



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CAMPUS II**  
**PPGEM - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. MECÂNICA**



# **PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DE UM COMPÓSITO PARA BLINDAGEM BALÍSTICA**

**WANDERLEY FERREIRA DE AMORIM JÚNIOR**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**MAIO - 2002**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

# **Estudo de um Compósito para Blindagem Balística**

**Autor: Wanderley Ferreira de Amorim Júnior  
Orientadores: Prof. Marco Antonio dos Santos  
Prof. Fernando Luiz Bastian**

Campina Grande, maio de 2002

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

# **Estudo de um Compósito para Blindagem Balística**

**Autor: Wanderley Ferreira de Amorim Júnior**  
**Orientadores: Prof. Marco Antonio dos Santos**  
**Prof. Fernando Luiz Bastian**

**Curso: Engenharia Mecânica**  
**Área de Concentração: Materiais e Processo de Fabricação**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campina Grande, maio de 2002.  
PB - Brasil



A524e Amorim Júnior, Wanderley Ferreira de.  
Estudo de um compósito para blindagem balística /  
Wanderley Ferreira de Amorim Júnior. - Campina Grande,  
2002.  
127 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -  
Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e  
Tecnologia, 2002.  
"Orientação : Prof. Dr. Marco Antonio dos Santos, Prof.  
Dr. Fernando Luiz Bastian".  
Referências.

1. Blindagem Balística. 2. Compósito Balístico. 3.  
Impacto Balístico. 4. Fragmentação. 5. Dissertação -  
Engenharia Mecânica. I. Santos, Marco Antonio dos. II.  
Bastian, Fernando Luiz. III. Universidade Federal da  
Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

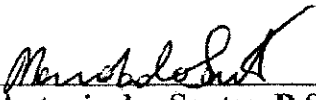
CDU 623.562.3(043)

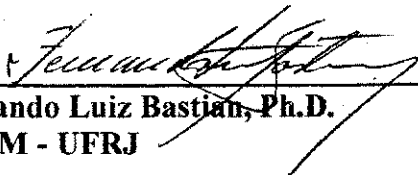
**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

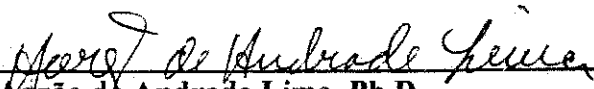
**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**


**Estudo de um Compósito para Blindagem  
Balística**

Dissertação aprovada em 27 de maio de 2002.

  
\_\_\_\_\_  
**Marco Antonio dos Santos, D.Sc**  
**Universidade Federal da Paraíba - Centro de Ciências e Tecnologia (CCT)**

  
\_\_\_\_\_  
**Fernando Luiz Bastian, Ph.D.**  
**PEMM - UFRJ**

  
\_\_\_\_\_  
**Aarão de Andrade Lima, Ph.D.**  
**Universidade Federal da Paraíba - Centro de Ciências e Tecnologia (CCT)**

  
\_\_\_\_\_  
**Laura Hecker de Carvalho, Ph.D.**  
**Universidade Federal da Paraíba - Centro de Ciências e Tecnologia (CCT)**

Campina Grande, maio de 2002.  
PB - Brasil

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais Wanderley e Joaquina, aos meus irmãos Rômulo, Tarcísio e Tibério, a minha futura esposa Helayne e a Tia Lindomar pelo apoio e incentivo durante a realização desta tese.

Ao meu primo e amigo Roberto Bruno pelo apoio dado na editoração eletrônica deste trabalho.

Aos estagiários Marcos (PqD) e Vinicius Couto pela amizade e dedicada ajuda durante a análise dos resultados.

Ao professor Luís M. Tavares pela dedicada ajuda na análise dos resultados de fragmentação deste trabalho.

Ao professor Célio Costa pela dedicada ajuda na compreensão da fractografia dos materiais usados neste trabalho .

Aos amigos da Pós – Graduação Vinicius Sousa (UFPB), Roberto Fujyama, José Maurício, Cláudio Chang, Marcelo e Rita pela amizade e carinho.

Aos técnicos da Oficina Mecânica e do Laboratório de Propriedades Mecânicas pela a amizade e a apoio durante a fabricação dos compósitos.

A professora Luciene Brauns Santos (CETIQT – SENAI) pela caracterização do feltro.

A todos que de alguma forma, e mesmo não citados aqui, colaboraram para a realização e conclusão desta tese.

## SUMÁRIO

1	Introdução	01
1.1	História	01
1.2	Evolução dos veículos blindados militares	03
1.3	Blindagem do novo veículo militar do programa FCS	06
1.4	Objetivos da pesquisa	08
1.5	Justificativa da pesquisa	08
2	Revisão da literatura	09
2.1	Conceitos básicos de balística e blindagens	09
2.2	Ondas de Tensão	11
2.2.1	Interação de Ondas de Tensão	14
2.2.2	Atenuação de ondas de choque	16
2.2.3	Relação entre a espessura e a eficiência balística de um sistema de blindagem	16
2.3	Fratura sob impacto balístico	17
2.3.1	Introdução	17
2.3.2	Fragmentação	18
2.3.2.1	Fundamentos principais	18
2.3.2.2	Populações de partículas e função de distribuição	23
2.3.2.3	Alguns aspectos de interesse na fragmentação por cominuição	26
2.3.2.4	Dano interno nos fragmentos	28
2.4	Características fractográficas da superfície de fratura	29
2.4.1	Fractografia de vidros	29





4.2.3 Resultados da análise dos fragmentos das placas de alumina coletados dos compósitos para proteção balística	100
4.2.3.1 Curvas de distribuição acumulada passante de massa e de distribuição retida dos fragmentos da cerâmica dos compósitos para proteção balística impactados	100
4.2.3.2 Relação entre a energia gasta para criar novas superfícies de fratura durante o processo de fragmentação da cerâmica ( $E_{frag}$ ) e a eficiência balística de um sistema de blindagem	103
4.2.3.3 Considerações finais sobre a eficiência balística de blindagens com diferentes Densidades Superficiais	104
4.2.4 Considerações finais da análise do dano balístico dos compósitos para blindagem	107
5. Conclusões e Sugestões	109
5.1 Conclusões	109
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	111
6. Referências Bibliográficas	112
Anexos	124

## RESUMO

Uma das combinações de blindagem balística de maior eficiência é uma placa de cerâmica colada à uma placa dúctil. O uso de materiais na interface da cerâmica com a placa dúctil é um dos modos de otimização de um sistema de blindagem balística.

Foram desenvolvidos 11 tipos de compósitos para uma blindagem de proteção balística com nível III de proteção (7,62 mm FMJ). Testaram-se diversas configurações de materiais nos compósitos: três tipos de materiais como placa de apoio (policarbonato, acrílico e polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM)), cinco tipos de materiais na interface (feltro, borracha, policarbonato alveolar, espuma de poliuretano e adesivo Sika 255FC) e três espessuras de cerâmica de alumina (8mm, 10mm, 12,7mm). Várias técnicas foram usadas com o objetivo de qualificar e quantificar o dano balístico sofrido pelos compósitos: medida de deflexão da placa dúctil, análise estereoscópica, análise granulométrica dos fragmentos das cerâmicas e medição da velocidade residual. Conclui-se que o uso adequado de materiais na interface de um sistema de blindagem cerâmica – placa dúctil polimérica, pode maximizar a sua capacidade de proteção balística. Dos compósitos estudados e sob as condições de tiro a que foram expostos, os que apresentaram melhor performance para blindagens foram as configurações que continham como material de interface o feltro e a borracha (presentes nos compósitos de cerâmica de alumina + placa de feltro + placa de PEUAPM e cerâmica de alumina + placa de borracha + placa de PEUAPM).

### *Palavras Chave:*

Blindagem balística, impacto balístico, compósito balístico, fragmentação.

## **ABSTRACT**

The combination of a ceramic plate fixed on a ductile plate is one of the best solution to ballistic protection.

Eleven types of composite plates were developed for level III (7,62 mm FMJ) of ballistic protection. Various types of materials were used as back up plate : polycarbonate, acrylic and ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE). For interface materials were selected : felt, rubber, honeycomb polycarbonate, polyurethane foam and Sika 255 adhesive. Three thickness of alumina tiles were used : 8mm, 10mm e 12,7 mm.

Various techniques were used in order to quantify and to qualify the damage caused by the ballistic impact : deflection measure of the ductile plate, stereoscopic analysis, study of particle size of ceramic fragmentation and residual velocity measure. The use of interface materials proved to be a way to otimization of the ballistic protection capacity of a light composite armor system. Two types of composite plates were selected for ballistic armor : alumina ceramic tile + felt + UHMWPE plate and alumina ceramic tile + rubber + UHMWPE plate.

### *Key Words:*

-Armor, ballistic impact, interface, composite, fragmentation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Redução futura de peso dos veículos blindados militares do exército dos Estados Unidos	05
Figura 1.2 - Evolução dos últimos 50 anos dos sistemas de blindagem contra ameaça de munição 12,7 mm (.50)	06
Figura 1.3 - Exemplo da Blindagem CIA desenvolvida pelo programa CAV. Observa claramente os seus componentes básicos	07
Figura 2.1 - Diagrama ilustrativo dos diversos tipos de onda que se formam em um simples bater de um martelo	13
Figura 2.2 - Tipos de respostas durante o impacto em placas	14
Figura 2.3 - Diagrama ilustrativo da propagação de uma onda de compressão durante um impacto balístico em uma cerâmica	14
Figura 2.4 - Impacto de um penetrador em um material- alvo	17
Figura 2.5 - Teste de queda de peso	19
Figura 2.6 - Abrasão e lascamento produzindo fragmentos com distribuição de tamanhos de muito estreitas	20
Figura 2.7 - Fratura por clivagem quando a taxa de carregamento é baixa	20
Figura 2.8 - O processo de fratura desintegrativa produzindo uma ampla gama de fragmentos	21
Figura 2.9 - Modelo de fragmentação proposto por Louro e Meyers	22
Figura 2.10 - Heterogeneidades e mecanismo de propagação de trinca na cerâmica sob compressão	23
Figura 2.11 - Valor de $\alpha$ para diversos processos de fragmentação	25
Figura 2.12- Representação da fragmentação de uma partícula	26
Figura 2.13- Ângulo de ramificação das trincas e o tipo de carregamento de fratura: (a) impacto, (b) flexão, (c) torção e (d) pressão interna	29

Figura 2.14- Representação esquemática de uma fratura típica em vidros : (a)fratura com início no interior do vidro (b) fratura com início na superfície do vidro	30
Figura 2.15- Representação esquemática das linhas de “Wallner”na superfície de fratura e a influência do estado de tensão presente na sua formação : (a) tração uniforme, (b) tração não uniforme, (c) flexão	31
Figura 2.16- Foto da superfície de fratura de uma placa de acrílico com asas de gaivotas (AG) e os rastros de ramificação (RR).	32
Figura 2.17 – Representação de uma blindagem cerâmica + fibra de aramida + epóxi	33
Figura 2.18 - Estágios de penetração em uma cerâmica	35
Figura 2.19- Trincas radiais (R) e trincas de “spall” (S) ou circunferenciais (C) em uma cerâmica de alumina impactada balisticamente	38
Figura 2.20 - Representação esquemática dos componentes básicos de uma blindagem : placa de cerâmica, camada de adesivo na interface e placa de retaguarda (metálica)	40
Figura 3.1 - Placa de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM)	47
Figura 3.2 - Placa de Policarbonato Alveolar	48
Figura 3.3 - Placa de Feltro	48
Figura 3.4 - Placa de borracha	49
Figura 3.5 - Placa de espuma de poliuretano	49
Figura 3.6 - Foto dos materiais componentes do compósito usado como blindagem	51
Figura 3.7 - Compósitos com seus respectivos materiais na interface : a)Espuma de poliuretano e b) Policarbonato alveolar	52
Figura 3.8 - Compósitos a com seus respectivos materiais na interface : a) Feltro, b) Adesivo Sika 255FC e c) Borracha	52
Figura 3.9 - Moldura de alumínio usada na confecção dos corpos de prova	53
Figura 3.10- Peso de 10N usado para melhorar a homogenização da espessura do adesivo	54
Figura 3.11 - Invólucro de Kevlar para a coleta de fragmentos da cerâmica	56
Figura 3.12 - Instrumentos usados na coleta de fragmentos	56
Figura 3.13 – Esquema do método de ensaio balístico	57
Figura 3.14 – Provede de tiro usado nos ensaios balísticos	57
Figura 3.15 - Computador de tiro responsável pelo processamento dos dados	

balísticos	58
Figura 3.16 – Alvo pronto para o impacto balístico	58
Figura 3.17 - Projétil da munição 7,62 mm comum	59
Figura 3.18 – Esquema das instalações de medição com radar DOPPLER	60
Figura 3.19 - Variação de direção do vetor velocidade	61
Figura 4.1- Gráfico energia refletida versus espessura de três tipos de adesivos elásticos ( Sika 221, 252, e 255) e um adesivo epóxi	63
Figura 4.2 - Placa de policarbonato após o impacto	64
Figura 4.3 - Superfície de fratura das trincas radiais do policarbonato	65
Figura 4.4- Superfície de fratura das trincas circunferenciais do plocarbonato	65
Figura 4.5 - Ponto de impacto do projétil na placa de policarbonato	66
Figura 4.6 - Compósito de cerâmica de alumina colada (adesivo Sika 255) a uma placa de retaguarda de acrílico de 24 mm de espessura	66
Figura 4.7 - Placa de acrílico de 24 mm após o impacto com munição do tipo 7,62 mm comum	67
Figura 4.8 - Superfície de fratura das trincas radiais da placa de acrílico	69
Figura 4.9- Superfície de fratura das trincas circunferenciais na placa de acrílico	69
Figura 4.10 - Três vistas da placa de PEUAPM perfurada por munição de 9 mm	71
Figura 4.11 - Penetração de um projétil de aço esférico em um alvo de alumínio	71
Figura 4.12 - Fratura com aparência de pétala com formato triangular e tridimensional	71
Figura 4.13 - Placa de retaguarda de PEUAPM perfurada por munição de 7.62 mm FMJ	72
Figura 4.14- Placa de retaguarda de PEUAPM perfurada por munição de 7.62 mm FMJ	73
Figura 4.15- Compósito usado para ensaio de adesividade	73
Figura 4.16-Fragmentos cerâmicos colados a placa de PEUAPM mesmo após o impacto	74
Figura 4.17- Placa de retaguarda de PEUAPM após o impacto com munição 7.62 mm FMJ	75
Figura 4.18 - Placa de retaguarda de PEUAPM após o impacto com munição 7,62 mm perfurante (AP)	76

