traseira do CP após a perfuração pelo tiro. Ressalta-se o aspecto já mencionado anteriormente de o esforço de tração ser máximo no centro da estrutura. Na zona de rompimento da aramida, pode-se perceber o esticamento das fibras para fora, no sentido da passagem dos fragmentos do projétil e do Cer, e o aspecto peculiar dos fios do tecido danificados por este tipo de solicitação mecânica. Na Fig.70(b), vê-se o aspecto da superfície da aramida em um caso de não rompimento da última camada.



(a)



(b)

Figura 70 – Comparação dos aspectos dos CPs com aramida ao fundo após o disparo: (a) com perfuração. (b) sem perfuração.

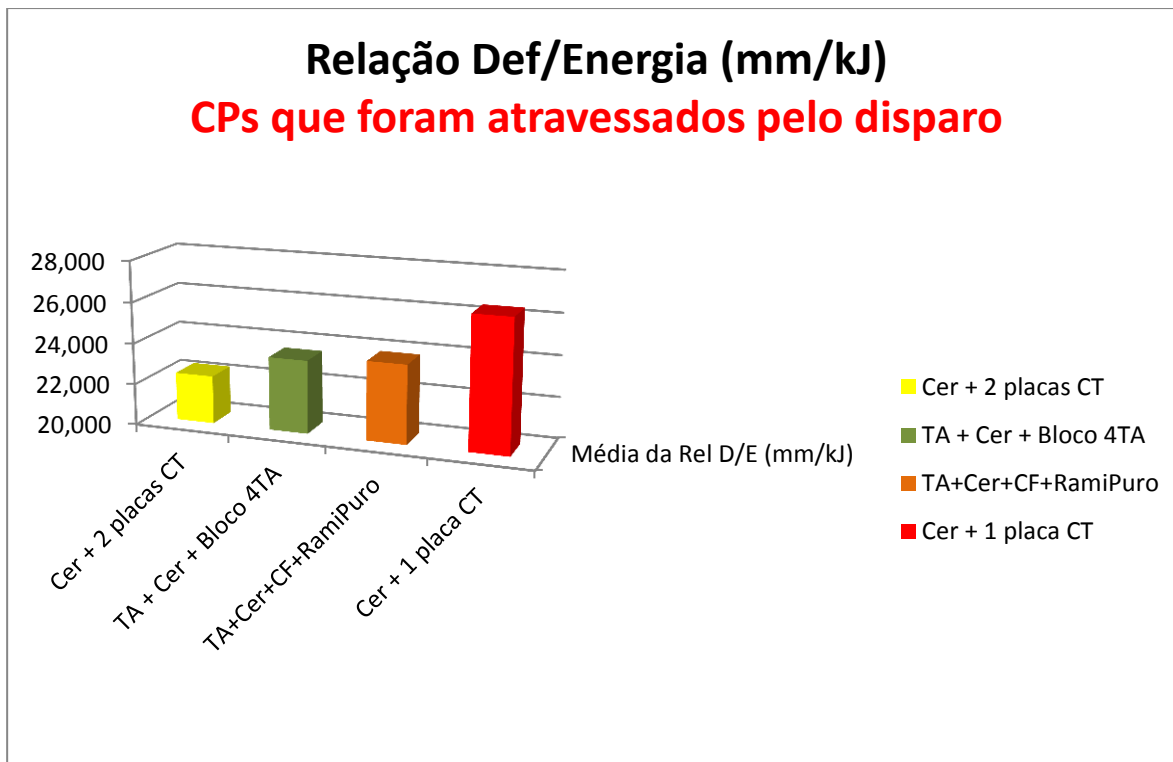


Figura 71 – Relação Deformação/Energia para os CPs que foram perfurados

De um certo ponto de vista, avaliar o comportamento balístico não apenas pela deformação (mm), mas sim pela relação dessa deformação com a energia que a gerou (mm/kJ), é mais adequado, pois indica como cada tipo de CP responde para cada kJ de energia que o atingiu, o que dá uma visão mais intrínseca do material estudado e de sua capacidade real de absorver energia.

4.2.1.3 Análise pela relação da deformação gerada com a energia incidente e com a densidade superficial do painel

Nesta 3ª análise, foram considerados apenas os 11 (onze) tipos de CPs que não foram atravessados pelo projétil. Objetivou-se fazer um aprofundamento no estudo envolvendo outros parâmetros físicos apenas para aqueles materiais de interesse tecnológico, que são as estruturas que resistiram dinamicamente aos impactos.

A ideia central neste 3º tópico é acrescentar mais uma importante variável no estudo comparativo dos CPs: o fator peso. Como já mencionado anteriormente, quando se projeta materiais para compor sistemas de proteção balística, além da eficiência na segurança, deve-se sempre levar em conta também o grau de mobilidade proporcionado pela blindagem. Seja para o combatente a pé, seja para as unidades móveis (carros de combate, helicópteros, etc), um peso cada vez menor deve ser uma meta a ser constantemente perseguida, de forma que a autonomia de locomoção em combate seja máxima.

A pergunta que cabe aqui é a seguinte: como avaliar as implicações do fator peso dos diferentes tipos de CPs que foram analisados? Tendo-se em mente uma futura aplicação real, qual é a melhor forma de se realizar uma comparação efetiva entre esses diversos tipos de estruturas?

Pode-se inicialmente pensar em fazer uma comparação apenas através do parâmetro “peso do CP”. Porém, analisando um pouco mais, é possível verificar que a solução mais adequada seria na verdade comparar as *densidades de superfície (DS)* de cada um desses conjuntos, a qual nada mais é do que a *relação massa/área* de uma configuração que não é mais o próprio CP, mas sim uma derivação da estrutura do CP. O motivo para isso é simples: quando for fabricado futuramente um artefato que já tenha aplicação prática para o usuário final, tal como um colete de uso pessoal ou placas balísticas de recobrimento de viaturas, a proporção da presença dos materiais que compõem um determinado CP, neste produto, será diferente da proporção dos materiais utilizados no próprio CP, o qual possui características específicas de configuração, conforme já foram definidos e apresentados aqui neste trabalho.

Para explicar melhor esse conceito, considera-se o CP do tipo Cer+Al na Fig 72. Pode-se dizer que a *área* desse CP é de 15 cm x 15 cm = 225 cm², pois é o valor da área que ele ocupa ao ser posicionado sobre uma superfície qualquer, dado que é a porção que a placa de alumínio ocupará. Porém, se este CP em especial for escolhido para uma aplicação tecnológica - por exemplo, para recobrir uma viatura - a área externa dessa estrutura deveria ser forrada com um mosaico ou junção de diversas células de blindagem que sejam iguais umas às outras. Contudo, se peças exatamente iguais aos CPs da foto forem usadas, ao juntá-las, ter-se-ia algumas partes protegidas pela sequência de materiais Cer+Al, mas outras partes teriam

apenas a camada de alumínio como proteção, o que não seria suficiente em termos de blindagem balística. Ao realizar os ensaios no CAEx, quando os tiros são dados exatamente sobre o centro do CP, esteve-se na verdade testando um conjunto de superfícies sobrepostas, para avaliar as respostas e comportamentos advindos da ação do tiro sobre esse empilhamento específico de materiais. Ter realizados os ensaios com tiros que não colidissem com a parte central do CP, atravessando eventualmente uma quantidade menor de camadas, não teria feito sentido para este estudo.

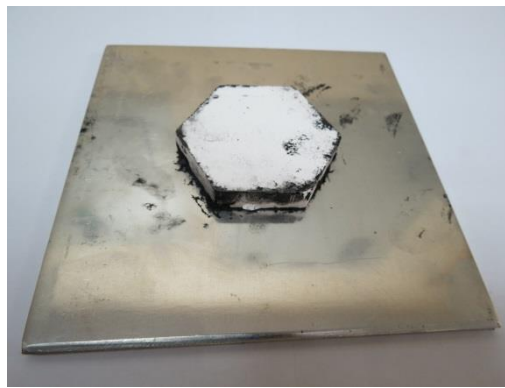


Figura 72 – Estrutura típica do CP Cer+Al

Considerando o exposto acima, a forma correta de avaliar o *fator peso* dos tipos de CPs deste estudo é definir o valor da *densidade de área* ou *densidade superficial* não dos CPs em si, mas sim de estruturas que sejam versões expandidas de cada tipo de CP, onde a área analisada seja integralmente preenchida por todos os materiais participantes, em cada nível. Esta nova configuração, que é derivada do CP original, será chamada neste texto de “CP expandido”.