Figura 4.19 - Vista traseira da placa de PEUAPM após o impacto balístico	76
Figura 4.20 - Projétil de 7.62 mm perfurante (esquerda) com o seu núcleo de aço	77
Figura 4.21 - Envelope de kevlar usado no ensaio balístico para a seleção da cerâmica	78
Figura 4.22 - Invólucro de kevlar depois de impactado	78
Figura 4.23 - Placa de acrílico do ensaio especial depois de impactada	79
Figura 4.24 - Núcleo perfurante do projétil recuperado	79
Figura 4.25 - Velocidade dos projeteis usados nos ensaios balísticos	82
Figura 4.26 - Cerâmica após o impacto balístico de um dos compósitos do tipo Feltro	83
Figura 4.27- Cerâmica após o impacto balístico de um dos compósitos do tipo Feltro	83
Figura 4.28 - Cerâmica após o impacto balístico de um dos compósitos do tipo Feltro	84
Figura 4.29 -Cerâmica após o impacto balístico de um dos compósitos do tipo Feltro	84
Figura 4.30 - Placa de PEUAPM em três vistas	85
Figura 4.31 - Placa de PEUAPM em duas vistas	86
Figura 4.32 - Interface de feltro depois de impactada balisticamente	86
Figura 4.33- Cerâmicas após o impacto balístico de três dos compósitos do tipo Borr	87
Figura 4.34 - Cerâmica após o impacto balístico de um dos compósitos do tipo Borr	88
Figura 4.35 - Placa de PEUAPM após o impacto balístico em quatro vistas	89
Figura 4.36 - Interface de borracha depois de impactada balisticamente	90
Figura 4.37 - Cerâmicas após o impacto balístico de dois dos compósitos do tipo Sika	90
Figura 4.38 - Cerâmica após o impacto balístico de um dos compósitos do tipo Sika :a)vista frontal e b) vista mais detalhada da fratura da cerâmica	91
Figura 4.39 - Cerâmica após o impacto balístico de um dos compósitos do tipo Sika	91
Figura 4.40 - Placa de PEUAPM após o impacto balístico em duas vistas	92
Figura 4.41 - Dano interno sofrido pela placa de PEUAPM após o impacto balístico	93
Figura 4.42 - Dano balístico na camada de adesivo Sika 255FC em corpos de prova do tipo Sika	93
Figura 4.43 - Cerâmicas após o impacto balístico de dois dos compósitos do tipo PU	94
Figura 4.44 - Placa de PEUAPM após o impacto balístico em duas vistas	95
Figura 4.45 - Dano interno sofrido pela placa de PEUAPM após o impacto balístico	95
Figura 4.46 - Interface de espuma de poliuretano depois de impactada balisticamente	96
Figura 4.47 - Cerâmica após o impacto balístico de um dos compósitos do tipo PC	96
Figura 4.48 - Cerâmica após o impacto balístico de um dos compósitos do tipo PC	97



Figura 4.49 - Cerâmicas após o impacto balístico de dois dos compósitos do tipo PC	98
Figura 4.50 - Placa de PEUAPM após o impacto balístico em duas vistas	98
Figura 4.51 - Dano interno sofrido pela placa de PEUAPM após o impacto balístico	99
Figura 4.52 - Interface de policarbonato alveolar depois de impactada balisticamente	99
Figura 4.53 - Gráfico da distribuição acumulada passante de massa dos fragmentos coletados dos compósitos impactados	100
Figura 4.54 - Cerâmica impactada balisticamente : a) vista geral e b) detalhe do ponto de impacto com os pequenos fragmentos de alumina	101
Figura 4.55 - Fragmentos contidos nas peneiras menores do que 0.149 mm (a), 0.149 mm (b) e 1.19 mm (c)	101
Figura 4.56 - Gráfico de distribuição de massa retida das peneiras menores do que 2,38 mm dos fragmentos das placas de alumina dos compósitos para blindagem	102
Figura 4.57 – Densidade Superficial dos compósitos para blindagem	106
Figura 4.58 – Energia Absorvida Específica dos compósitos para blindagem	106
Figura 4.59 – Espessura dos compósitos para blindagem	106

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Impedância de materiais para blindagem e penetradores	15
Tabela 2.2 - Limite Elástico de Hugoniot para diversos tipos de cerâmicas	16
Tabela 3.1 – Tabela de propriedades da placa de alumina fornecida pelo fabricante	45
Tabela 3.2 – Propriedades das placas de PEUAPM fornecidas pelo fabricante	47
Tabela 3.3 – Propriedades dos materiais usados na interface	49
Tabela 3.4 – Compósitos fabricados durante o desenvolvimento da blindagem.....	50
Tabela 3.5 – Codificação dos compósitos usados no experimento	52
Tabela 3.6 – Métodos de análise granulométrica	54
Tabela 4.1- Configurações finais dos compósitos para avaliação como blindagem Balística .....	81
Tabela 4.2 - Energia absorvida na criação das superfícies de fratura dos fragmentos da cerâmica (E frag)	103
Tabela 4.3- Valores de Densidade Superficial dos compósitos	104
Tabela 4.4 - Valores de Energia Absorvida Específica dos compósitos	105
Tabela 4.5 - Medida da deflexão dos compósitos não penetrados	107

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

### **1.1 Histórico**

Desde que o primeiro homem das cavernas golpeou duramente seu semelhante, os combatentes sonharam tornar-se imunes às armas de seus oponentes. A primeira proteção que se tem notícia no campo bélico foi o escudo; peça presente desde dos tempos pré-históricos evoluiu e ainda hoje continua evoluindo. Com o desenvolvimento da metalurgia primitiva, começaram a surgir os primeiros escudos de bronze e, logo após, os de ferro.

Portanto, a armadura dos cavaleiros medievais deve ser entendida como o natural sucessor do escudo, ou seja, um escudo de corpo inteiro (Laible, 1980).

Capacetes e blusas feitas de correntes metálicas minúsculas, as chamadas malhas ou cotas, foram os companheiros das primeiras e parciais armaduras, dos ainda presente escudos, principalmente durante a Baixa Idade Média. Conforme as armas da época, começaram a

sofisticar –se (arco e flecha, balestra, maças), as armaduras tornaram–se mais espessas, pesadas e desconfortáveis.

Dessa forma, um cavaleiro em armadura além de não estar totalmente invulnerável, era extremamente mais custoso e lerdo do que um arqueiro ou um lanceiro. Portanto o único item do vestuário que sobreviveu na Europa foi o capacete, derivado diretamente dos elmos dos cavaleiros.

O advento da 1ª Guerra Mundial assistiu a uma completa ignorância quanto a proteção pessoal do combatente, ignorância esta que havia se acentuado desde as Guerras Napoleônicas, porém o mundo viu o surgimento dos primeiros carros de combate sob lagartas para uso no campo de batalha. Esses carros de combate eram praticamente cofres motorizados. O desprezo com relação a proteção individual igualmente sucedeu com as tropas na 2ª Guerra Mundial, porém os carros de combate se tornaram arma essencial no campo de batalha sendo alvo de estudos técnicos –científicos resultando em sérias pesquisas relacionadas aos fenômenos que envolvia a Mecânica da Perfuração e Penetração, utilizando métodos analíticos (Zukas,1978).

Com o início da Guerra da Coréia e o desenvolvimento de novos aços, ligas metálicas e fibras plásticas o conceito da armadura renasceu e as blindagens dos veículos sofreram grande otimização.

Com o terrorismo crescendo a partir da década de 60, houve uma grande expansão de uso de coletes à prova de balas por autoridades e guardas–costas e também causou a transferência da tecnologia de blindagem inicialmente desenvolvida para veículos militares para produtos do mercado civil como carros–forte, veículos de passeio, guaritas, coletes para agentes bancários e etc.

Nos anos atuais a tecnologia de blindagem explora cada vez mais as possibilidades oferecidas pelos novos materiais como a cerâmica, novos tipos de fibras sintéticas e polímeros para uso tanto do mercado militar como de segurança e civil.

Certamente não é uma liderança que o Brasil gostaria de ostentar, mas o fato é que, em função do aumento da violência, cresce a cada dia no país o número de carros blindados, o que já nos coloca, ao lado do México, como um dos principais mercados mundiais desse setor.

Estima-se que já circulem hoje no eixo Rio-São Paulo cerca de 5000 carros blindados. O que antes era restrito a veículos militares, depois ao uso de chefes de estado e magnatas, hoje passou também à ser utilizado por outro tipo de público formado por empresários, artistas, executivos e políticos

Sem contarmos com o uso cada vez maior por agentes de segurança privados de coletes à prova de bala, do uso de carros-forte e até mesmo helicópteros com blindagem para transporte de valores. Sem falar do vital uso militar das blindagens no atual cenário da guerra moderna. Considerando a atual situação da violência urbana das nossas cidades, em algumas cidades do Brasil já se caracteriza um estado de guerrilha urbana, a Tecnologia de Blindagem surge como um instrumento passivo de fundamental importância para a segurança da população em geral e dos profissionais que convivem com o problema da violência diariamente.

## **1.2 Evolução dos veículos blindados militares**

Os carros de combate finalizaram a 1ª Guerra Mundial, começaram a 2ª Grande Guerra e, talvez, tenham evitado a 3ª Guerra Mundial. Uma década depois de serem usados em uma das maiores operações militares da História, Operação Tempestade no Deserto, o seu futuro está sendo discutido e um novo conceito está sendo desenvolvido.

Durante a maior parte da Guerra Fria, o foco principal do planejamento militar das Forças Armadas dos Estados Unidos era a defesa da Europa, e para isso carros de combate e equipamentos pesados tinham sido mantidos em depósitos na Alemanha. A idéia era dispor antecipadamente do equipamento, de modo que numa emergência só as tropas precisassem ser transportadas. O transporte aéreo tornou-se programa prioritário da Força Aérea. Além de ser mais rápido do que o transporte marítimo, tinha a vantagem de poder ser feito por empresas aéreas comerciais quando necessário.

Com o fim da Guerra Fria, o desaparecimento da URSS e o naufrágio do Bloco Socialista, uma possível guerra convencional na Europa passou à ser improvável.

Sem a URSS, os EUA se torna a única Superpotência Militar e como tal tenta ocupar o cargo de não mais o xerife do mundo ocidental mas sim o xerife de um mundo globalizado.

Dando mesadas para os russos e fazendo acordos com o Japão, China e Europa, os países do Terceiro Mundo se tornam agora o principal foco do planejamento militar americano. Em dezembro de 1980 os EUA pôs em andamento a Operação Estrela Brilhante, um exercício militar ao lado do exército egípcio nos desertos perto do Cairo. Nesse exercício os EUA testaram a sua Força de Deslocamento Rápido (FDR), que fora criada para enfrentar situações de emergência contra os interesses americanos em pontos distante do globo. Para transportar os 1400 homens e seu equipamento de Fort Campbell, no Kentucky, a uma base militar egípcia perto do Cairo, os aviões de transporte militar C – 141 e os onze gigantes Galaxy C-54, mobilizados para a operação, gastaram seis dias – tempo considerado excessivo, ainda mais levando em conta que o desejo era ter capacidade de transportar 200 000 homens. O exercício revelou que a Força de Deslocamento Rápido, em primeiro lugar, não era rápida. E, em segundo lugar, não se deslocava como deveria.

Durante a Operação Escudo do Deserto ( antecedeu a Operação Tempestade do Deserto), o Comando de Transporte Aéreo Militar fez 1848 vôos no primeiro mês, contando com 230 vôos civis, para conduzir um total de 63 mil toneladas de tropas e equipamentos. Entretanto, durante a Operação Justa Causa– a intervenção no Panamá em 1989 – a Força Aérea fez 775 vôos para levar e trazer 20700 toneladas em um mês, e durante a guerra árabe – israelense de 1973 os Estados Unidos fizeram 567 vôos para apoiar Israel com 21200 toneladas de equipamento.

A desvantagem do transporte aéreo é que não tem a mesma capacidade de carga marítimo. Um C-5 pode levar de sessenta a setenta toneladas e um C-141, de vinte a trinta, embora esses carregamentos possam variar amplamente, em razão de vários fatores. O equipamento levado por oito navios de transporte rápido exigiria 2500 viagens de C-141. Mas o maior problema com o transporte de forças pesadas não é só o peso mas também o volume. A maioria dos carros de combate e veículos das forças terrestres requer um avião de tamanho maior que o usual, tanto pelo peso como pelas dimensões, e só um dos maiores aviões de transporte, o C-5 Galaxy, tem condição de carregá – los. Não existem aviões de transporte em número suficiente para levar muito longe uma divisão reforçada.

Enquanto a Marinha dos EUA, possui uma esquadra para cada oceano, a Força Aérea superbombardieiros intercontinentais, o Exército não possuía a mesma Mobilidade Estratégica.

Em 23 de junho de 1999 o chefe do Estado Maior do Exército Americano general Eric K. Shinseki anunciou a necessidade, dentro do atual cenário global, do Exército Americano de se transformar em uma grande força de resposta estratégica. Em 12 de outubro de 1999, o Exército dos EUA anuncia um grande rompimento com o passado e anuncia os novos objetivos a serem atingidos: pode dispor para combate em qualquer lugar do mundo de uma brigada em 96 horas, uma divisão completa em 120 horas integrada por 15 mil homens e 5 divisões em no máximo um mês. Para atender a essas exigências foi criada o programa FCS ( *Future Combat Systems*).

O programa FCS é um grande programa de desenvolvimento cuja missão é desenvolver sistemas e subsistemas, aéreos ou terrestres, controlados remotamente ou não para aumentar a letalidade e capacidade de sobrevivência não só das forças mecanizadas como dos soldados de infantaria mas nunca esquecendo a Mobilidade Aérea Estratégica. O desejo do Exército americano é que uma força de ataque FCS garanta aos Estados Unidos não só uma rápida resposta estratégica mas também a capacidade de decisão das condições da batalha.

Um dos componentes do programa FCS é um veículo blindado que comporá a espinha dorsal da força de ataque entre 2012 e 2020, ver Figura 1.1.

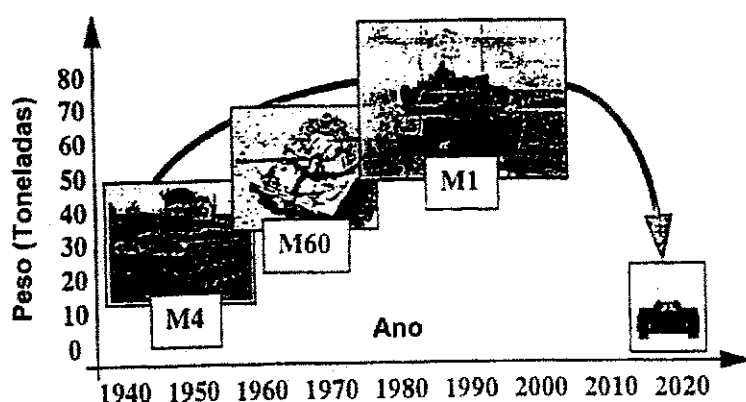


Figura 1.1 - Redução futura de peso dos veículos blindados militares do exército dos Estados Unidos. Fonte : Chin (1999)

Todos os subsistemas que compõe o veículo FCS (armamento, blindagem, propulsão, equipamentos eletrônicos de comunicação, tiro, visão) estão sendo desenvolvidos dentro do

estado da arte da tecnologia militar. Semelhante conceito de veículo está sendo desenvolvido pela Alemanha e pela Inglaterra.

### 1.3 Blindagem do novo veículo militar do programa FCS

A blindagem de um carro de combate é um dos seus subsistemas mais importantes e é também uma das responsáveis pelo grande peso desses veículos. As pesadas armaduras de urânio empobrecido do MBT (*Main Battle Tank*, Carro Principal de Batalha) M-1 Abrams, que hoje compõem a espinha dorsal da Força de blindados dos EUA, será substituída por uma blindagem mais leve no novo veículo, conforme mostra a Figura 1.2.

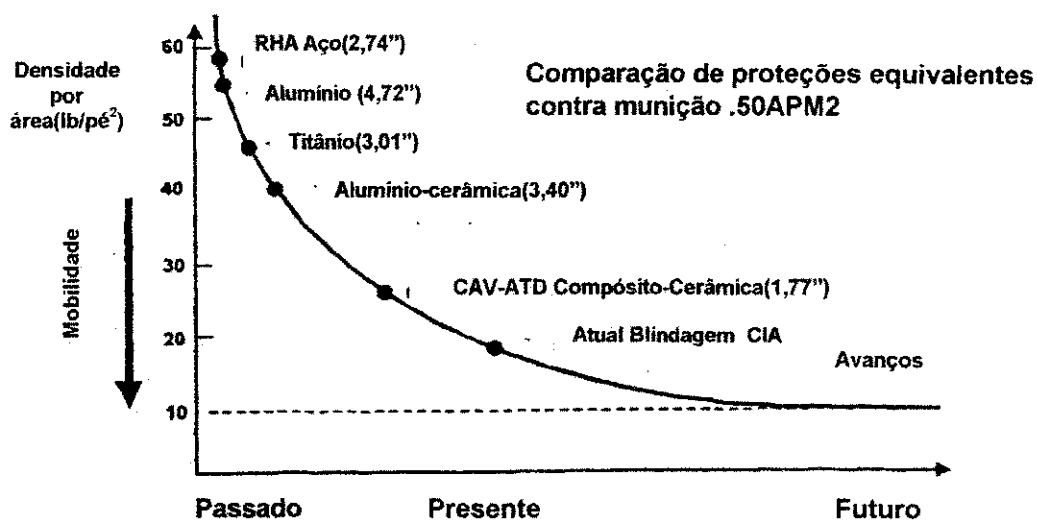


Figura 1.2 - Evolução dos últimos 50 anos dos sistemas de blindagem contra ameaça de munição 12,7 mm (.50). Fonte : Gama (2001)

A blindagem desse novo veículo do programa FCS não só terá função de proteção balística mas também estrutural e características furtivas (Gama,2001).

Um dos conceitos apresentados como sendo a futura blindagem do veículo FCS foi o desenvolvido pelo subprograma CAV (Composite Armored Vehicle), fabricado pela United Defense Limited Partnership (UDLP) para o Exército Americano e denominada de CIA (Composite Integral Armor), ver Figura 1.3.



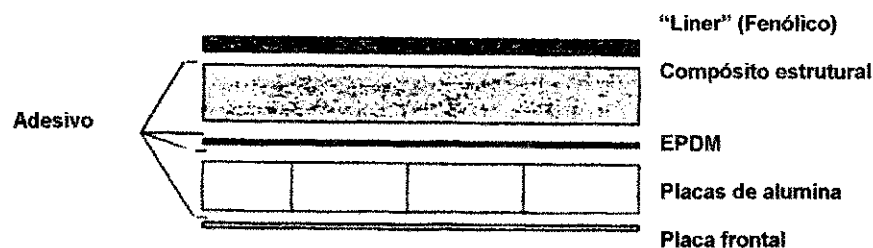


Figura 1.3 - Exemplo da Blindagem CIA desenvolvida pelo programa CAV. Fonte :  
Fink (2000)

A CIA compreende um sistema híbrido de materiais consistindo de principalmente uma cerâmica de alumina para proteção balística, uma fina camada de borracha e uma placa de apoio (“back up plate”) de fibra de vidro S – 2 com fins estruturais.

Novas versões da CIA que foram apresentadas mostram o uso de espuma de alumínio ou no lugar ou em conjunto com a fina camada de borracha. O uso da camada de borracha ou da espuma de alumínio visa atenuação da onda de tensão ou de choque gerada no impacto balístico e conseqüentemente menor transmissão da mesma para a placa de retaguarda, preservando a mesma de maiores danos.

O uso de materiais na interface da cerâmica com a placa de retaguarda pelo conceito CIA demonstra o grande interesse americano neste modo de otimização de um sistema de blindagem para proteção balística.

#### **1.4 Objetivos da Pesquisa**

- Desenvolvimento de um compósito para blindagem balística.
- Estudar o comportamento sob impacto balístico de um sistema compósito para blindagem quando se coloca na interface (espaço entre a cerâmica e a placa de retaguarda) diferentes tipos de materiais.

#### **1.5 Justificativas da pesquisa**

A tecnologia de blindagem é vital tanto no atual cenário da guerra moderna como no cenário de guerrilha urbana que se alastra por diversas cidades ao redor do mundo. O crescente avanço das tecnologias ligadas a produção de armamentos vem criando armas e munições de grande poder destrutivo e alto impacto.

Surge portanto a necessidade de estudo e obtenção de tecnologia para produção de blindagens mais modernas que possam assegurar as Forças Armadas e de Segurança a proteção adequada para o cumprimento de seus atributos. Todavia, o estudo de materiais para blindagens é muito complexo e devido a sua natureza militar a grande maioria dos trabalhos realizados são de natureza confidencial e as informações disponíveis escassas. Em consequência, o país que desejar suprir as suas necessidades, sem depender de fornecimento por importação, deve realizar seus próprios estudos, procurando desenvolver tecnologia própria.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO DA LITERATURA**

#### **2.1 Conceitos básicos de balística e blindagens**

Antes de iniciar o desenvolvimento do trabalho, faz-se necessário definir alguns termos utilizados, a fim de evitar eventuais discrepâncias com o uso rotineiro dos mesmos.

O projétil quando impacta um alvo transfere para o mesmo a sua quantidade de movimento; tem boa parte de sua energia cinética convertida em calor e gera uma onda mecânica de tensão que se propaga através do material-alvo muito mais rápido do que a própria velocidade de penetração do projétil.

O calor gerado pelo projétil tende a alterar, próximo ao ponto de impacto, as propriedades mecânicas do material-alvo. Destruindo a massa do projétil reduziremos a sua quantidade de movimento e a sua energia cinética. A onda mecânica de tensão se propaga à frente do projétil comprimindo o material alvo.

A área de estudo que conduz ao desenvolvimento de blindagens, tanto pessoais quanto para viaturas é conhecida como balística terminal (Cardoso A. L. V. et al, 1999).

A penetração e/ ou perfuração de um material-alvo por um projétil é um fenômeno mecânico e térmico transiente de duração de milisegundos, sendo portanto um fenômeno físico complexo. Na penetração o projétil entra no alvo, no entanto sem completar sua passagem através do corpo, enquanto que na perfuração o projétil passa através de toda a espessura da placa (Cardoso A. L. V. et al, 1999).

No engastamento o projétil é frenado durante a penetração, ficando retido dentro do corpo.

Quando o projétil é defletido do alvo sem que haja perfuração ou engastamento, temos o ricochete.

A velocidade de impacto é a velocidade do projétil antes de chocar-se contra o alvo, enquanto que, a velocidade residual é a velocidade do projétil logo após a perfuração da placa.

O limite balístico é a velocidade mínima de impacto de um dado projétil para perfurar uma dada placa, obtendo-se assim uma velocidade residual nula.

O alvo é o menor objeto funcionalmente ou estruturalmente independente cuja função é ser danificado pelo projétil. Já o elemento do alvo é a seção da subestrutura afetada por um único impacto e constitui o componente básico a ser especificado num modelo (subestrutura é uma unidade simples funcional ou operacional do alvo).

Para fins de estudos os impactos são normalmente classificados conforme os diversos fenômenos ocorridos, que podem ser:

- a) De acordo com o ângulo de incidência: o projétil pode atingir o alvo num impacto normal à superfície ou num impacto oblíquo. A incidência normal tem sido mais estudada por ser a condição limite mais desfavorável para as blindagens.
- b) De acordo com as características do projétil e do alvo:
  - projétil indeformável e alvo deformável;
  - projétil deformável e alvo indeformável;
  - projétil e alvo deformáveis;
- c) De acordo com a faixa de velocidade: Esta é a classificação mais importante no que diz respeito ao comportamento dos materiais. Em impactos a baixas velocidades é grande a influência das propriedades mecânicas do projétil e da placa, bem como da forma do

projétil e espessura da placa. Em impactos com velocidades elevadas, a pressão dinâmica é tão alta que a resistência do material torna-se desprezível, passando o mesmo a ter comportamento hidrodinâmico. Nesta faixa de velocidade a massa específica (densidade) do material é o parâmetro mais importante a ser considerado, tanto para o projétil como para a placa.

Em termos gerais, o comportamento hidrodinâmico inicia-se quando o projétil atinge a velocidade do som no material do alvo.

Para as cerâmicas, Viecknický determinou que: impactos até 700 m/s podem ser considerados impactos à baixa velocidade e o dano é quase-estático; acima de 3000 m/s o comportamento é governado por propriedades dinâmicas e o dano é caracterizado pelo fluxo hidrodinâmico. Entre 700 m/s e 3000 m/s, temos o regime intermediário, o dano é uma combinação de dano quase-estático e dinâmico (Sherman, 2000).

Para blindagens compósitas e flexíveis, Starrat afirma que: impactos até 1 m/s podem ser considerados como de baixa velocidade; entre 10-100 m/s como de velocidade intermediária e de 100-1000 m/s, como de alta velocidade, já podendo ser caracterizados como impactos balísticos (Olsson, 2000).

## **2.2 Ondas de tensão**

A aplicação de uma força externa ao corpo pode ser definida como um processo dinâmico, exceto quando o somatório das forças é nulo. No entanto, quando a taxa de mudança da força aplicada é baixa, podemos considerar o processo de deformação como uma seqüência de passos, no qual é assumido que o corpo permanece em equilíbrio estático. Com o aumento da intensidade e diminuição do tempo de aplicação do carregamento, a reação do material tende a tornar-se mais localizada, e mais afetada pela constituição do material nas vizinhanças da aplicação da carga do que pela geometria total da estrutura.

Em nível atômico, podemos considerar a onda como uma sucessão de impactos entre átomos adjacentes. Cada átomo, acelerado, transmite seu movimento ao vizinho.

A massa, separação entre átomos e a força de atração e repulsão interatômica determinam a maneira que o pulso de tensão se locomove de um ponto a outro. O estado de tensão estabelecido pelo pulso, determina a direção relativa de movimento dos átomos e a extensão do movimento, o qual é importante no processo de deformação. Devido a essas

diferenças o comportamento dos sólidos submetidos ao impacto pode ser dividido em três regimes :

- Comportamento elástico

As condições de carregamento resultam em deformações inferiores ao limite de escoamento. Para os metais, a lei de Hooke pode ser aplicada.

- Comportamento Plástico

Quando a amplitude do carregamento excede um valor crítico (limite de escoamento do material, a uma dada taxa de deformação), após a relaxação há mudança da posição original dos átomos em relação aos seus vizinhos.

- Comportamento Hidrodinâmico

O aumento do carregamento poderá gerar pressões que excedem de muitas ordens de grandeza as propriedades mecânicas de resistência do material, levando ao comportamento hidrodinâmico, ou seja, o sólido se comporta como fluido.

Com o aumento da intensidade do carregamento, o material é levado do regime elástico ao regime plástico e do regime plástico ao regime hidrodinâmico.

A teoria elástica para os sólidos isotrópicos indica a propagação de dois tipos de ondas: ondas longitudinais (dilatacional ou primária ) onde as partículas se movimentam paralelamente à direção de propagação do pulso e a deformação é puramente dilatacional e ondas transversais (distorcional, rotacional, cisalhante ou secundária ) onde o movimento das partículas é normal à direção de propagação do pulso e a deformação é cisalhante.

Sob certas condições de carregamento, ondas torsionais e flexurais podem ser geradas. Em adição, às ondas longitudinais e transversais, as ondas elásticas podem se propagar ao longo da superfície de um sólido. Dois tipos de ondas superficiais foram estudadas extensivamente: ondas superficiais de “Rayleigh” e as ondas de “Love”. As ondas Rayleigh são perturbações mecânicas superficiais cujos efeitos se concentram em uma região de cerca de um comprimento de onda de profundidade. São bidimensionais e possuem baixa atenuação. As ondas “Love” são ondas cisalhantes superficiais, muito importante em Sismologia.

Quando se impacta um material diversos tipos de ondas podem se formar, ver Figura 2.1, como ondas longitudinais, cisalhantes e Rayleigh. A interação das ondas longitudinais com a superfície livre formam as “Wavelets” e estas, por sua vez, formam uma frente de onda, “Head wave”( Meyers, 1994).

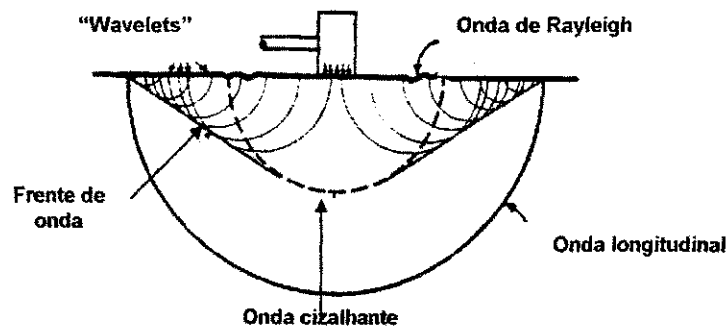


Figura 2.1 - Diagrama ilustrativo dos diversos tipos de onda que se formam em um simples bater de um martelo. Fonte: Meyers (1994).

Com a intensidade de carga aplicada aumentando, o material é tensionado além de seu limite elástico e entra no regime plástico. Duas ondas se propagam agora nos sólidos, uma onda elástica seguida por uma onda plástica, mais lenta porém mais intensa.

Se a carga aplicada continuar aumentando tornando-se tão grande que a resistência do material é desprezível (característico do regime hidrodinâmico), o material se comportará como fluido, portanto ondas transversais (ou cisalhantes) não podem existir no corpo impactado e só ondas longitudinais podem se propagar, predominando as ondas de choque.

Neste regime, as velocidades das ondas elásticas e plásticas pouco diferem, formando uma frente de onda única, dependente da taxa de deformação. Esta é a definição de uma onda de choque. A onda de choque gera tensões muito acima do limite elástico do material, as pressões são tão intensas que provocam o aumento da densidade por onde passam no material, no caso do aço chega a ser 30% maior.