Tem-se que a densidade superficial (DSup) corresponde à razão da massa (m) pela área ocupada por essa massa (A), obtendo-se:

$$DSup = m/A \qquad \text{Eq. 10}$$

Aplicando este conceito, pode-se calcular as DSup de cada item isolado que foi utilizado na confecção dos diferentes CPs. Os resultados obtidos estão expressos na Tabela 17.

Tabela 17 – Densidade superficial dos componentes

Componente	Massa do Componente (g)	Área do Componente (cm ²)	Densidade Superficial do Componente (g/cm ²)
Cer	97,7	28,293	3,453
Al	304,2	225	1,352
CT	215,1	180	1,195
CA	216,2	180	1,201
CF	201,6	180	1,120
RamiPuro	292,5	225	1,300
AramPura	297,0	225	1,320
TA	24,0	225	0,107
Resina	207,0	180	1,150

O problema agora é calcular a DSup do “CP expandido”, que é a sequência de ocupações homogêneas dos materiais usados no CP, conforme explicado acima. Como vimos, a DSup é a relação da massa com a área por ela ocupada; dessa forma, a DSup do “CP expandido” será a soma das massas em cada camada dividida pela área considerada, que será a mesma para todas as camadas. Adotando um exemplo de um CP no qual há 3 níveis de material, e considerando a área avaliada como sendo a área que o componente 1 ocupa na estrutura original do CP, tem-se:

$$DSup_{CP \text{ expandido}} = (m_1 + m_2(A_1) + m_3(A_1))/A_1,$$

E sabendo que $m = DSup \times A$, tem-se:

$$DSup_{CP \text{ expandido}} = (DSup_1 \times A_1 + DSup_2 \times A_1 + DSup_3 \times A_1)/A_1, \text{ o que resulta em:}$$

$$DSup_{CP \text{ expandido}} = DSup_1 + DSup_2 + DSup_3 \quad \text{Eq.11}$$

Os cálculos acima permitiram concluir que, de uma forma mais genérica, a densidade de área da estrutura derivada do CP, com aplicação prática como blindagem real, será simplesmente o somatório das DSup das peças que o compõem. Como um exemplo, tem-se que a DSup do (Cer+CT+Al)_{expandido} será:

$$DSup_{(Cer+CT+Al)expandido} = DSup(Cer) + DSup(CT) + DSup(Al)$$

Como já foi calculado anteriormente a DSup de cada componente isolado, pode-se agora obter a DSup de cada “CP expandido” apenas realizando a soma direta explicada acima. Após esses cálculos, obteve-se os valores conforme descritos na Tabela 18.

Tabela 18 – DSup referente aos CPs expandidos

Tipo do CP	DSup referente ao CP expandido (g/cm ²)
TA + Cer + CF + TA	4,786
Cer + Al	4,805
TA + Cer + Resina + TA	4,816
TA + Cer + CT + TA	4,861
TA + Cer + CT + 2TA	4,968
TA + Cer + CT + 3TA	5,075
Cer + CF + Al	5,925
Cer + CT + Al	6,000
Cer + CA + Al	6,006
Cer + RamiPuro + Al	6,105
Cer + AramPura + Al	6,125

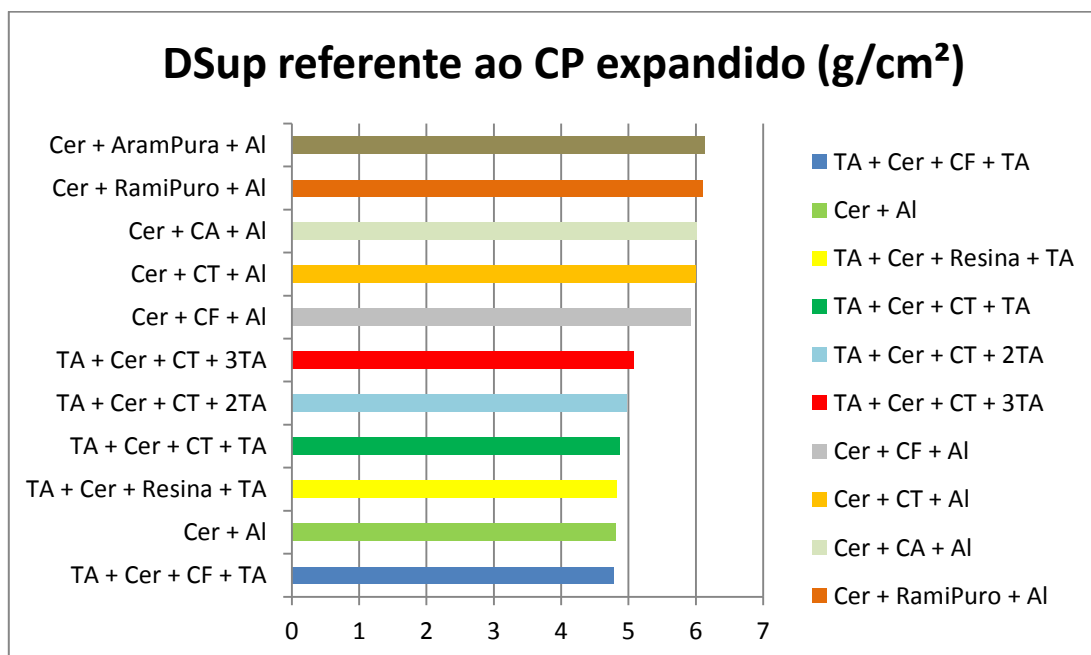


Figura 73 – DSup referente aos CPs expandidos

Chama a atenção o fato de a estrutura advinda do CP do tipo Cer+Al ser a 2ª mais leve de toda a lista. Num primeiro momento pode-se supor que teríamos todos os resultados separados em dois grandes grupos, onde num primeiro grupo, mais leve, teríamos apenas CP expandidos dos tipos que não possuem a placa de alumínio, e num segundo grupo, mais pesado, estariam segregados aqueles que trazem consigo tal peça. Mas não é isso exatamente o que ocorreu, e a explicação para isso se baseia em dois fatores:

- a) as placas compósitas resina-fibra possuem uma área 45cm² menor do que as placas de alumínio. Com isso, na concepção do CP expandido, há um aumento no peso relativo da estrutura final, de forma a compensar a diferença das áreas desses dois itens; e
- b) a DSup da placa de alumínio isolada é de fato maior do que os quatro tipos de placas compósitas, mas não muito maior. Pelos valores obtidos, a DSup da Al é de 1,352 g/cm², o que é apenas 15,9% maior do que a média dessa grandeza das quatro placas resina-fibra.

É válido ressaltar que, observando de forma indistinta os CPs que foram aprovados pela Norma NIJ 0101.04 em seus dois critérios, e considerando apenas o fator peso – que se traduz nos valores da DSup do CP expandido –, os três melhores resultados deste trabalho são as estruturas que advêm dos seguintes CPs:

- 1º) Cer+Al
- 2º) TA+Cer+CT+TA
- 3º) TA+Cer+CT+2TA

Observando-se esses três melhores resultados acima, para os critérios citados, faz-se necessário neste ponto registrar uma importante observação. Ao se implementar na prática uma blindagem para, por exemplo, uma viatura, utilizando-se de uma estrutura advinda do CP Cer+Al (1º colocado), haveria, numa situação de combate, o inconveniente prático de os estilhaços cerâmicos “pularem” para fora da viatura, projetando-se com grande velocidade ao seu redor, quando fossem

atingidos por algum tiro. A unidade móvel ficaria protegida, mas a violenta fragmentação da placa cerâmica criaria uma zona de risco para a permanência do combatente a pé nas proximidades do veículo, devido à possibilidade de algum pedaço de alumina, que possui alta dureza, atingir algum militar da força amiga de forma letal. Tal problema não ocorreria, entretanto, com as estruturas criadas a partir dos CPs dos tipos TA+Cer+CT+TA (2º colocado) e TA+Cer+CT+2TA (3º colocado), pois eles possuem uma camada de TA afixada à sua frente, o que impediria o lançamento abrupto de pedaços cerâmicos para fora da viatura na ocasião em que ela fosse eventualmente atingida por algum projétil.