Quando um projétil a alta velocidade impacta uma placa, ondas de tensão compressivas propagam-se na direção do impacto, diferentes tipos de ondas de tensão são geradas (ex. : Rayleigh, longitudinal e etc) e se propagam nas três dimensões. As ondas longitudinais compressivas são geralmente as que contem a maior parte da energia gerada pelo impacto, e são as mais rápidas e podem ser consideradas com grande precisão como tendo formato

esférico (onda tridimensional). Bruck (2000) ao simular em computador um impacto balístico, considerou apenas como responsável pelo dano no alvo as ondas longitudinais compressivas esféricas.

Segundo Olsson (2000), para tempos de impacto muito longos em relação ao tempo que a onda leva para atravessar a espessura de um material temos uma resposta quase-estática (figura 2.2c). Para tempos curtos há uma predominância de ondas flexurais e cisalhantes (figura 2.2b) e para tempos de impactos muito curtos temos a predominância de ondas dilatacionais tridimensionais (figura 2.2a), caso característico de um impacto balístico.

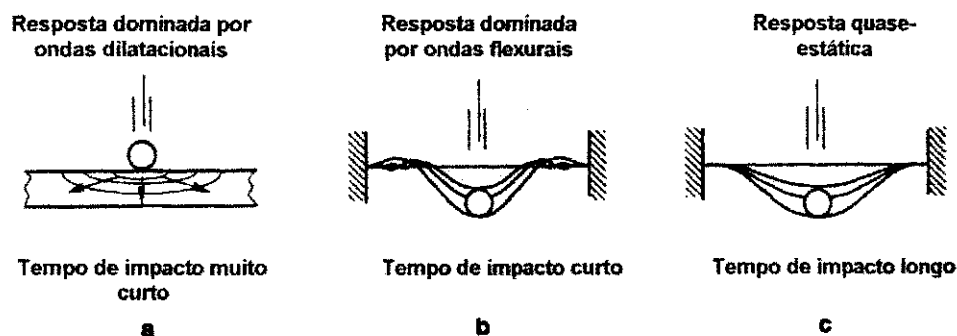


Figura 2.2 - Tipos de respostas durante o impacto em placas. Fonte : Olsson (2000).

### 2.2.1 Interação de Ondas de Tensão

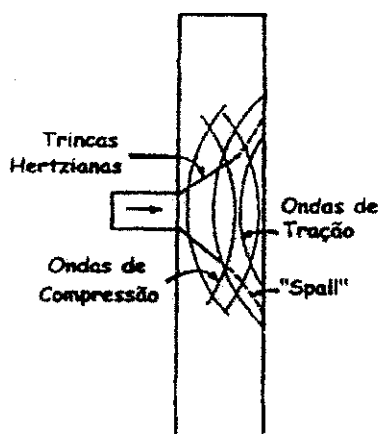


Figura 2.3 - Diagrama ilustrativo da propagação de uma onda de compressão durante um impacto balístico em uma cerâmica. Fonte : Meyers (1994).



Quando uma onda elástica se propaga em um meio isotrópico e encontra uma mudança de densidade representada por uma superfície livre ou interface interna, ela é refletida, ver Figura 2.3. Quando a onda elástica incide obliquamente à superfície, a energia da onda incidente é dividida em duas ondas de reflexão, uma longitudinal e outra transversal, quando a incidência é normal a onda longitudinal reflete como onda longitudinal e uma onda transversal reflete como onda transversal. Para discutirmos com que sinal a onda será refletida temos que conhecer uma propriedade muito importante quando se estuda blindagens para proteção balística, que é a **Impedância de Choque (I)** :

$$I = \rho \cdot c \quad (2.1)$$

$\rho$  = densidade do material

$c$  = velocidade do som no material

Os materiais cerâmicos com melhores eficiências balísticas possuem a combinação de maiores valores de densidade e de velocidade de propagação do som no material ( ou Velocidade da onda longitudinal,  $V_{long}$ ) e, conseqüentemente, maiores valores de Impedância, ver Tabela 2.1.

Quanto maior for a  $V_{long}$  maior será a facilidade com que o material permite a propagação da onda de tensão gerada durante o impacto. Dois importantes materiais usados em projeteis de alto poder de penetração possuem alto valor de Impedância de Choque, são eles : O tungstênio com 722 MPa.s/m e urânio com 536 MPa.s/m.

Tabela 2.1 - Impedância de materiais para blindagem e penetradores

Material	W	U	TiB <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aço	SiC	B <sub>4</sub> C	Al
Impedância (MPa.s/m)	722	536	490	384 - 410	398	358	344	126

Fonte : Ajdelsztajn (1998)

Portanto, o que vai determinar com que sinal uma onda de choque irá refletir ao atingir uma superfície livre ou interface interna é a relação de impedâncias. Se imaginarmos uma onda propagando-se do meio 1 ao meio 2 que estão em contato, a onda ao chegar na interface desses dois meios será refletida com sinal contrário ( compressiva em trativa e vice-versa) se a Impedância do meio 2 for menor que a do meio 1; senão não haverá troca de sinal

(compressão reflete como compressão e tração como tração). Conseqüentemente, para dois meios em contato que tenham a mesma Impedância não há reflexão da onda na interface.

Outra propriedade dinâmica importante é o Limite Elástico de Hugoniot (LEH). O LEH é definido como sendo a maior onda elástica dinâmica que pode ser transmitida no material. É considerado como o limite de escoamento dinâmico do material. Quando a pressão de impacto é inferior a duas vezes o valor do LEH, os efeitos da resistência mecânica da placa cerâmica devem ser considerados, ver Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Limite Elástico de Hugoniot para diversos tipos de cerâmicas

Material	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>4</sub> C	Vidro	BeO	MgO
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	3,98	3,92	2,5	2,48	2,84	3,57
LEH (GPa)	11,2	9,2	15	7,3	8,5	8,9

Fonte : Ajdelsztajn (1998)

### 2.2.2 Atenuação de ondas de choque

Outro fato que deve ser conhecido é que a onda de choque não só perde energia quando se propaga através de um meio (na forma de calor e deformação por exemplo) mas também por meio de uma onda de rarefação que surge na sua "esteira". Essa onda de rarefação consome a onda de choque, diminuindo o seu pico de pressão, transformando a onda de choque em uma onda de som, ou seja, atenuando-a. Esse tema será mais discutido na seção 2.5.2.

### 2.2.3 Relação entre a espessura e a eficiência balística de um sistema de blindagem

É conveniente classificar os elementos do alvo por espessura como se segue :

- semi-infinito: não há influência da espessura no processo de penetração.
- espesso: há influência da espessura no processo de penetração, após determinado percurso do projétil no interior do elemento do alvo.
- intermediário: a superfície posterior exerce influência considerável no processo de deformação durante todo (ou quase todo) o percurso do projétil.
- fino: não há gradientes de tensão e deformação através de sua espessura.

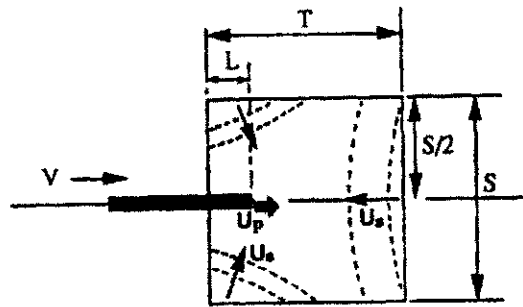


Figura 2.4 - Impacto de um penetrador em um material- alvo ( $S, L$  e  $T$  são dimensões do alvo,  $u_p$  e  $u_s$  são respectivamente velocidade do projétil e da onda). Fonte: Choi (1995).

Choi (1995) afirma que se deve evitar a superposição de ondas refletidas à frente do projétil tanto pela parte de trás como pelas laterais da placa impactada, ver Figura 2.4, pois o campo de tensão trativo criado pelas ondas refletidas facilita a penetração do projétil no alvo.

Portanto existe uma espessura e uma área que maximiza a eficiência balística de um sistema de blindagem.

## 2.3 Fratura sob impacto balístico

### 2.3.1 Introdução

Tanto a Mecânica de Fratura Linear Elástica (MFLE) como a Mecânica de Fratura Dinâmica (MFD) não podem ser aplicadas diretamente para o estudo do fenômeno de Impacto Balístico, pois ambas pressupõem a existência de uma trinca dominante (a maior ou a mais crítica) que é tipicamente responsável pela ruptura (Tavares, 1997).

Porém sob taxas mais elevadas de carregamento, várias fraturas devem propagar-se simultaneamente, dada a inabilidade de uma fratura individual, que possui taxa de crescimento limitada, para aliviar as tensões crescentes submetidas ao material. Em um impacto balístico há uma forte interação projétil-alvo com uma grande concentração de energia nas vizinhanças do ponto de impacto além da presença de outros mecanismos de absorção de energia como por exemplo vaporização, calor, erosão e etc.

Outra característica fundamental e peculiar em Impactos Balísticos é a presença de ondas mecânicas de tensão. Essas ondas tem grande influência na fratura dos materiais sob esse tipo de impacto.

Uma melhor compreensão da fratura sob impacto balístico pode ser obtida utilizando-se as funções e fundamentos da Ciência da Fragmentação, principalmente quando estamos interessados em conhecer a fratura sob impacto de materiais frágeis como as cerâmicas.

## **2.3.2 Fragmentação**

### **2.3.2.1 Fundamentos principais**

Fragmentação vem da palavra latina *fractus*, que pode ser traduzida como quebrado.

A fragmentação pode ser entendida como o processo resultante da deformação (que ocorre devido a aplicação de esforços), da iniciação (ativação) de defeitos, e da sua propagação e coalescência, formando fragmentos. A compreensão e a análise quantitativa desses estágios é de grande relevância na descrição da fragmentação. Embora várias das soluções teóricas sejam somente aplicáveis a estado de tensões relativamente simples, os conceitos decorrentes auxiliam o entendimento qualitativo das condições complexas de esforços que existem na prática (Tavares, 1998).

Os conceitos discutidos pela mecânica de fratura linear elástica assumem que o material é contínuo, idealmente frágil, e que a única descontinuidade presente é a trinca de Griffith. Em materiais como rochas, isto não é em geral válido, devido a presença de várias descontinuidades como interfaces de grãos, poros, outras fraturas e inclusões, as quais têm potencial de dissipar a energia necessária para a fratura e provocar a interrupção desta. A parada na propagação de uma trinca pode permitir que outras trincas também se desenvolvam paralelamente, de modo que a rocha vai somente sofrer ruptura quando uma grande proporção destas trincas coalescerem, produzindo uma macrotrinca que atravesse toda a seção do sólido.

Quando um sólido é fragmentado, a distribuição de tamanhos dos fragmentos resultantes vai depender do tipo de material, da distribuição interna de descontinuidades e da intensidade da energia aplicada.

Um método frequentemente utilizado para estudar a fragmentação de materiais é o ensaio de queda de peso (“drop weight tests”), como mostra a Figura 2.5. Um peso, normalmente esférico, é largado a partir de uma altura conhecida sobre uma partícula que se

localiza no topo de uma superfície dura. A energia cinética da esfera no instante do impacto é igual a energia potencial na altura  $h$ . Essa energia cinética é transferida à partícula, a qual pode ou não sofrer ruptura. Esse teste é realizado para diversas partículas, todas tendo o mesmo tamanho. Os fragmentos são coletados para a determinação da distribuição de tamanhos.

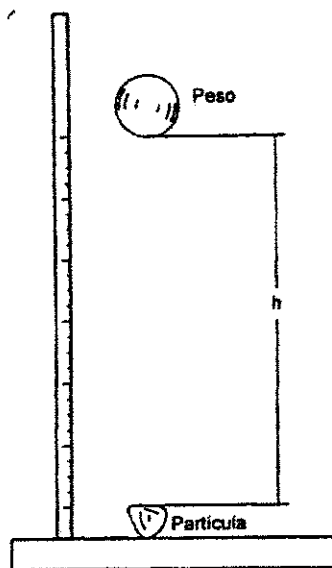


Figura 2.5 - Teste de queda de peso. Fonte : Tavares (1998).

Embora seja usada uma partícula em cada teste, cada impacto consiste de uma seqüência de eventos individuais de fratura. Normalmente a energia cinética da esfera é suficiente para causar fratura primária e a energia residual é absorvida pelas partículas filhas (fragmentos) até que toda a energia cinética da esfera seja dissipada.

O número de eventos seqüenciais de quebra que ocorre durante o impacto de uma partícula é determinado primariamente pela energia de impacto do peso. Quanto maior a energia, maior o número de eventos seqüenciais, e vice e versa.

Conseqüentemente, a distribuição final de tamanhos das partículas filhas será determinada pela energia aplicada, além do tipo de material.

Na prática, é usual designar a fragmentação de diferentes maneiras em função do nível de energia aplicada. Quando a partícula é sujeita a esforços normais insuficientes para causar a sua ruptura ou quando os esforços incidentes são essencialmente de cisalhamento na superfície da partícula, pode ocorrer fragmentação por abrasão ou lascamento. Através desse mecanismo, a partícula mãe sofre uma redução de tamanho quase imperceptível, enquanto

que um grande número de partículas de tamanho muito fino são geradas, Figura 2.6 (Tavares,1998).

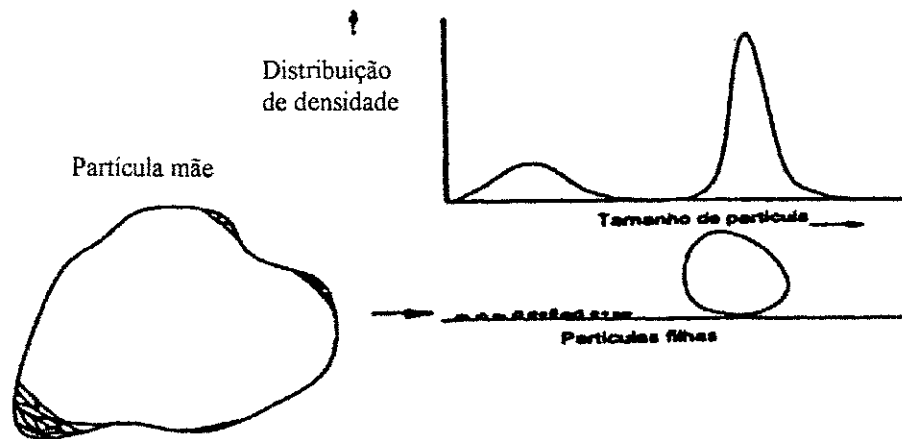


Figura 2.6 - Abrasão e lascamento produzindo fragmentos com distribuição estreita de tamanhos. Fonte : Tavares (1998).

Quando a taxa de aplicação e a intensidade de energia é baixa a fragmentação ocorre pelo mecanismo de *clivagem*, sem fraturamento múltiplo dos fragmentos. Esse mecanismo de fratura tende a produzir diversos fragmentos relativamente grosseiros e ao mesmo tempo formam, nos pontos de aplicação dos esforços, partículas muito mais finas. A distribuição de tamanhos das partículas do produto é relativamente estreita mas é freqüentemente bimodal, como mostra a Figura 2.7.