Devido a essa diferença crucial, que surge pela existência da aramida como o primeiro nível de material, seria então necessário que fosse realizada uma pequena alteração no conjunto Cer+Al, visando à sua futura utilização numa situação real: o acréscimo de uma camada de TA. Porém, isso transformaria o CP raiz de Cer+Al para **TA+Cer+Al**, o qual possui uma DS_{Sup} maior do que a original. Com breves cálculos, utilizando os dados já levantados, pode-se concluir que a nova DS_{Sup} do Cer+Al recoberto pela aramida é de **4,912 g/cm²**. É curioso notar que este valor continua sendo menor do que o DS_{Sup} do TA+Cer+CT+2TA (4,968 g/cm²), mas que ultrapassa o valor do DS_{Sup} do TA+Cer+CT+TA (4,861 g/cm²).

Em vista da análise feita, podemos enfim refinar a classificação dada anteriormente, reescrevendo agora que, observando de forma indistinta os CPs que foram aprovados pela Norma NIJ 0101.04 em seus dois critérios, considerando apenas o fator peso – que se traduz nos valores da DS_{Sup} do CP expandido –, e *levando em conta a operacionalização tática do produto final, na qual prioriza-se a proteção dos militares nas proximidades da unidade móvel*, os três melhores resultados deste trabalho são as estruturas que advêm dos seguintes CPs:

- 1º) TA+Cer+CT+TA
- 2º) **TA+Cer+Al**
- 3º) TA+Cer+CT+2TA

Voltando à análise da Tabela 18 e do gráfico da Figura 72, são esses valores em g/cm² que devem ser utilizados para a comparação efetiva no quesito peso entre

os CPs, e não meramente o peso de cada CP. Pode-se então voltar aos resultados obtidos na 2ª análise, onde foram definidos os valores da razão deformação/energia, para agora refinar a comparação realizada através da inclusão do fator peso, através da incrementação da *DSup do CP expandido* na fórmula, dada a importância prática do peso do material usado como blindagem no dia-a-dia do combatente.

Ao invés de avaliarmos o quanto a plastilina foi deformada por cada kJ de energia que chega no alvo, vamos adicionalmente avaliar o quanto ela afunda por cada “kJ por g/cm² de combinação do material” ou por “energia/DSup”, resultando num valor final de *mm/(kJ/DSup)*, o que equivale matematicamente a *multiplicar* os resultados da 2ª análise (mm/kJ) pela DSUP. Isso faz sentido balístico, pois ao longo deste estudo estamos utilizando a lógica de que “quanto menor o valor analisado, melhor o produto final”; sendo assim, ao multiplicar os valores da relação deformação/energia pela DSUP, reforça-se a ideia do “quanto menor, melhor”, já que uma densidade superficial maior – o que significa um peso maior - é uma solução tecnológica menos desejável.

Na Tabela 19, listam-se os resultados obtidos pela inclusão do fator peso na análise da eficiência balística do material, criando um resultado final que abrange todos os fatores considerados importantes para a eficiência balística.

Tabela 19 – Relação global das Deformações por Energia por DSUP

Tipo do CP	Def/(En/DSup) (mm.g/(kJ.cm²))
Cer + CT + Al	32,06
Cer + CA + Al	32,21
Cer + CF + Al	32,27
Cer + Al	35,23
Cer + RamiPuro + Al	36,19
Cer + AramPuro + Al	40,09
TA + Cer + CT + 3TA	53,72
TA + Cer + CT + 2TA	58,17
TA + Cer + CT + TA	61,30
TA + Cer + CF + TA	65,66
TA + Cer + Resina + TA	80,54

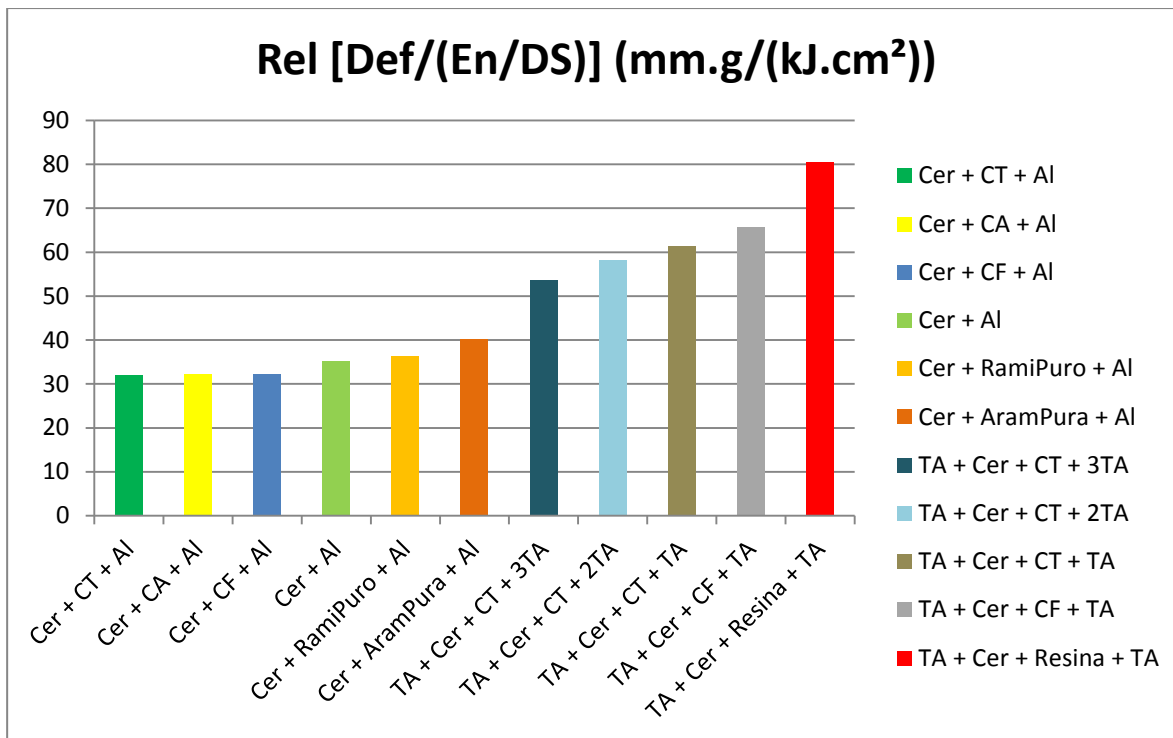


Figura 74 – Gráfico comparativo das Deformações por Energia por DSup dos CPs.

É interessante notar que os dois piores resultados desse gráfico global (TA+Cer+CF+TA e TA+Cer+Resina+TA) são justamente aqueles que foram reprovados pela NIJ 0101.04 no critério da deformação limite de 44 mm.

4.2.2 MEDIÇÃO DA ENERGIA CINÉTICA ABSORVIDA (SEM PLASTILINA)

Neste tópico será abordado um tipo diferente de ensaio balístico. Até então esteve-se analisando aqueles testes de tiro onde o CP estava sempre apoiado sobre um material de apoio, e no qual se realizam verificações da profundidade do trauma gerado pelo disparo. Agora analisam-se os ensaios sem plastilina, onde o CP fica preso numa estrutura que permite a passagem total do projétil para além dele, com o objetivo de se medir a energia cinética absorvida pelo material por ocasião da sua total perfuração. Os três dados de entrada são: velocidade de impacto, velocidade pós-perfuração e massa do projétil. O dado de saída é a energia cinética que foi retida pelo CP no ato do atravessamento do projétil.

Os dados coletados e resultados estão listados na Tabela 20, onde ECA é a Energia Cinética Absorvida pela peça testada.

Tabela 20 - Média das ECAs das amostras

Tipo do CP						
CF	Vel de Impacto (m/s)	Vel Pós-perfuração (m/s)	En Cin Entrada (J)	En Cin Saída (J)	En Cinética Abs (J)	Média ECA (J)
1	833,96	808,09	3244,457	3046,289	198,168	195,046
2	840,89	816,92	3298,603	3113,226	185,376	
3	841,51	815,25	3303,469	3100,511	202,958	
4	842,21	817,2	3308,967	3115,361	193,606	
5	843,83	816,98	3321,709	3113,684	208,025	
6	834,88	810,95	3251,620	3067,890	183,730	
7	849,17	824,39	3363,883	3170,422	193,461	
CT	Vel de Impacto (m/s)	Vel Pós-perfuração (m/s)	En Cin Entrada (J)	En Cin Saída (J)	En Cinética Abs (J)	Média ECA (J)
1	849,06	833,26	3363,012	3239,013	123,999	192,428
2	843,76	809,85	3321,158	3059,573	261,585	
3	839,08	807,87	3284,418	3044,631	239,787	
4	835,76	815,83	3258,478	3104,924	153,554	
5	839,05	815,31	3284,183	3100,967	183,216	
Cer	Vel de Impacto (m/s)	Vel Pós-perfuração (m/s)	En Cin Entrada (J)	En Cin Saída (J)	En Cinética Abs (J)	Média ECA (J)
1	849,88	470,71	3369,511	1033,614	2335,897	1919,792
2	851,45	651,08	3381,972	1977,518	1404,454	
3	849,56	537,54	3366,974	1347,948	2019,026	
Al	Vel de Impacto (m/s)	Vel Pós-perfuração (m/s)	En Cin Entrada (J)	En Cin Saída (J)	En Cinética Abs (J)	Média ECA (J)
1	840,02	809,86	3291,781	3059,649	232,132	242,259
2	842,87	811,82	3314,155	3074,476	239,679	
3	845,12	815,10	3331,873	3099,370	232,503	
4	850,77	817,51	3376,572	3117,725	258,847	
5	845,58	813,52	3335,501	3087,366	248,135	

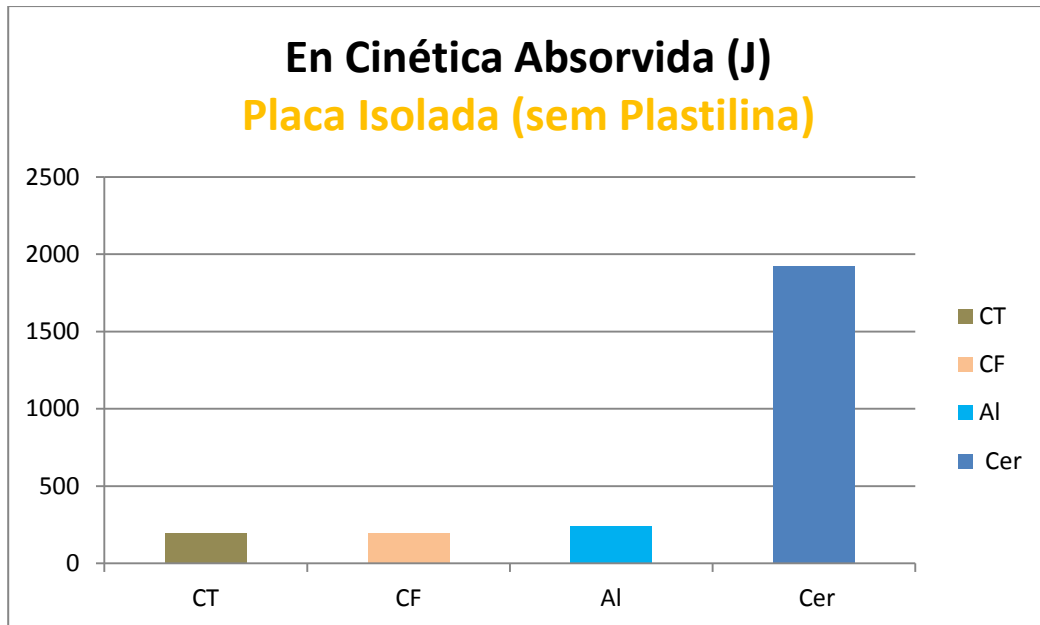
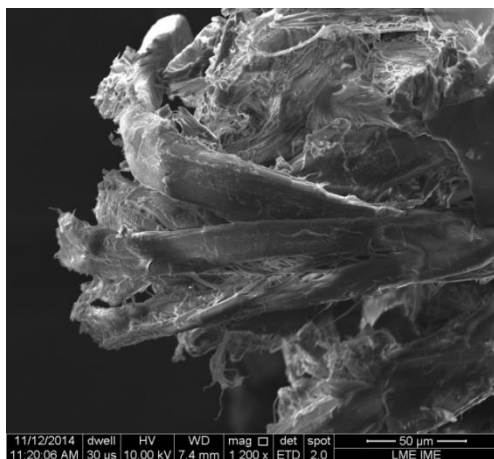
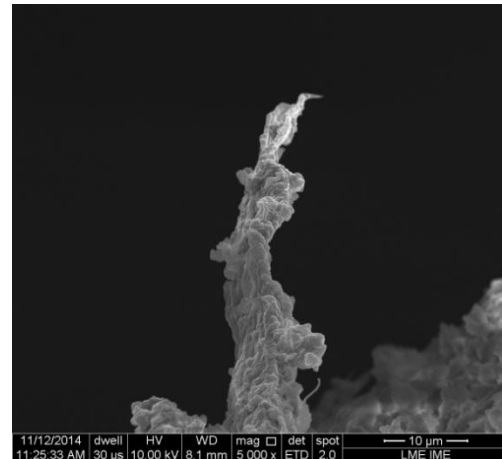


Figura 75 – Gráfico comparativo das ECAs das peças.

Na Fig. 76, vê-se a imagem do MEV da placa CF na zona do furo criado pela munição ao atravessar completamente o compósito. Nas duas fotos pode-se constatar que as fibras estão esticadas numa direção específica, devido ao esforço trativo que sofreram no ato da passagem do projétil. Porém, o mais marcante é o aspecto disforme da resina, como uma massa que foi moldada aleatoriamente, e que se assemelha aos materiais poliméricos que se fundiram em altíssima velocidade e em seguida se solidificaram rapidamente. Isso faz grande sentido, dado que o projétil atravessa o CP em altíssima velocidade e em elevada temperatura.



(a)



(b)

Figura 76 (a,b) - Placa CF na zona do furo do tiro vazado.

Segundo informações fornecidas pela equipe de testes da Linha IV do CAEx, nos diversos ensaios realizados ao longo dos últimos anos com o tiro de 7,62 mm M1 a 15 m do alvo, nas ocasiões em que os disparos eram realizados diretamente sobre a plastilina pura (sem nenhum CP fixado nela), constatava-se uma perda média de aproximadamente 5 m/s na velocidade do projétil, considerando-se a diferença entre as velocidades imediatamente antes e imediatamente depois da estrutura que continha essa massa de apoio.