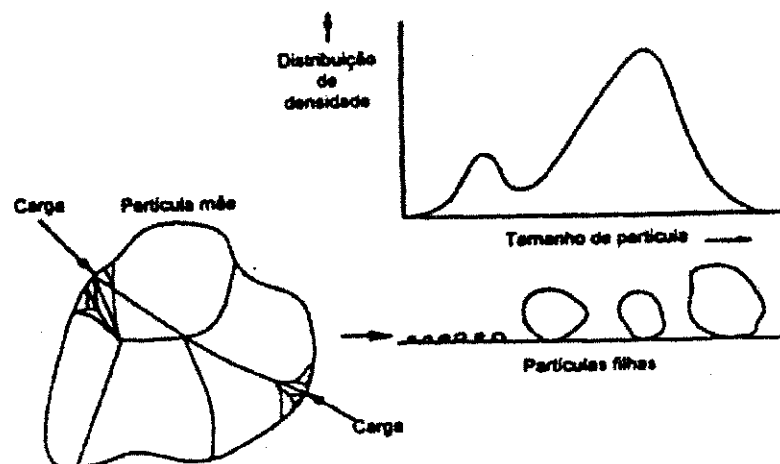


Figura 2.7 - Fratura por clivagem quando a taxa de carregamento é baixa. Fonte : Tavares (1998).

À elevadas taxas de aplicação de energia e sob condições de esforços de compressão, ocorre intensa fragmentação da partícula. Esse mecanismo, denominado *fratura desintegrativa* (“shatter”), resulta em um amplo espectro de fragmentos, ver Figura 2.8. Na prática a fratura desintegrativa consiste de uma série de passos nos quais a partícula mãe é fraturada e as partículas filhas são sucessivamente fraturadas também. Essa sucessão de eventos ocorre tão rapidamente (na ordem de alguns milisegundos), que para o observador eles parecem ocorrer simultaneamente.

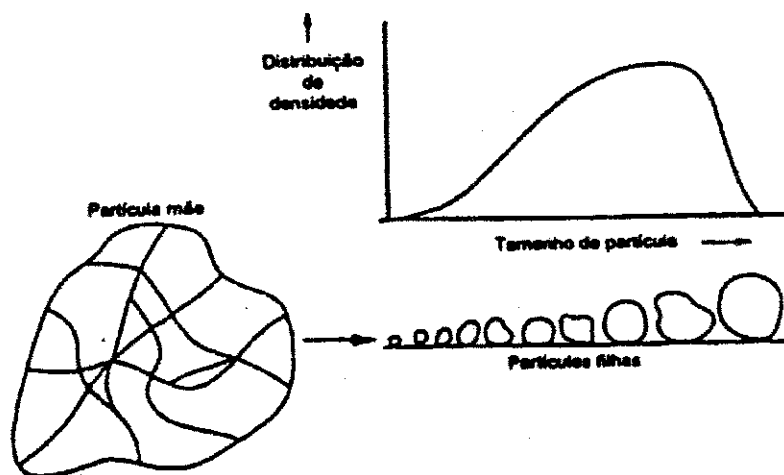


Figura 2.8 - O processo de fratura desintegrativa produzindo uma ampla gama de fragmentos. Fonte : Tavares (1998).

Placas impactadas experimentalmente mostraram trincamentos na alumina a níveis de tensões menores que o LEH (Limite Elástico de Hugoniot). As tensões compressivas e trativas criam trincas e a densidade de trincas aumenta com o tempo de aplicação do pulso. Além disso um pulso de tensão compressiva cria pontos de iniciação de fissuras. Então, um pulso de tensão trativo percorrendo um material virgem produz um dano menor do que um pulso trativo viajando através de um material que já foi submetido a um pulso compressivo anterior (Meyers, 1994).

Baseado nas considerações acima foi proposto um modelo de fragmentação apresentado na Figura 2.9.

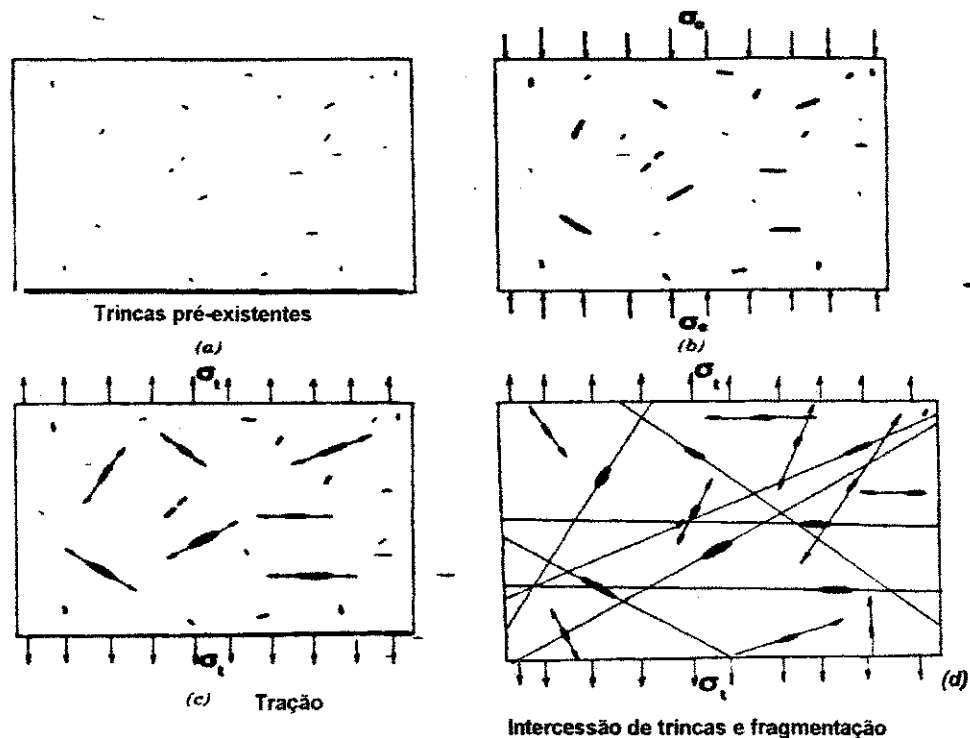


Figura 2.9 - Modelo de fragmentação proposto por Louro e Meyers. Fonte : Meyers, 1994.

Considera-se que o material possui descontinuidades pré-existent, Figura 2.9a, fato normal em materiais cerâmicos. Essas descontinuidades são ativadas pela passagem do pulso de compressão e tornam-se maiores, Figura 2.9b. Sob tensão, as descontinuidades começam a crescer a uma velocidade ditada pela fratura dinâmica, isto é, a velocidade máxima é a velocidade de Rayleigh. Conforme estas trincas crescem, novas trincas são nucleadas, Figura 2.9c. A intersecção das trincas definem os fragmentos cujo tamanhos podem ser calculados, Figura 2.9d.

Há ainda dois fatos importantes que se deve ter em mente quando se estuda a fragmentação de uma cerâmica sob impacto balístico. Primeiro, a onda gerada no ponto de contato de impacto do projétil na cerâmica não é planar mas sim esférica, portanto durante a sua expansão radial gerará tensões tangenciais que são trativas, criando trincas a partir do ponto de contato. E que as heterogeneidades microestruturais da cerâmica podem criar condições para a geração de tensões trativas sob carregamento compressivo. Essas heterogeneidades microestruturais da cerâmica podem ser, como mostra a Figura 2.10:



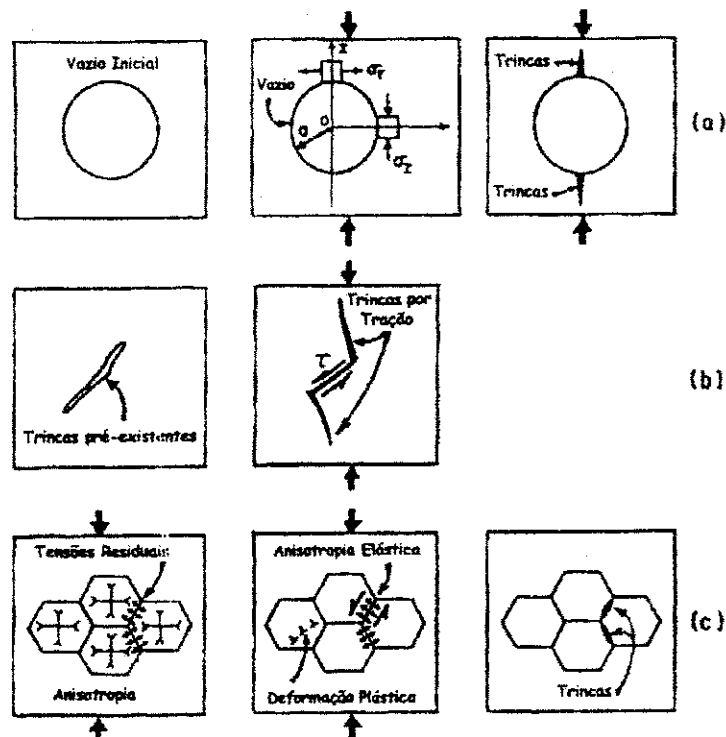


Figura 2.10 - Heterogeneidades e mecanismo de propagação de trinca na cerâmica sob compressão. Fonte: Meyers, 1994.

- Vazios esferoidais (Figura 2.10a) – tendem a se tornar elípticos e, conseqüentemente, gerando grande concentração de tensões em suas extremidades.
- Descontinuidades elípticas (Figura 2.10b) - o caso de vazios esféricos é um caso particular das descontinuidades elípticas.
- Anisotropia elástica entre grãos vizinhos gerando tensões nos seus respectivos contornos (Figura 2.10c).

### 2.3.2.2 Populações de partículas e função de distribuição

Porque se preocupar com a função de distribuição de partículas? Bem, aparentemente não se teria um interesse imediato para este estudo neste trabalho, entretanto, como será visto em Metodologia Experimental (Capítulo 3), o grau de fragmentação de um material pode ser caracterizado através da medida da distribuição de tamanhos de fragmentos após o impacto do projétil. Esta metodologia será utilizada e, portanto, aí está a justificativa para a presente análise e compreensão deste tema.

As bases para esta compreensão podem ser encontradas, por exemplo, na análise granulométrica de minérios.

É claro que o conceito de tamanho de partícula é ambíguo. Partículas de interesse no tratamento de minérios não possuem formatos regulares de fácil definição como esferas e cubos. O tamanho de uma esfera pode ser definido sem ambigüidade pelo seu diâmetro. Da mesma forma, o tamanho de um cubo pode ser definido sem ambigüidade pelo comprimento de uma aresta, mas outra dimensão poderia ser igualmente usada como a diagonal mais longa. O tamanho de uma partícula não possui um único significado, mesmo para partículas com formatos regulares. No tratamento de minérios, uma medida indireta de tamanho é usada. O tamanho de uma partícula é definido como a menor abertura em uma peneira de malha quadrada através da qual a partícula é capaz de atravessar. Às vezes é necessário trabalhar com partículas que são pequenas demais para medir seu tamanho através de peneiramento. Nesses casos, outras medidas indiretas apropriadas como a velocidade terminal em um fluido de uma dada viscosidade e densidade são utilizadas (Tavares,1998).

Em aplicações práticas é muito conveniente e freqüentemente essencial fazer uso de uma partição discreta da escala de tamanhos de modo que a população de partículas é dividida em grupos, cada um dos quais é identificado pelo menor e maior tamanho do grupo.

### **População de partículas**

O valor da função de distribuição de tamanho de partículas pode ser medido experimentalmente em diversos tamanhos fixos que correspondem às aberturas de um conjunto de peneiras disponíveis no laboratório. Representações gráficas são muito úteis e são freqüentemente mais fáceis de avaliar e comparar distribuições de tamanhos, quando a função de distribuição completa é imediatamente visível.

Uma variedade de sistemas de coordenadas tem se tornado popular com vistas a tornar o gráfico da função mais próximo de uma linha reta. O eixo de tamanhos de partícula (abscissa) é normalmente plotado em escala logarítmica. A escala das ordenadas funciona de acordo com o fato da função de distribuição se aproximar a log-log, log-normal ou Rosin-Rammler ou outra distribuição empírica representativa. Papéis gráficos apropriados encontram-se disponíveis para esse propósito (Tavares ,1998).

## Função de distribuição e parâmetro de forma

Devido à sua natureza, a quebra de materiais frágeis como rochas, resulta na geração de uma distribuição de tamanhos de fragmentos e não de um tamanho uniforme de partículas. Desta forma, fragmentação não é um processo determinístico e sim altamente probabilístico, dados às incertezas quanto às propriedades microscópicas do material e ao caráter estocástico da propagação e da bifurcação de fraturas em sólidos.

Submetendo-se duas partículas do mesmo material, tamanho e forma aos mesmos esforços, as distribuições de tamanhos resultantes não vão ser idênticas. Isto se deve às diferentes populações de defeitos existentes em cada partícula.

Conseqüentemente pode-se ter duas ou mais funções de distribuições de massa (FDM) para um mesmo experimento de fragmentação.

Portanto a FDM não é adequada quando queremos analisar ou comparar experimentos em fragmentação. Na verdade o que se utiliza para este fim é a função em escala logarítmica (log-log) da FDM. Quando se aplica a escala logarítmica na FDM obtém-se uma linha reta.

Foi evidenciado experimentalmente que o valor da inclinação desta reta denominada de alfa ( $\alpha$ ) ou ( $n$ ), é um valor característico para os mais diversos processos de fragmentação, inclusive para fenômenos interplanetários como a desintegração de cometas e asteróides ( $\alpha = 1$ ), ver Figura 2.11.

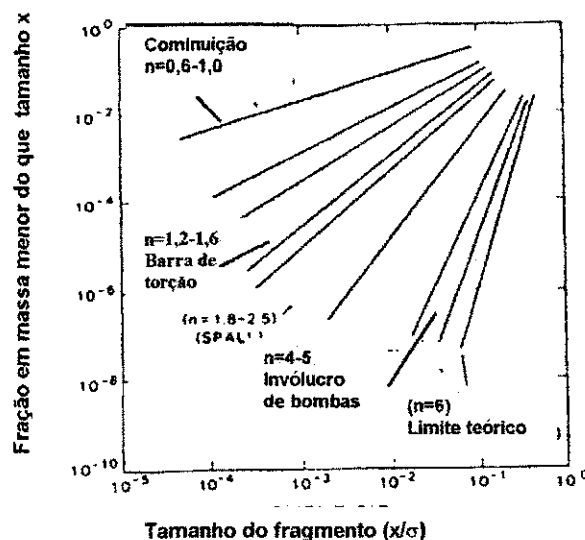


Figura 2.11 - Valor de  $\alpha$  para processos de fragmentação. Fonte : Atkinson, 1987.

### 2.3.2.3 Alguns aspectos de interesse na fragmentação por cominuição

Cominuição é o processo de fragmentação do fragmento sucessivamente.