Trazendo essa valiosa informação do CAEx para o nosso estudo em particular, onde os ensaios tiveram exatamente as mesmas características dos ensaios citados (tiro de 7,62 mm M1 a 15 m do alvo), pode-se estimar o valor da energia cinética média absorvida (ECA) pela plastilina isolada. Ao longo dos diversos disparos realizados para este trabalho, foi observado ao final uma velocidade média de impacto no CP de aproximadamente 840 m/s. Sabendo que a massa do projétil é de 9,33 g, e considerando que a velocidade pós-plastilina seria de 835 m/s (pois perde em média 5 m/s), pode-se obter a ECA média em questão. Após os cálculos, utilizando a fórmula da energia cinética, obtém-se:

$$ECA_{\text{plastilina isolada}} = 39,07 \text{ joules}$$

Tabela 21 – ECAs das peças

En Cinética Abs	
Peça	Média ECA (J)
CT	192,43
CF	195,05
Al	242,26
Cer	1919,79
Plastilina	39,07

Tabela 22 – Média do Ganho Sinérgico Mínimo

Tipo da Configuração	Somatório En Cin das Peças (J)	En Cinética Neutralizada no tiro real (J)	Porcentagem de Ganho Sinérgico Mínimo (%)	Média do Ganho Sinérgico Mínimo (%)
Cer + Al (+Plastilina)	2201,12	3200,7	45,41	39,30
Cer + CT + Al (+Plastilina)	2393,55	3187,0	33,15	
Cer + CF + Al (+Plastilina)	2396,17	3262,0	36,13	
Cer + CT (+Plastilina)	2151,29	3100,7	44,13	
Cer + 2CT (+Plastilina)	2343,72	3226,4	37,66	

Para os cinco casos avaliados na Tabela 22, observamos um ganho sinérgico de no mínimo 33,15%, o que é um resultado impressionante, pois esse valor adicional, que não é inexpressivo, vem simplesmente do fato de se unir diferentes objetos, de forma planejada e coerente, e tratá-los como uma unidade. A adição da energia vem do fato de a junção de diferentes peças produzir uma “peça” inteiramente nova, com características únicas e que não podem ser preditas apenas pela “soma” das propriedades de cada item em separado. Trata-se realmente de algo interessante e digno de nota.

Denomina-se o resultado mais à direita na Tabela 22 de “Porcentagem de Ganho Sinérgico *Mínimo*”, e não apenas “Porcentagem de Ganho Sinérgico”, porque na execução dos tiros reais, mesmo naqueles em que o CP era atravessado, a camada de plastilina não era totalmente perfurada até o fim, ou seja, até o outro lado do suporte no qual ela ficava acondicionada. Com isso, a plastilina não chegou a consumir todos os 39,07 joules que são necessários para atravessá-la por completo, devido também ao fato de a ponta do projétil ter sido destruída durante a penetração na pastilha cerâmica. Esse mesmo raciocínio é válido para a placa de alumínio utilizada como a peça de fundo dos três primeiros CPs da tabela citada, pois esse item se deformava mas não se rompia, indicando que ele também não recebeu um saldo de energia num nível que fosse suficiente para perfurá-lo totalmente. Sendo assim, o ganho sinérgico real foi um valor um pouco acima do apresentado na tabela, pois pelo menos um dos itens do conjunto não foi atravessado, considerando-se que a energia cinética absorvida por cada peça em particular sempre se referia à perfuração total.

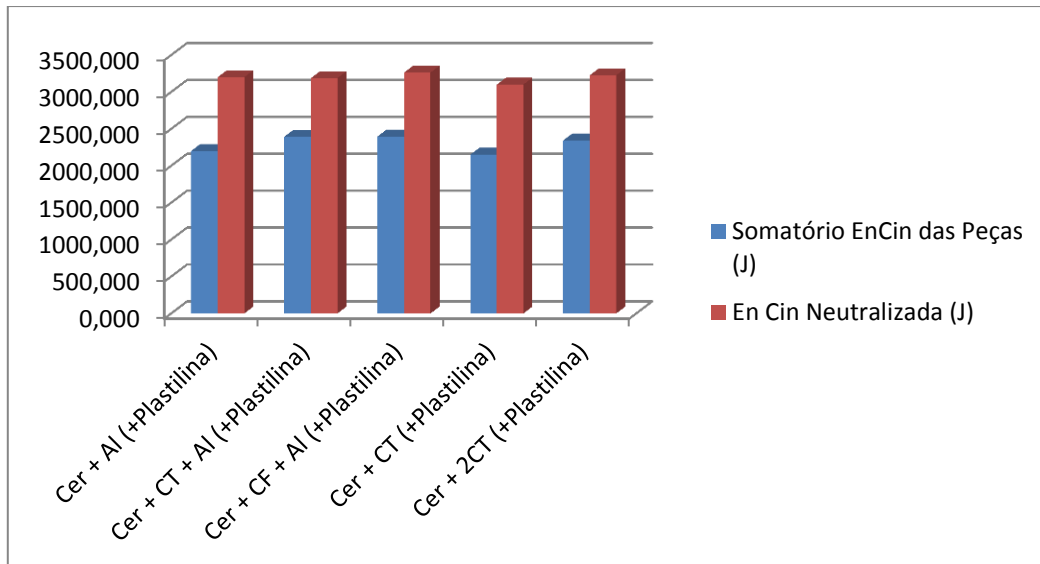


Figura 77 – Comparação entre as energias neutralizadas no ensaio e o somatório das energias individuais.

Conforme já visto na parte da revisão bibliográfica, a sinergia é algo que possibilita o todo ser maior do que a soma de suas partes. Vê-se aqui nessa análise que isso tem aplicação prática na blindagem balística (Fig. 77), onde os seguintes fatores influenciaram e geraram o efeito sinérgico observado:

- a) A quantidade de camadas ou de tipos de materiais usados;
- b) A espessura e a área de cada um desses componentes;
- c) As características e propriedades intrínsecas de cada material do conjunto;
- d) A ordem na qual essas camadas são montadas; e
- e) As características da aderência promovida entre elas.

Conforme já comentado, existe um motivo para que cada tipo de CP fosse montado com os tipos de materiais que foram usados, com suas espessuras e principalmente com a sequência específica de empilhamento que foi adotada. Após o início do processo do impacto dinâmico no alvo, cada peça constituinte agiu de uma maneira diferente, com a sua função específica, possibilitando que todo o conjunto atuasse num verdadeiro “trabalho de equipe”, harmonioso e sinérgico.

5 CONCLUSÕES

- 1) A análise das imagens das superfícies de fratura obtidas pelo MEV demonstraram que o modo de fragmentação predominante nos corpos cerâmicos, empregados nos ensaios balísticos, foi de natureza *intergranular*, o que possibilitou maior consumo de energia na propagação dinâmica das trincas;
- 2) Nos ensaios balísticos sobre a plastilina, dos 15 (quinze) diferentes tipos de CPs testados, houve 11 (onze) que não foram atravessados pelos disparos. Desses 11, os dois seguintes foram reprovados pelo critério da assinatura balística acima dos 44 mm: TA+Cer+Resina+TA e TA+Cer+CF+TA. Dentre os 09 restantes que atenderam aos dois critérios da NIJ 0101.04, o melhor resultado (menor indentação) foi o Cer+CT+Al, e o menos favorável foi o TA+Cer+CT+TA;
- 3) Considerando ainda os resultados dos 11 (onze) CPs sobre a plastilina que não foram atravessados pelos projetis, ficou evidente o papel fundamental da placa de alumínio (**Al**) como elemento que proporcionou os melhores resultados de assinatura balística. Dentre os 09 CPs que receberam a aprovação NIJ, os 06 melhores resultados (menores assinaturas balísticas) tinham em suas estruturas a **Al** como a última camada. Em contrapartida, os 03 piores resultados dentre os aprovados NIJ, juntamente com os outros 02 CPs que foram reprovados devido à assinatura acima dos 44 mm, foram todos confeccionados sem a **Al**, evidenciando a grande influência da presença dessa peça no resultado final de deformação na plastilina;
- 4) Nos ensaios sobre a plastilina, dentre os 15 (quinze) diferentes tipos de CPs testados, houve 04 (quatro) que foram totalmente atravessados pelos disparos: Cer+CT, Cer+2CT, TA+Cer+CF+RamiPuro e TA+Cer+Bloco4TA. Além da perfuração, estas estruturas tiveram a sua deformação média bem acima dos 44 mm. Tais configurações não incluíram a placa de alumínio, o que mais uma vez evidenciou a importância da presença do referido metal;
- 5) O tecido de rami teve melhores resultados de proteção balística do que a aramida, seja seco ou em placa compósita, quando posicionado como o “recheio” dos CPs do tipo Cer+(recheio)+Al. Porém, quando colocado ao

fundo da estrutura, no papel de última peça do CP, a aramida teve um desempenho muito melhor do que o rami em tecido, revelando assim a sua maior capacidade de retenção de fragmentos;