Quando se lida com materiais particulados, a abordagem tradicional usada na resistência dos materiais e na mecânica de fratura, que se baseia na análise de esforços e deformações específicas, não é normalmente possível e nem conveniente. Partículas não apresentam formatos regulares, de modo que a distribuição interna dos esforços resultante da aplicação de uma carga externa não é conhecida. Além disso, em processos de cominuição, frequentemente somente se tem informação da quantidade de energia elétrica em um equipamento de cominuição e não dos esforços sob os quais a partícula se encontra submetida.

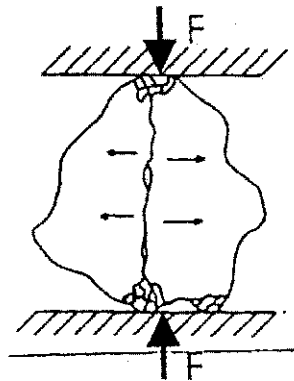


Figura 2.12- Representação da fragmentação de uma partícula. Fonte : Tavares ,1998.

Materiais particulados são fraturados primariamente pela imposição de tensões compressivas aplicadas de maneira lenta ou rapidamente por impacto, ver Figura 2.12. Nos pontos de contato, elevados esforços de compressão e cisalhamento são gerados internamente na partícula, causando deformações inelásticas e intensa fragmentação, mesmo em materiais frágeis. Este efeito aumenta de modo que abaixo de um certo limite de tamanho, a partícula se deforma quase inteiramente de maneira inelástica. Imediatamente abaixo da região de alta densidade de energia de deformação na partícula, existe uma região na qual ocorre o aparecimento de esforços de tração. Estes se estendem até o ponto oposto de aplicação de carga. É nessa região (e em algum defeito em particular localizado ao longo dela) que ocorre a iniciação e a propagação de uma ou mais trincas, que culminam na desintegração da partícula.

Como já foi previamente discutido, na análise da cominuição a abordagem energética é a mais conveniente. Com respeito à quebra de uma partícula, a medida mais importante é a energia de deformação armazenada na partícula no instante da ruptura, chamada energia específica de fratura. Ela pode ser determinada experimentalmente carregando-se individualmente uma partícula de formato irregular, como aquela mostrada na Figura 2.12, e pode também ser calculada integrando-se as forças e deformações. A energia específica de fratura, representada pela área abaixo do gráfico das deformações e cargas, é a energia mínima que deve ser aplicada à partícula para que ocorra a ruptura catastrófica.

Segundo a teoria de Griffith (1920), uma partícula mais fina tem uma menor probabilidade de conter um defeito severo (grande) e será relativamente mais resistente. A medida que as partículas minerais fraturam, os fragmentos resultantes são mais fortes porque as falhas maiores terão desaparecido (Tavares, 1998).

Observa-se, entretanto, que quando o tamanho de partícula diminui abaixo de um certo valor limite, a probabilidade de uma falha crítica encontrar-se na partícula torna-se pequena e as tensões dentro da partícula aproximam-se do limite de plasticidade do material, resultando em intensa deformação plástica. Esse valor é da ordem de alguns micrômetros para diversos minerais e rochas. Sob essas condições torna-se difícil fraturar partículas usando-se esforços de compressão e representam uma situação extremamente desfavorável na cominuição. Uma alternativa nesses casos é a aplicação de esforços de cisalhamento.

É importante salientar, entretanto, que aumentos indefinidos da energia aplicada não serão acompanhados por aumentos indefinidos de fragmentação das partículas: acima de um certo limite (tipicamente quando a energia aplicada é 100 vezes maior que a energia de fratura da partícula) a energia aplicada não mais é consumida na fragmentação, mas dissipada de outras formas, como na aglomeração dos fragmentos e na geração de calor. Esse limite indica que a cominuição é mais eficiente quando realizada em diversos estágios.

A fratura de partículas individuais mostra que quanto mais energia é absorvida pela partícula, mais fina a distribuição de tamanhos da população do produto. Isto resulta no conceito da absorção contínua de energia por uma população à medida que a distribuição de tamanhos se move para granulometrias mais finas.

Na prática, a maior parte da energia usada em uma operação de fragmentação é, na verdade, dissipada na forma de calor, de deformação plástica e não realiza qualquer trabalho útil. Sabe-se, por exemplo, que a energia consumida em operações de cominuição é várias

vezes maior que aquela requerida para aumentar a área superficial. Assim, embora seja esperado que exista uma relação entre a energia requerida para quebrar partículas e a fragmentação resultante, essa relação fundamental somente irá se manifestar se for possível medir precisamente a energia e a fragmentação resultante em um ciclo de aplicação de energia (Tavares, 1998).

#### **2.3.2.4 Dano interno nos fragmentos**

A fragmentação da rocha de monzonito de quartzo por ondas de choque produzidas por impacto plano, revelaram que probabilisticamente, somente uma pequena fração da energia total consumida durante a fragmentação foi usada para criar novas superfícies. Menos de 15 % da energia total detonada foi empregada para realizar um trabalho útil, ou seja, a fragmentação e o deslocamento da rocha (Meyers, 1994).

Microtrincas foram observadas dentro dos fragmentos e a área superficial destas trincas internas excederam bastante a área externa destes fragmentos. Conforme a duração do pulso foi aumentando, à uma pressão constante, a fragmentação aumentou com tamanhos de fragmentos menores. A densidade de trincas (área superficial por unidade de volume)  $S_v$ , que incluem as trincas dentro dos fragmentos, também aumentou com o aumento da duração do pulso. Portanto, a maior parte dos danos está na forma de trincas internas e o tamanho dos fragmentos não são na realidade uma boa medida dos danos produzidos.

## 2.4 Características fractográficas da superfície de fratura

### 2.4.1 Fractografia de vidros

O exame da superfície de fratura normalmente deve seguir uma seqüência. Um dos primeiros passos na análise fractográfica é a reconstrução da peça, para que macroscopicamente se observe o local de origem da fratura. É importante ressaltar que a superfície de fratura não deve ser friccionada/tocada, a fim de se manter a sua integridade. Após a remontagem da peça, é necessário identificar - se os lugares onde um grupo de trincas se encontram ou onde uma única trinca se ramifica, pois estas regiões serão os locais de início da fratura. A localização da origem da fratura deve ser feita com baixo aumento (binocular ou microscópio estereoscópico) ou simplesmente com observação visual. Após essa primeira observação, pode-se, caso necessário, fazer uma análise mais detalhada por microscopia ótica ou eletrônica de varredura. A remontagem da peça fraturada permite visualmente a identificação rápida e segura do estado de tensão presente, pois existe uma relação direta entre o ângulo de ramificação das trincas e o tipo de carregamento que causou a fratura do vidro, conforme mostra a Figura 2.13. Observa-se, também, que quanto maior a energia disponível para a fratura maior será o número de ramificações da trinca (Costa, 2000).

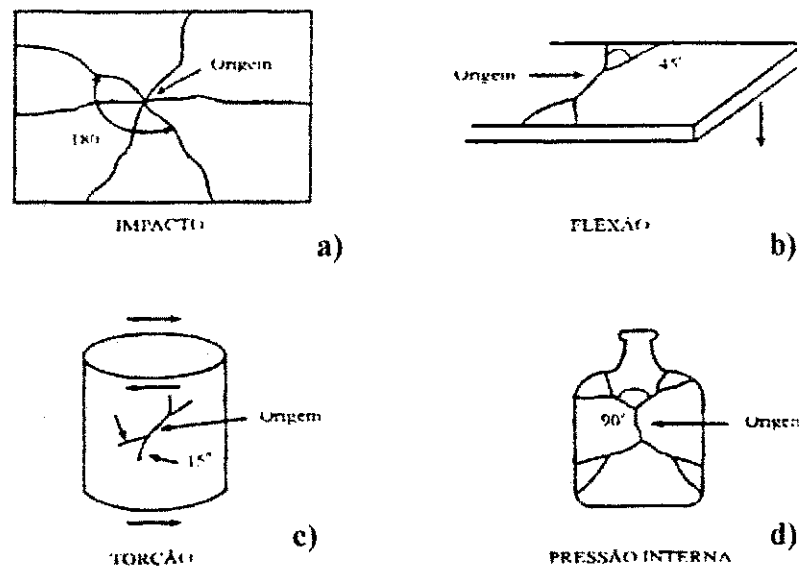


Figura 2.13- Ângulo de ramificação das trincas e o tipo de carregamento de fratura: (a) impacto, (b) flexão, (c) torção e (d) pressão interna. Fonte : Costa, 2000.

As características morfológicas mais importantes da superfície de fratura em vidros são a origem da fratura, o espelho de fratura, a região de névoa ou bruma (“mist”) e a região de ramificações das trincas (“hackle”), conforme mostra a Figura 2.14. Estas características são uma decorrência da interação entre a trinca que se propaga no material, com os campos de tensões atuantes na peça e com as ondas acústicas provenientes da propagação da trinca.



Figura 2.14- Esquema de uma fratura típica em vidros : fratura com início no interior do vidro. Fonte: Costa, 2000.

O espelho de fratura é a região onde a trinca é acelerada, propagando - se em um único plano, com velocidade ainda muito baixa, formando uma superfície plana e lisa que lembra um espelho. Um exemplo da influência do estado de tensões na formação do espelho de fratura pode ser claramente verificado em vidros cuja superfície está submetida a compressão. Neste caso, o raio do espelho de fratura tende a ser maior do que nos vidros cuja superfície não se encontra neste estado de tensão. O motivo é que as tensões compressivas da superfície retardam a aceleração da trinca conseqüentemente, a sua passagem para a região de névoa e de ramificação também é retardada (Costa, 2000).

A região de névoa é formada quando a trinca atinge uma certa velocidade ou intercepta uma inclusão ou encontra uma mudança na direção das tensões principais, fazendo com que se desvie do seu plano original de propagação, formando pequenos sulcos radiais na superfície de fratura. Este desvio resulta na formação de uma superfície com aspecto rugoso, semelhante à da névoa formada por uma queda d' água.

No caso do desvio do plano original devido ao aumento da velocidade, isto ocorre quando a trinca atinge entre 1/2 e 2/3 da velocidade de propagação de ondas transversais no



material. Conseqüentemente, a disponibilidade de grande quantidade de energia durante a fratura resultará em um menor espelho de fratura, pois mais rapidamente a trinca atingirá os valores necessários para que se desvie do plano original.

A região de ramificação das trincas é o estágio seguinte à região de névoa, onde a trinca sofre várias bifurcações. A quantidade de ramificações também fornece informações qualitativas sobre a quantidade de energia disponível durante a fratura, pois quanto maior a energia disponível, maior será o número de ramificações.

Outra característica bem definida da superfície de fratura de materiais vítreos são linhas de "Wallner", esquematicamente representadas na Figura 2.15.

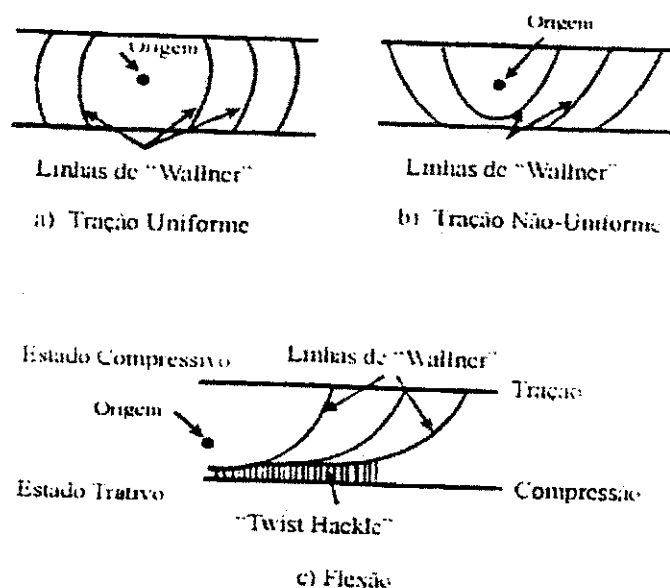


Figura 2.15- Representação esquemática das linhas de "Wallner" na superfície de fratura e a influência do estado de tensão presente na sua formação: (a) tração uniforme, (b) tração não uniforme, (c) flexão. Fonte : Costa, 2000.

As linhas de Wallner são formadas durante o processo de fratura, quando ondas de som são produzidas no interior do material. Conforme cada frente de onda se sobrepõe à frente de propagação da fratura, a trinca momentaneamente desvia-se da direção da tensão principal. Após este desvio momentâneo, a frente de propagação de trinca retorna à direção original da tensão principal. Isto resulta em uma série de arcos na superfície de fratura, os quais são chamados de linhas aproximadas da frente da trinca no momento da interseção com a onda sônica e fornece tanto a direção de propagação da trinca quanto a distribuição das tensões. A

## 2.5 Blindagem compósita para proteção balística

### 2.5.1 Introdução

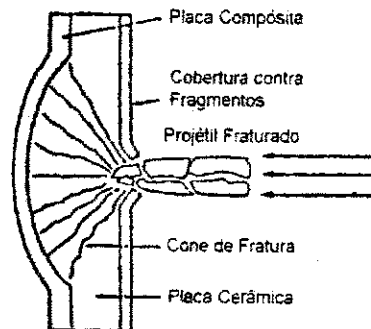


Figura 2.17- Representação de uma blindagem cerâmica + fibra de aramida + epóxi.

Fonte : Ajdelstajn (1998).

A ênfase na pesquisa de blindagem nos anos 60 e começo dos 70 foi sobre materiais leves para proteção pessoal e de pequenas aeronaves. Na Figura 2.17 observa-se o comportamento de uma blindagem leve quando submetida ao impacto de um projétil.

O primeiro sistema de blindagem leve foi constituído por placas cerâmicas de óxido de alumínio sinterizado, coladas a um suporte traseiro dúctil, normalmente alumínio ou fibra de vidro reforçada com plástico. No início de 1960, carbetos de boro prensado à quente substituíram a alumina em algumas aplicações.

Durante os anos 80, a ênfase foi para o desenvolvimento de proteção em veículos terrestres contra o impacto de penetradores de alta energia cinética e com cargas explosivas. Grandes chapas de cerâmica foram usadas. Aperfeiçoamentos em blindagens cerâmicas continuaram a ser feitos até os anos 90 quando a demanda nas Forças Armadas diminuiu rapidamente devido à mudanças na situação política mundial.

Os sistemas de blindagens leves mais conhecidos estão listados em ordem decrescente de densidade de área (ou superficial):

- 1) Chapa de Aço Bimetálica
- 2) Alumina / FRP (Fibra de vidro laminado)
- 3) Carbetos de Silício / FRP
- 4) Silício / Carbetos de Boro / Carbetos de Silício - sinterizado / FRP

direção de propagação é sempre do lado côncavo para o lado convexo das linhas de “Wallner”, enquanto que a distribuição de tensões é dada pela distância entre a linha e a origem.