- 6) Observando de forma indistinta os CPs que foram aprovados pela Norma NIJ 0101.04 em seus dois critérios, e considerando apenas o fator peso, os três melhores resultados deste trabalho são as estruturas que advêm dos seguintes CPs: Cer+Al (1º), TA+Cer+CT+TA (2º) e TA+Cer+CT+2TA (3º);
- 7) Observando de forma indistinta os CPs que foram aprovados pela Norma NIJ 0101.04 em seus dois critérios, e considerando eminentemente o fator peso, mas levando em conta também a operacionalização tática do produto final (proteção da tropa), os três melhores resultados deste trabalho são as estruturas que advêm dos seguintes CPs: TA+Cer+CT+TA (1º), Cer+Al com um nível de TA sobreposto (2º) e TA+Cer+CT+2TA (3º);
- 8) O melhor resultado desse estudo, na análise que considera de forma global todos os quesitos de importância na blindagem (deformação/energia e peso), é o produto confeccionado a partir da estrutura do CP do tipo Cer+CT+Al. O pior resultado geral ficou com a configuração do tipo TA+Cer+Resina+TA, o que ressaltou o fato de que a inclusão do reforço da fibra na matriz epoxídica melhorou sobremaneira a resistência mecânica à penetração balística da blindagem multicamada;
- 9) Os CPs que não se romperam nos ensaios balísticos com plastilina, independentemente do valor da profundidade do trauma gerado, podem potencialmente ser empregados como blindagem multicamada para proteger viaturas militares;
- 10) Os testes balísticos realizados nas camadas individuais demonstraram que a placa cerâmica possui uma capacidade de absorção de energia de oito a dez vezes superior àquela das demais camadas isoladas, o que evidencia o papel relevante do cerâmico na proteção balística; e
- 11) Foi observado, pela comparação entre os ensaios balísticos realizados, o efeito sinérgico advindo da junção apropriada de diferentes materiais, onde se constatou que a capacidade de absorção da energia cinética do conjunto é maior do que a soma das capacidades de absorção de cada componente isoladamente.

6 SUGESTÕES

Em face dos resultados e das observações realizadas ao longo deste trabalho, sugere-se para trabalhos futuros:

- 1) A realização do ensaio em Barra Hopkinson com amostras feitas de materiais utilizados nos CPs desta dissertação, de forma a se obter as principais propriedades dinâmicas dos materiais envolvidos. Tal levantamento de dados será útil para, entre outras coisas, obter-se valores de pressão e velocidade de partícula dos ensaios balísticos, através da modelagem dos impactos sobre os alvos pela técnica do *casamento de impedância*;
- 2) A realização de novos ensaios balísticos em compósitos fibra-resina confeccionados com a aplicação do poliéster como matriz, em substituição ao epóxi, para fins de comparação;
- 3) A realização de novos ensaios balísticos em compósitos fibra-resina confeccionados com outras porcentagens em volume de fibra de rami (em manta e em tecido), tais como 20%, 40% e 50%, de forma a comparar os resultados entre si;
- 4) A realização de novos ensaios balísticos em compósitos fibra-resina confeccionados com a fibra natural de *malva*, em substituição ao rami, para fins de comparação, em virtude das excelentes propriedades mecânicas que a malva possui;
- 5) A realização de ensaios adicionais de medição da ECA em outros elementos de CP, tais como o TA, o CA e a placa de resina pura, de forma a complementar os estudos feitos sobre o efeito sinérgico balístico advindo da junção apropriada de diferentes materiais; e
- 6) A realização de novos ensaios balísticos com os CPs montados sobre superfícies que sejam similares às superfícies externas de viaturas militares, e não mais sobre a plastilina. O objetivo deste novo ramo de estudo seria investigar novas combinações de materiais que proporcionem proteção efetiva para as unidades móveis especificamente, avaliando-se os tipos de estrutura que, na prática, proporcionam a desejada eficiência de blindagem.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ABNT NBR 6220. **Material refratário denso – determinação da densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida**, 2ª edição, 2011.

AFSHARI, M.; CHEN, P.; KOTEK, R. **Relationship Between Tensile Properties and Ballistic Performance of Poly (ethylene naphthalate) Woven and Nonwoven Fabrics**. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 125, 2271–2280, Wiley Periodicals, Inc., 2012.

AJDELSZTAJN, L.; BASTIAN, F.L. **Desenvolvimento de Proteções Balísticas compostas por resina epóxi reforçada por fibra de vidro e Placas de Alumina**. *XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - Águas de Lindóia, SP*, 1999.

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

CALLISTER Jr., William D. **Materials science and engineering: an introduction**. 8ª ed. New York, John Wiley & Sons, Inc, 2007.

CARDOSO, André Luís de V. **Caracterização dinâmica por impacto de cerâmicos à base de alumina**. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, **Materiais Avançados 2010-2022**, Brasília-DF, 2010.

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

FARUK, O. et al. **Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010**. *Progress in Polymer Science* 37, pp.1552– 1596, 2012.

GHASEMNEJAD, H. et al. **To improve impact damage response of single and multi-delaminated FRP composites using natural flax yarn**. *Materials and Design* 36; 865–873, 2012.

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

GOPINATH, G.; ZHENG, J.Q.; BATRA, R.C. **Effect of matrix on ballistic performance of soft body armor.** Composite Structures 94; 2690–2696, 2012.

HOSUR, M.V. et al. **Performance of stitched/unstitched woven carbon/epoxy composites under high velocity impact loading.** Composite Structures 64, pp. 455–466, 2004.

JACOBS, M.J.N.; J.L.J.V. DINGENEN. **Ballistic protection mechanisms in personal armour.** Journal of Materials Science 36, pp.3137 – 3142, 2001.

KRISHNAN, K. et al. **Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact.** Composites: Part B 41, pp.583–593, 2010.

LI, Y. et al. **Helium plasma treatment of ethanol-pretreated ramie fabrics for improving the mechanical properties of ramie/polypropylene composites.** Industrial Crops and Products 51; 299– 305, 2013.

LOURO, L.H.L.; GOMES, A. V.; COSTA, C. R. C. **Dynamic fragmentation of alumina with additions of niobia and silica under impact.** *19th International symposium of ballistics.* Interlaken, Switzerland: s.n., 2001.

LOURO, L.H.L.; LINDFORS, A.; MEYERS, M.A. **Stress-wave-induced damage in alumina.** *Journal de Physique, Colloque C3, Supplément au n°9, Tome 49,* 1988.

LOURO, L.H.L.; MEYERS, M.A. **Effect of stress state and microstructural parameters on impact damage of alumina-based ceramics.** Journal of Materials Science 24; pp. 2516-2532, 1989.

MARGEM, F.M.; NETO, J.B.; MONTEIRO, S.N. **Ensaio de Impacto Izod de Compósitos com Matriz Epóxi Reforçadas com Fibras Contínuas de Rami.** *65º Congresso Anual do Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, Rio de Janeiro,* 2010.

MARSYAHYO, E. et al. **Preliminary Investigation on Bulletproof Panels Made from Ramie Fiber Reinforced Composites for NIJ Level II, IIA, and IV.** Journal of Industrial Textiles, Vol. 39 — pp. 13-26, 2009.

MATTOSO, L.H.C. et al. **Utilização de fibras vegetais para reforço de plásticos.** EMBRAPA, PA/3, CNPDIA, pp.1-4, 1996.

MEDVEDOVSKI, Eugene. **Lightweight ceramic composite armour system**. Advances in Applied Ceramics, Vol.105, nº 5; pp. 241-245, 2006.

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

MOHAN, S.; VELU, S. **Ballistic impact behaviour of unidirectional fibre reinforced composites**. International Journal of Impact Engineering 63, pp.164-176, 2014.

MONTEIRO, S.N. et al. **Natural Lignocellulosic Fibers as Engineering Materials - An Overview**. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, Vol. 42A, pp.2963-2974, 2011.

MONTEIRO, S.N. et al. **Natural-Fiber Polymer-Matrix Composites: cheaper, tougher, and environmentally friendly – An overview**. JOM – A Publication of The Minerals, Metals & Materials Society; Vol. 61, nº1, pp.17-22, 2009.

MONTEIRO, S.N.; MARGEM, F.M.; SANTOS Jr, L.F.L. **Tenacidade ao Impacto Charpy de Compósitos Epoxídicos Reforçados com Fibras de Rami**. 64º Congresso Anual do Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, Belo Horizonte, 2009.

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.

OLIVEIRA, Antônia Lourdenelle M. **Composição química do rami (*boehmeria nivea, gaud.*) submetido à adubação orgânica e a diferentes intervalos de cortes**. Revista da FZVA; Uruguiana, v.14, n.1, p. 53-68; 2007.

PANDYA, K.S. et al. **Stress wave attenuation in composites during ballistic impact**. Polymer Testing 31; 261–266, 2012.

PARK, J. et al. **Interfacial evaluation of single Ramie and Kenaf fiber/epoxy resin composites using micromechanical test and nondestructive acoustic emission**. *Composite Interfaces*, Vol. 13, nº. 2-3, pp. 105–129, 2006.

PETRULYTE, S.; DAPSAUSKAITE, D.; VELICKIENE, A.; PETRULIS, D. **Investigation of the Resistance to Pile Loop Extraction of Linen and Ramie Fabrics**. FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe; 21, 5(101): 54-58; 2013.

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

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

SHALWAN, A.; YOUSIF, B.F. **In State of Art: Mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres**. *Materials and Design* 48; 14–24, 2013.

SOARES, Isabel Maria, **Produção e Caracterização de Compósitos de Matriz Epóxi reforçada com Fibra de Rami para fins de Reforço Estrutural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

TASDEMIRCI, A.; HALL, I.W. **Development of novel multilayer materials for impact applications: a combined numerical and experimental approach**. *Materials and Design* 30, pp.1533–1541, 2009.

TRACY, C. et al. **Ceramic fracture during ballistic impact**. *Ceramic Research Division*. Watertown, MA, EUA : s.n., 1986. pp. 3-10, 1986.

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*, pp. 71-79, 2013.

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

WESTIN, Johan. **Ballistic Impact Properties of Fibre-reinforced Composite Structures**. A master thesis work in cooperation with FOI and KTH, 2011.

ZHOU, N. et al. **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* 56; 1–8, 2014.

ZUKAS, J.A., NICHOLAS, T., SWIFF, H., CURRAN, D. **Impact dynamics**. John Wiley & Sons, New York, 1982.

Links e sites na internet (todos acessados em Julho/2014):

<http://www.significados.com.br/sinergia>

Fig.01: <http://en.wikipedia.org/wiki/Ramie#mediaviewer/File:Ramieoutput.png>

Fig.02: <http://fm-textile.wikispaces.com/Section+1.1C>

Fig.03: <http://www.cnseed.org/chinese-boehmeria-seeds-herb-ramie-seeds.html>

8 – APÊNDICES

8.1 -Apêndice 1: FICHA DE INFORMAÇÃO TÉCNICA DO ADESIVO ULTRA FLEX

 ITW PERFORMANCE POLYMERS & FLUIDS _®	ITW PPF BRASIL ADESIVOS LTDA Rua Antônio Felisbino, 430 Ushichos SP CEP: 13287-452 Fones/Fax: (19) 2138.7600 www.itwppf.com.br contato@itwppf.com.br EMERGÊNCIA: 0800 014 8110 OSATOX	ULTRA FLEX CURA RÁPIDA ADESIVO DE POLIURETANO
---	--	--

FITPQ - FICHA DE INFORMAÇÃO TÉCNICA DE PRODUTO QUÍMICO

PRODUTO

Ultra Flex Cura Rápida Adesivo de Poliuretano é um adesivo elástico à base de poliuretano monocomponente, de alta viscosidade, para diversas aplicações de colagem e de vedação, com ótima propriedade de não escorrimto (*non-sag*), que cura ao entrar em contato com a umidade ambiente, formando um elastômero de alta resistência. De tecnologia totalmente nacional, o **Ultra Flex Cura Rápida Adesivo de Poliuretano** atende aos padrões de qualidade das diversas áreas da indústria automobilística, naval, blindagens, etc, equiparando-se aos similares importados.

PROPRIEDADES GERAIS

Constituição química básica:	Poliuretano monocomponente à base de MDI
Cor:	Preto
Densidade antes de curar:	1,3 g/cm ³
Estabilidade (non-sag/não escorrimto):	Muito boa
Sistema de cura:	Com umidade atmosférica
Tempo de formação de película (*):	Aproximadamente 15 minutos
Velocidade de cura (*):	3 mm/24h
Contração de volume:	< 3%
Dureza Shore A:	Aproximadamente 45
Resistência à tração:	16,3 N/mm ²
Alongamento até ruptura:	> 300%
Resistência elétrica:	Aproximadamente 10 ¹⁰ ohms.cm
Validade (armazenamento abaixo de 25°C):	12 meses

(*): temperatura de 25°C e umidade relativa de 50%

Os dados contidos nesta Ficha Técnica são referenciais. Gentileza contatar nosso Departamento Técnico para assistência e recomendações específicas para a sua aplicação. Fone: 11 4433 8899

8.2 -Apêndice 2: REGISTRO DE DADOS NUMÉRICOS DO RADAR – EXEMPLO 1

```

W E I B E L   S C I E N T I F I C   WinDopp 1.2.0.121
-----
          DATE          TIME          CHANNEL          ROUND
        140924        13:44:04           1             2
  
```

Colaboracao IME

Velocity versus time and results based on regression analysis.

=====

(Adjusted results.)

No	Time sec.	Velocity m/s.	Distance m.	Accl. m/s/s	Retard. m/s/m	S/N dB	Used
Muzz	0.000000	833.182	0.00	-653.360	0.7842	15.06	32
1	0.006298	829.068	5.23	-653.360	0.7881	14.77	*
2	0.006697	828.807	5.57	-653.360	0.7883	15.38	*
3	0.007097	828.546	5.90	-653.360	0.7886	15.51	*
4	0.007496	828.285	6.23	-653.360	0.7888	15.39	*
5	0.007895	828.024	6.56	-653.360	0.7891	15.18	*
6	0.008295	827.763	6.89	-653.360	0.7893	15.02	*
7	0.008694	827.502	7.22	-653.360	0.7896	14.94	*
8	0.009094	827.241	7.55	-653.360	0.7898	14.96	*
9	0.009493	826.980	7.88	-653.360	0.7901	15.10	*
10	0.009892	826.719	8.21	-653.360	0.7903	15.41	*
11	0.010292	826.458	8.54	-653.360	0.7906	15.97	*
12	0.010691	826.197	8.87	-653.360	0.7908	16.75	*
13	0.011090	825.937	9.20	-653.360	0.7911	17.65	*
14	0.011490	825.676	9.53	-653.360	0.7913	18.46	*
15	0.011889	825.415	9.86	-653.360	0.7916	19.11	*
16	0.012288	825.154	10.19	-653.360	0.7918	20.40	*
17	0.012688	824.893	10.52	-653.360	0.7921	20.27	*
18	0.013087	824.632	10.85	-653.360	0.7923	19.32	*
19	0.013486	824.371	11.18	-653.360	0.7926	17.66	*
20	0.013886	824.110	11.51	-653.360	0.7928	16.08	*
21	0.014285	823.849	11.84	-653.360	0.7931	15.09	*
22	0.014685	823.588	12.16	-653.360	0.7933	14.51	*
23	0.015084	823.327	12.49	-653.360	0.7936	14.01	*
24	0.015483	823.066	12.82	-653.360	0.7938	13.99	*
25	0.015883	822.805	13.15	-653.360	0.7941	13.42	*
26	0.016282	822.544	13.48	-653.360	0.7943	12.78	*
27	0.016681	822.284	13.81	-653.360	0.7946	12.11	*
28	0.017081	822.023	14.14	-653.360	0.7948	11.44	*
29	0.017480	821.762	14.46	-653.360	0.7951	10.85	*
30	0.017879	821.501	14.79	-653.360	0.7953	10.41	*
31	0.018279	821.240	15.12	-653.360	0.7956	10.10	*
32	0.018678	820.979	15.45	-653.360	0.7958	9.80	*