Outros tipos de marcas importantes que podem ocorrer na superfície de fratura de vidros são as chamadas asas de gaivotas (“Gull Wings”) e os rastros de ramificação (“Wake Hackle”), ver Figura 2.16. Estas marcas na superfície de fratura são provenientes das combinações de duas outras marcas, as linhas de “Wallner” e as ramificações devido a rotação (“twist hackle”).

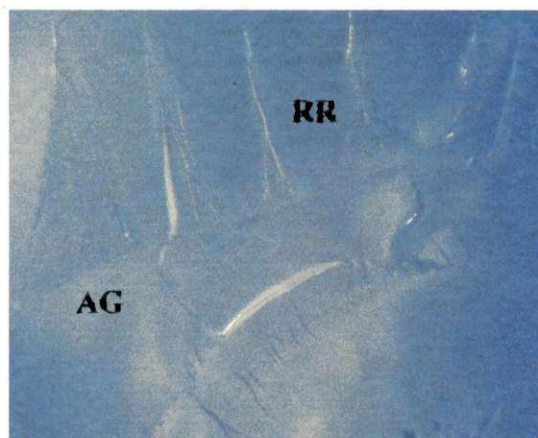


Figura 2.16- Superfície de fratura de uma placa de acrílico com asas de gaivotas (AG) e os rastros de ramificação (RR).

Verifica-se também na Figura 2.16 a formação de duas fortes linhas de “Wallner” que se interceptam formando as asas de gaivotas. Estas marcas estão associadas a presença de inclusões nos materiais, como por exemplo: poros, bolhas e partículas sólidas que vão interferir na direção de propagação da frente da trinca. As marcas de asas de gaivotas e rastros de ramificações (algumas vezes chamadas de cauda (“tail”), estão do lado oposto à origem da fratura.

5) Carbetos de Boro ( $B_4C$ , também identificado como  $SiFB_4C$ , ou silício – livre carbetos de boro – prensado a quente) / FRP

Os materiais cerâmicos usados em blindagem podem ser divididos em monolíticos ou compósitos :

1) Os monolíticos mais testados são :  $Al_2O_3$ ,  $B_4C$ ,  $SiC$ ,  $TiB_2$  e  $AlN$

2) Os seguintes compósitos de matriz cerâmica (CMC) estão sendo testados em blindagens:  $Al_2O_3/SiC$  (whiskers),  $NiTiC$  entre outros.

As blindagens de materiais compósitos são hoje o que se tem de mais moderno e efetivo em termos de proteção balística (Ajdelstajn, 1998). Uma das combinações de grande eficiência é: uma placa de cerâmica com fibras de aramida – epoxi (Gonçalves, 1998).

A blindagem compósita Cerâmica – Fibra Aramida/Epoxi tem alta rigidez e resistência específica, com significativa redução de peso. Por exemplo uma blindagem à base de alumina é 5 vezes mais fina e 3 vezes mais leve do que a de aço (Gonçalves, 1998).

### **2.5.2 Mecanismo de absorção de energia de impacto pela cerâmica**

A função da cerâmica é fornecer um revestimento rígido capaz de fragmentar e erodir a ponta do projétil, convertendo sua energia cinética em energia de fratura, diminuindo a quantidade de movimento e reduzindo a sua capacidade de penetração (Wilkins, 1978). Por outro lado, devido à baixa resistência à flexão da cerâmica, adiciona-se à mesma um laminado de fibra de aramida – epoxi que confere ductilidade à blindagem, suportando a cerâmica e absorvendo o momento residual do projétil e dos próprios fragmentos da cerâmica (Ajdelstajn, 1998). Caso contrário, os excessivos esforços de flexão resultarão em falhas devido à tração desenvolvida na superfície oposta à do impacto.

Wilkins (1978) foi provavelmente o primeiro a reconhecer a importância dos materiais cerâmicos em oferecer resistência, mesmo após fratura, à penetração de um projétil. Também desenvolveu um programa denominado “Hemp Code”, o qual utiliza as equações de continuidade da mecânica e o método de elementos finitos para a simulação de impactos balísticos. Esse programa não substitui os testes experimentais, mas pode comparar os resultados e mostrar como ocorre esse importante fenômeno físico.

Wilkins (1978) concluiu também que o cone de fratura gerado durante o impacto balístico limita a quantidade de cerâmica que participa da transmissão da carga de impacto à

placa de apoio ou de retaguarda (“back up plate”), com o valor de tensão máxima localizada no centro do cone. Quem governa o estado de tensão na cerâmica é a placa de retaguarda. Outro resultado interessante é que duas placas cerâmicas mostraram possuir menor limite balístico do que uma única placa cerâmica de mesma espessura total, isto porque, no primeiro caso é formada prematuramente uma fratura na interface das duas placas. Wilkins (1978) observou que para aumentar a capacidade de erosão da cerâmica sobre o projétil, a mesma deve se manter o maior tempo possível colado à placa de retaguarda e que impactos realizados sobre cerâmica de alumina com projéteis de forma arredondada (“blunt”), por causarem fratura em uma área maior, penetram mais do que projéteis de forma pontiaguda, ambos à uma mesma velocidade.

Basicamente Wilkins (1978) dividiu a penetração da cerâmica por um projétil em uma blindagem de material composto em 3 estágios (Figura 2.18):

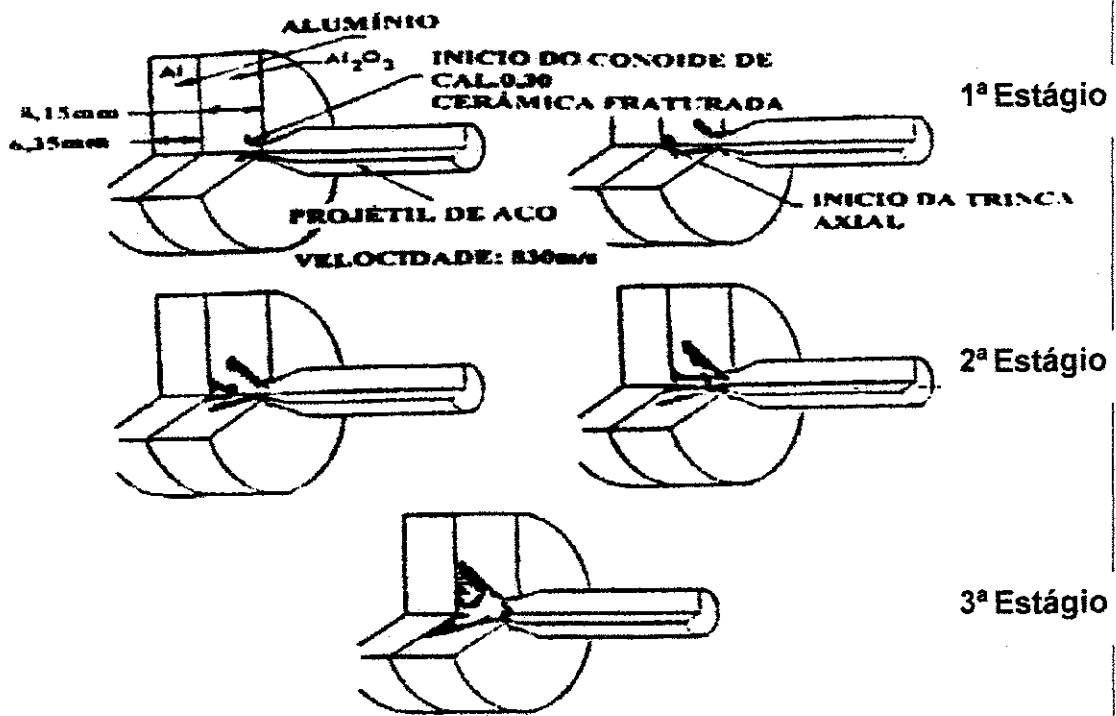


Figura 2.18 - Estágios de penetração em uma cerâmica. Fonte : Wilkins (1978).

1º Estágio:

A cerâmica não perde a integridade ;  
o projétil perde 20% da energia cinética e sua ponta é erodida ;  
não há penetração e ocorre a propagação da onda de compressão.

2º Estágio:

Onda de compressão refletida em tração;  
início da fratura da cerâmica;  
formação do cone de fratura;  
fragmentos usinam o projétil e o projétil perde aproximadamente 40% de sua massa.

3º Estágio :

Início da penetração;

nova reflexão da onda de compressão ( como uma onda trativa criando trincas que caminham em direção a superfície de impacto da cerâmica);

fratura total da cerâmica (coalescência das trincas formadas na superfície de impacto que se propagam na direção da placa de retaguarda e das trincas formadas pela onda trativa) e o projétil perde aproximadamente 60% de sua massa

Mayseless et al. (1987) examinando o fenômeno de impacto e o mecanismo que impede a penetração, propuseram a seguinte seqüência de eventos:

- O impacto do projétil com a face cerâmica da blindagem cria ondas de choque compressivas com pressões extremamente altas.
- A onda de choque propaga através do projétil e da cerâmica com as respectivas velocidades sônicas dos materiais (no aço 4876,8 m/s e na cerâmica B<sub>4</sub>C = 14630,4 m/s). A grande diferença nas velocidades sônicas resulta no encontro das ondas no projétil. Esse choque causa a fratura do corpo do projétil, um resultado desejado.

- Como os fragmentos do projétil viajam dentro da peça cerâmica fraturada, a área de carga resultante sobre o suporte traseiro decresce abaixo do diâmetro do projétil.
- O suporte traseiro (placa de apoio) deve então ter a habilidade de absorver a energia dos fragmentos do projétil e da peça cerâmica por deflexão dinâmica e desacelerar as partículas. Se a junção for correta, toda a energia residual do projétil é distribuída, evitando-se cargas localizadas as quais excederiam a resistência ao cisalhamento do suporte, resultando num furo e conseqüente falha do sistema de blindagem.

Mayselless et al. (1987) também afirmam que a resistência à flexão e a capacidade de defletir sem se romper são características fundamentais para a placa de apoio (retaguarda). Além de notar que a erosão do projétil é extremamente dependente da espessura da cerâmica, observaram também que duas placas cerâmicas mostraram possuir menor limite balístico do que uma única placa cerâmica de mesma espessura total, isto porque as placas finas perdem sua resistência à flexão, com fratura prematura sob impacto. Para baixas velocidades (menor que 200 m/s) um placa de metal é mais eficiente que um compósito cerâmica – metal.

Provavelmente o resultado mais importante de Mayselless et al. (1987) foi a contabilização das energias envolvidas no processo de fratura da cerâmica, neste caso alumina AD-85, observaram que menos de 2J eram consumidos na fratura da cerâmica e um 1 KJ no trabalho de erosão. Portanto a energia gasta na fratura da cerâmica é de valor desprezível, sendo a erosão o fenômeno de maior importância para a eficiência de um sistema de blindagem.

Horsfall e Buckley (1996) introduziram artificialmente em uma cerâmica de alumina uma falha representando uma trinca radial gerada por um impacto balístico. Concluíram que se a cerâmica estiver bem colada à placa de retaguarda e bem confinada frontalmente por um tecido contra fragmentos, a redução da eficiência balística da blindagem é desprezível.

Conseqüentemente não é necessário trocar um painel de blindagem por causa de uma trinca na cerâmica desde que a mesma esteja bem colada e a cobertura anti – fragmento preserve sua integridade estrutural. Mostraram também a importância da erosão para a eficiência balística.

Gonçalves (1998) ressaltou que existe uma relação entre as dimensões da placa e a área ideal para a propagação do cone de fratura. Se a placa for pequena, o cone de fratura não terá

espaço suficiente para propagar, e menor será a conversão da energia cinética do projétil em energia de fratura dos fragmentos da cerâmica. Através de ensaios balísticos realizados, estima-se que as dimensões mínimas para a completa propagação do cone de fratura sejam as seguintes :

- Calibre 5,56 mm e 7,62 mm – 50 mm x 50 mm
- Calibre 0.50 pol. – 80 mm x 80 mm

Suzuki e Natsumura (1990) mostraram que é necessário que o projétil tenha um certo valor de energia cinética para que haja a formação do cone de fratura na cerâmica.

Maekawa e Shin (1990) impactando placas cerâmicas com esferas de aço e carbeto de silício, a baixa velocidade (10 a 250 m/s), mostraram que vários tipos de dano são formados, como por exemplo: trincas circulares, trincas cônicas, trincas radiais e laterais além de crateras. Praticamente as crateras só foram formadas para os projéteis de SiC para velocidades acima de 100 m/s (antes disso a profundidade da cratera era muito pequena). Maekawa e Shin (1990) plotaram um gráfico de velocidade x profundidade da cratera. Para velocidades até 100 m/s o comportamento é linear com pouca mudança no valor da profundidade da cratera, mas a partir de 100 m/s ocorre um verdadeiro salto (discontinuidade no gráfico) e a profundidade começa a aumentar enormemente.

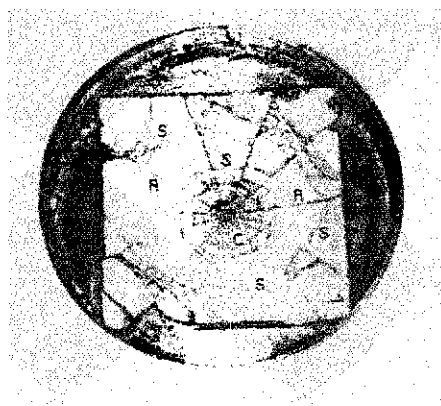


Figura 2.19- Trincas radiais (R) e trincas de “spall” (S) ou circunferenciais (C) em uma cerâmica de alumina impactada balisticamente. Fonte : Sherman (2000).

Sherman (2000) conclui que impactos balísticos com velocidades intermediárias (700 a 3000 m/s) causam danos que são uma combinação de dano quase-estático e dano dinâmico. Nas cerâmicas (de alumina) o dano quase-estático é caracterizado por trincas



radiais (Figura 2.19) devido a flexão e a formação do cone de fratura. O dano dinâmico causado pela interação das ondas refletidas pelas interfaces são caracterizados por trincas circunferenciais (“spall”), Figura 2.19, e um grande número de fragmentos de pequeno tamanho e pós ao redor do ponto de impacto (fratura tridimensional).

Sherman (2000) também demonstrou que o principal mecanismo de resistência à penetração da cerâmica é a formação do cone de fratura, responsável pela maior distribuição da pressão de impacto sobre a placa de retaguarda (“back up plate”). Este fato é importante já que a energia gasta para deformar a placa de retaguarda é um dos principais mecanismos de dissipação da energia cinética do projétil em um sistema de blindagem; o outro mecanismo importante é o vôo dos fragmentos da cerâmica, ou seja, a troca de quantidade de movimento entre o projétil e os fragmentos.

O confinamento lateral ( com pressão igual à zero ou pressão maior do que zero) tem moderado efeito nos mecanismos de dano quase-estático e nenhuma influência nos mecanismos de dano dinâmicos ( Sherman , 2000 ).

Woodward (1994) verificou praticamente a mesma redução de penetração quando impactou balisticamente diversos tipos de aluminas confinadas lateralmente e frontalmente e aluminas sem nenhum confinamento.