8.3- Apêndice 3: REGISTRO DE DADOS NUMÉRICOS DO RADAR – EXEMPLO 2

W E I B E L S C I E N T I F I C WinDopp 1.5.2.29

 DATE TIME CHANNEL ROUND
 141105 11:18:17 1 6

Colabora

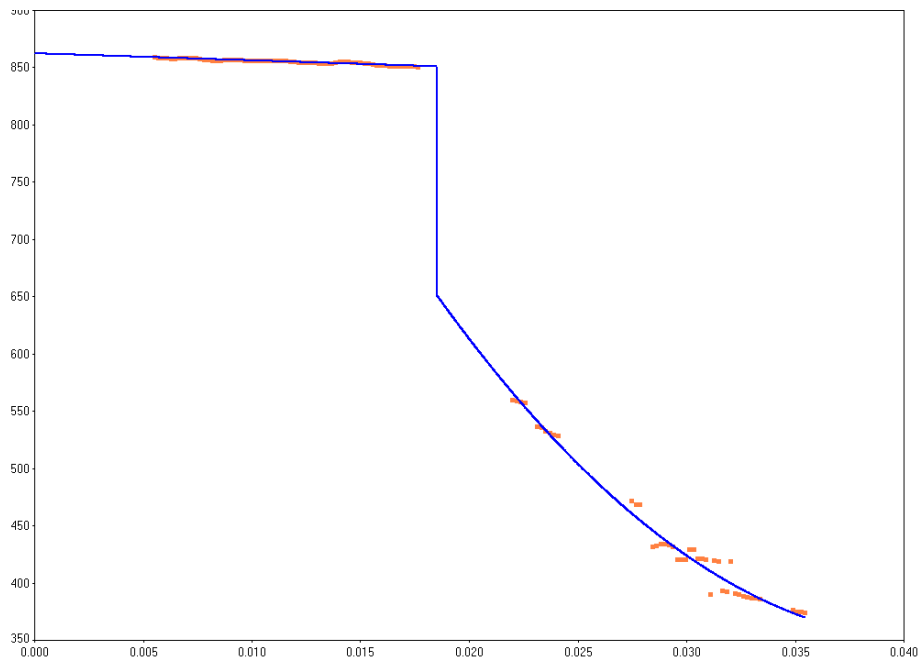
Velocity versus time and results based on regression analysis.

=====

(Adjusted results.)

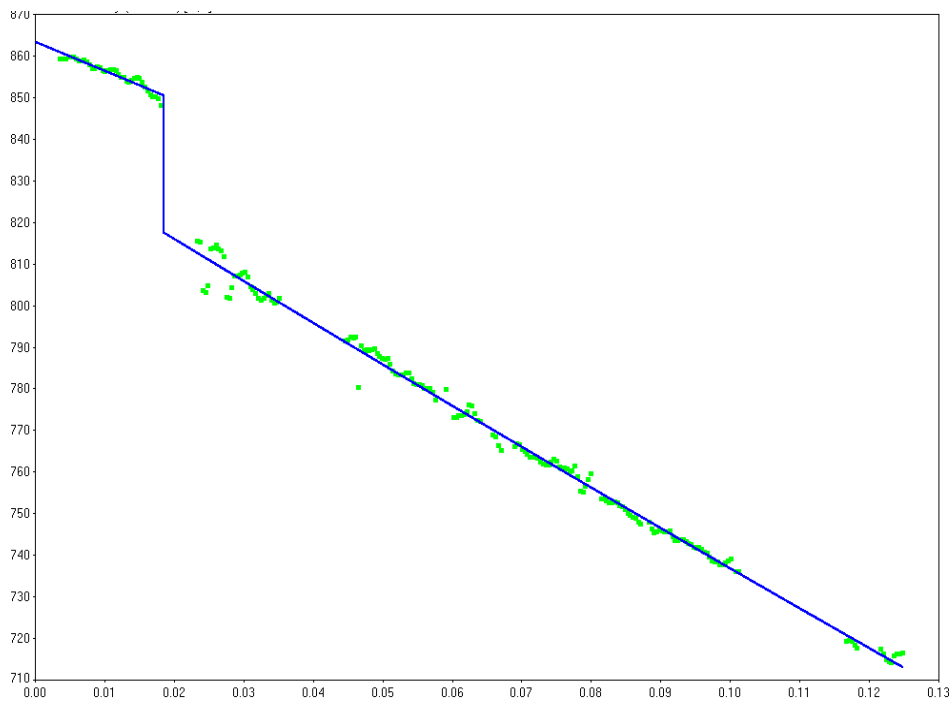
No	Time sec.	Velocity m/s.	Distance m.	Accl. m/s/s	Retard. m/s/m	S/N dB	Used
Muzz	0.000000	869.249	0.00	-665.047	0.7651	25.99	30
1	0.003618	866.842	3.14	-665.047	0.7672	23.42	*
2	0.004003	866.586	3.47	-665.047	0.7674	23.58	*
3	0.004388	866.330	3.81	-665.047	0.7677	23.73	*
4	0.004773	866.074	4.14	-665.047	0.7679	24.64	*
5	0.005158	865.818	4.47	-665.047	0.7681	22.47	*
6	0.005543	865.562	4.81	-665.047	0.7683	24.22	*
7	0.005928	865.306	5.14	-665.047	0.7686	25.81	*
8	0.006313	865.050	5.47	-665.047	0.7688	26.72	*
9	0.006698	864.794	5.81	-665.047	0.7690	26.88	*
10	0.007083	864.538	6.14	-665.047	0.7693	27.68	*
11	0.007468	864.282	6.47	-665.047	0.7695	28.44	*
12	0.007853	864.026	6.81	-665.047	0.7697	29.45	*
13	0.008238	863.770	7.14	-665.047	0.7699	28.01	-
14	0.008623	863.514	7.47	-665.047	0.7702	25.90	*
15	0.009008	863.258	7.80	-665.047	0.7704	24.62	*
16	0.009393	863.002	8.14	-665.047	0.7706	25.43	*
17	0.009777	862.746	8.47	-665.047	0.7708	27.52	*
18	0.010162	862.490	8.80	-665.047	0.7711	29.12	*
19	0.010547	862.234	9.13	-665.047	0.7713	28.60	*
20	0.010932	861.978	9.46	-665.047	0.7715	28.12	-
21	0.011317	861.722	9.79	-665.047	0.7718	27.51	-
22	0.011702	861.466	10.13	-665.047	0.7720	26.00	*
23	0.012087	861.210	10.46	-665.047	0.7722	27.90	*
24	0.012472	860.954	10.79	-665.047	0.7725	30.55	*
25	0.012857	860.698	11.12	-665.047	0.7727	30.60	*
26	0.013242	860.442	11.45	-665.047	0.7729	26.65	*
27	0.013627	860.186	11.78	-665.047	0.7731	26.18	*
28	0.014012	859.930	12.11	-665.047	0.7734	23.82	-
29	0.014397	859.674	12.45	-665.047	0.7736	17.72	-
30	0.014782	859.418	12.78	-665.047	0.7738	15.26	-
31	0.015167	859.162	13.11	-665.047	0.7741	21.78	*
32	0.015552	858.906	13.44	-665.047	0.7743	27.62	*
33	0.015937	858.650	13.77	-665.047	0.7745	26.79	*
34	0.016321	858.394	14.10	-665.047	0.7748	25.41	*
35	0.016706	858.138	14.43	-665.047	0.7750	22.57	*
36	0.017091	857.882	14.76	-665.047	0.7752	19.52	*
37	0.017476	857.626	15.09	-665.047	0.7755	15.76	-
38	0.017861	857.370	15.42	-665.047	0.7757	12.98	-
39	0.018246	857.114	15.75	-665.047	0.7759	10.76	-

8.4 - Apêndice 4: REGISTRO DE DADOS DO RADAR EM GRÁFICO



Exemplo 1 – Perfil da velocidade do projétil antes e depois do corpo cerâmico

Gráfico Velocidade Radial em m/s (ordenada) x Tempo em seg



Exemplo 2 – Perfil da velocidade do projétil antes e depois da placa de alumínio

Gráfico Velocidade Radial em m/s (ordenada) x Tempo em seg