Outro fato importante para a compreensão do comportamento balístico da cerâmica em um sistema de blindagem composto, é saber que existe um grau de rigidez ótimo por trás da cerâmica que maximiza a sua eficiência balística. Jang et al.(1997) demonstraram que pouca rigidez causa a fratura prévia da cerâmica e elevada rigidez faz com que o dano seja extremamente localizado e, portanto, ambas situações degradam a eficiência balística. Portanto, uma certa flexibilidade maximiza a eficiência balística da cerâmica.

Gama et al. (2001) comentaram, através da simulação em computador, que o aumento do coeficiente de atrito da cerâmica não altera significativamente a eficiência balística da blindagem.

Woodward (1994) impactou três tipos diferentes de cerâmica de alumina com diferente durezas e obteve a mesma redução de penetração.

Meyers (1994) comentou a existência de uma zona de cominuição à frente do projétil que foi batizada de Zona de Mescall (John Mescall previu por simulação em computador a existência dessa zona). Horsfall (1996) verificou a existência de uma zona de cominuição, na cerâmica, nas vizinhanças do ponto de impacto à frente do projétil.

Concluindo, Gama et al. (2001) resumiram brilhantemente o balanço de energia que ocorre durante um impacto balístico em um sistema de blindagem composta frágil/dúctil (cerâmica/placa de retaguarda), com base na experiência acumulada por diversos pesquisadores nos últimos 20 anos.

A energia cinética do projétil é distribuída e absorvida da seguinte forma :

- O processo de fratura da cerâmica absorve insignificante quantidade de energia do projétil, em torno de 0,2 %.
- A deformação da placa de retaguarda absorve de 20 a 40 % e não se deve esquecer que o cone de fratura na cerâmica controla a transmissão de energia para a placa de retaguarda.
- 10 a 15 % da energia cinética é gasta para deformar o projétil.
- Uma grande quantidade de energia é consumida pela ejeção dos fragmentos cerâmicos.

### 2.5.3 Influência do material usado na interface no comportamento de um sistema de blindagem frágil/dúctil sob impacto balístico

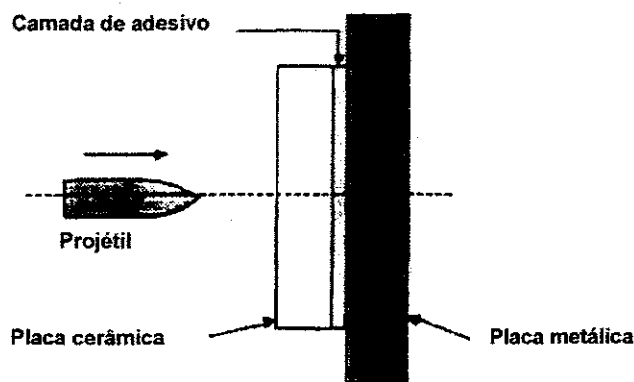


Figura 2.20 - Representação esquemática dos componentes básicos de uma blindagem : placa de cerâmica, camada de adesivo na interface e placa de apoio (metálica). Fonte : Zaera et al.(2000).

Wilkins (1978) em um trabalho pioneiro na década de 70 sugere que a espessura do adesivo polissulfídico usado em um sistema de blindagem alumina / alumínio seja de 0,7 mm.

Hoje sabe-se da vital importância dos materiais usados na interface para a otimização de um sistema de blindagem para proteção balística. Na Figura 2.20 são apresentados os componentes básicos de uma blindagem compósita: placa de cerâmica, camada de adesivo na interface e placa de apoio (metálica).

Quando um projétil impacta uma placa cerâmica a alta velocidade, ondas de tensão compressivas propagam-se na direção do impacto. Quando esta onda alcançar a superfície “inferior” da placa cerâmica, ele é parcialmente refletida como uma onda de tensão trativa que produz a fratura e a fragmentação da cerâmica.

Portanto a interface tem como função básica manter os fragmentos cerâmicos bem colados à placa de retaguarda, reduzindo os fragmentos ejetados, minimizar a energia refletida e atenuar a onda de tensão. Martínez et al. (1998) chegaram ao ponto de comentar que o melhor era que os materiais fossem soldados.

Meyers (1994) propôs as seguintes expressões para avaliar a energia total que reflete ou é transmitida em uma interface :

$$f_t = 2f_i / (1 + \alpha) \quad (2.2)$$

$$f_r = f_i (1 - \alpha) / (1 + \alpha) \quad (2.3)$$

onde  $f_t$  é a tensão total gerada pela onda incidente,  $f_r$  é a tensão total gerada pela onda refletida,  $f_i$  é a tensão total gerada pela onda transmitida e  $\alpha$  é a razão de impedância entre o material 1 e o material 2 (placa de apoio). Portanto para não se ter reflexão é necessário que o material 1 e o material 2 tenham a mesma impedância e a união entre os mesmos seja total e perfeita.

Para se ter idéia da capacidade que uma interface tem no que tange a reflexão, comentar-se-á o experimento realizado por Martínez et al. (1998). Martínez et al. (1998) colocaram duas barras de aço bem polidas (da máquina de ensaio Hopkinson) em contato, e constataram que 1,1 % da energia de incidência ainda era refletida. O motivo dessa reflexão foi a presença de ar preso entre as barras devido a diferença de rugosidade das superfícies em contato.

Martínez et al. (1998) em ensaios com a barra Hopkinson e corpos de prova compostos por cerâmica com placa de retaguarda de aço demonstraram que os adesivos rígidos como o

epoxi ou o poliéster refletem menos energia do que os adesivos elásticos como o poliuretano e os polisulfídicos. Porém os adesivos elásticos possuem maior capacidade de receber múltiplos tiros devido a maior capacidade de se deformarem, ao contrário dos adesivos rígidos, que sob o impacto de um tiro fraturam dramaticamente. Outro resultado verificado neste trabalho foi que quanto maior for a espessura do adesivo maior é a reflexão e maior é a capacidade de minimizar a ejeção de fragmentos da cerâmica. Isto sugere que a melhor solução para um sistema de blindagem é o uso de um adesivo elástico com uma espessura otimizada. Levantaram também curvas tensão x deformação em regime estático e dinâmico, de diversos tipos de adesivos, onde notaram claramente a diferença drástica entre os dois tipos de curvas. Este resultado é de suma importância para, por exemplo, melhorar os modelos computacionais para a simulação de impactos balísticos.

Zaera et al.(2000) através de simulação em computador e ensaios balísticos em corpos de prova compostos por cerâmica com placa de retaguarda de aço, demonstraram que os adesivos rígidos como epoxi causam menor fragmentação na cerâmica do que os adesivos elásticos como poliuretano, devido à grande rigidez do epoxi. Verificaram também que quanto maior a espessura do adesivo maior é a área deformada na placa de retaguarda e menor é a fragmentação das placas circunvizinhas da placa impactada. Isto ocorre devido à maior capacidade de amortecimento da onda de tensão criada pela maior espessura do adesivo.

Jang et al. (1997) impactaram com munição 7.62 mm AP corpos de prova compostos por placa de alumina coladas por meio de resina epoxi à placas híbridas Kevlar / Spectra. Variando a espessura do adesivo na interface cerâmica/laminado constataram uma mudança no modo de fratura da cerâmica devido à variação na rigidez da interface, com conseqüente efeito no valor do  $V_{50}$  ( velocidade onde há 50% de probabilidade de penetração do alvo pelo projétil). Neste trabalho foi demonstrado que os mais altos valores de  $V_{50}$  foram encontrados para a espessura de adesivo de 1,3 mm e os mais baixos, para espessuras de 0,8 mm e 2,3 mm, estas últimas com resultados próximos.

Jang et al. (1997) explicaram esse comportamento afirmando que no caso da espessura de 0.8 mm, muito flexível, a fratura é governada por tensões de flexão na placa de retaguarda. Já a de 2.3 mm, muito rígida, a fratura ocorre na face frontal, é mais localizada, com pouca distribuição de energia de impacto, além de descolamento interfacial do adesivo e conseqüentemente com menor área da placa híbrida solicitada. Portanto, o melhor resultado

foi obtido para a espessura intermediária de 1.3 mm, onde a fratura não ocorre preferencialmente nem na superfície frontal nem na superfície posterior, ocorrendo a completa destruição da cerâmica, completo descolamento interfacial do adesivo e maior área solicitada da placa híbrida, ou seja, maior distribuição de energia de impacto por todos os elementos componentes do compósito.

Cimpoeru (1996) verificou o comportamento sob impacto de cargas de serviço, por exemplo, a queda de um fuzil sobre cerâmicas de alumina fixadas à placa de retaguarda de aço, por meio de dois tipos distintos de sistemas de fixação: adesivo polisulfídico (0,7 mm de espessura) e sistema tipo Velcro comercialmente conhecido como LAST. Observou que as cerâmicas fixadas pelo Velcro (LAST) sofriam fratura prematura devido à maior flexibilidade desse sistema quando comparado à rigidez e grande resistência à compressão do sistema com uma camada de 0,7 mm de adesivo polisulfídico.

Bruck (2000) simulou impactos em FGM (“Functionally Graded Materials”). Conclui que o número de interfaces em um sistema de blindagem não diminui o pico de tensão da onda refletida, porém o tempo para se atingir esse pico é retardado. Esse atraso para se atingir o pico de tensão é chamado de tempo para haver a fragmentação (“time delay benefit”), sendo uma forma de aumentar a eficiência da blindagem não por atenuação da onda de choque mas por retardo na fragmentação.

Gama et al. (2001) simularam a propagação de uma onda unidimensional no sistema de blindagem CIA (Composite Integral Armor) do subprograma CAV (Composite Armored Vehicle) e concluíram que a presença de uma fina camada de borracha entre a alumina e o laminado polimérico da blindagem, atrasa e reduz a amplitude da onda de tensão para a placa de retaguarda. O grande problema da camada de borracha é que ela não é rígida e conseqüentemente reduz a rigidez estrutural da blindagem. Gama et al. (2001) também simularam e experimentaram a espuma de alumínio como material na interface e concluíram que além de atrasar e reduzir a amplitude da onda de tensão (a redução não é significativa), a espuma de alumínio não denigre a rigidez estrutural da blindagem.

San Miguel (1981) desenvolveu para o exército norte americano pisos para carros de combate absorvedores de energia explosiva. Os pisos eram na verdade um sanduíche de vários materiais, compostos basicamente por : duas chapas de aço e entre essas duas chapas diversas combinações de materiais como chapas de madeira de balsa (com absorção de energia específica equivalente ao do aço alveolar para condições de carga estática), de aço

alveolar (com o interior cheio de microesferas de vidro), de laminados de kevlar e chapas finas de aço (que por ação de membrana transmite uniformemente a carga de choque), além de recomendar até mesmo o simples espaçamento entre duas chapas consecutivas.

San Miguel (1981) notou que a presença de microesferas no interior das chapas alveolares causavam pouco aumento na eficiência do sistema. Basicamente esse sistema absorve a onda de choque por deformação mecânica dos materiais envolvidos e reflexão da mesma nas interfaces.

O que todas essas pesquisas tem demonstrado é que para um sistema de blindagem cerâmica / placa de retaguarda (frágil/dúctil) o material usado na interface deve atender à três requisitos básicos :

- Adesão – a máxima possível para manter os fragmentos o maior tempo possível à frente do projétil.
- Rigidez – existe uma rigidez ideal que maximiza a eficiência da cerâmica sob impacto balístico.
- Impedância de Choque – é um compromisso entre reflexão, atenuação e transmissão da onda de tensão que atravessa o sistema de blindagem.

Com relação a Impedância podemos dizer que o material ideal para a interface é aquele que “absorve” (sem reflexão) e atenua toda a onda de tensão incidente. Quanto maior a reflexão na interface de um sistema de blindagem frágil/dúctil menor o dano na placa de retaguarda dúctil e menor o tempo para ocorrer a fragmentação (“time delay benefit”) da cerâmica. Por outro lado, quanto maior a transmissão da onda de tensão incidente maior o tempo para ocorrer a fragmentação (“time delay benefit”) da cerâmica e maior o dano na placa de retaguarda dúctil.

Com relação à atenuação, quanto maior a atenuação da onda de tensão incidente menor o dano na placa de retaguarda dúctil e maior o tempo para ocorrer a fragmentação (“time delay benefit”) da cerâmica. O tempo para ocorrer a fragmentação da cerâmica (“time delay benefit”) e o dano na placa de retaguarda dúctil podem ser considerados como duas das mais importantes variáveis para a otimização da eficiência de um sistema de blindagem frágil/dúctil. Portanto, o material da interface deve ser escolhido e dimensionado de acordo, principalmente com estas variáveis para que se atinja a máxima eficiência balística do sistema de blindagem.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Materiais

##### Placa de alumina

Utilizou-se placas cerâmicas à base de alumina nas dimensões de 8 mm, 10 mm e 12,7 mm de espessura e 45 mm x 45 mm de área. As propriedades do material cerâmico, fornecidas pelo fabricante ( NGK do Brasil ), podem ser vistas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades da placa de alumina fornecida pelo fabricante

% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dureza(HRC)	Resistência à Flexão(MPa)	Resistência à Compressão(MPa)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) x 10 <sup>3</sup>
87	90	250	1000	3,54

Fonte : NGK Ind. e Comércio Ltda.

### **Adesivo de Sika 255FC usado na colagem**

O Sikaflex (Sika) 255 FC é um adesivo elástico de alta viscosidade, com excelente resistência ao escorrimento e que absorve muito bem as variações dimensionais. É um poliuretano monocomponente que cura ao entrar em contato com a umidade do ar, transformando – se num elastômero resistente. Trata – se de um adesivo resistente à água, água do mar, efluentes, ácidos e bases diluídas; resiste temporariamente a combustíveis, óleos minerais, vegetais, gorduras e óleos animais. Não resiste a ácidos orgânicos, álcool, ácidos e bases minerais concentrados e solventes de tintas. Martinez (1998) observou que o tempo de cura do Sika 255 FC não influencia seu comportamento dinâmico.

### **Ativador Sika 210T**

Sika Primer 210T é um primer de baixa viscosidade, indicado para melhorar a adesividade dos adesivos e selantes Sikaflex sobre alumínio, aço galvanizado e alguns plásticos .

### **Placa de policarbonato**

O Policarbonato é um dos mais importantes termoplásticos de engenharia, desenvolvido na Alemanha em 1950 e colocado em disponibilidade para comercialização em 1959.

O Policarbonato é o termoplástico de maior resistência ao impacto. É cerca de 250 vezes mais resistente que o vidro e 30 vezes mais do que o acrílico. Aplicações típicas : placas resistente ao impacto como janelas de segurança, escudos de proteção, cabines de proteção, capacetes e etc.

### **Placa de acrílico**

O acrílico é um termoplástico de estrutura química amorfa, possui uma excelente transparência, dureza superficial, rigidez, resistência à choques, isolamento acústica e capaz de amortecer vibrações. Algumas aplicações típicas : todos os tipos de visores, lentes de



óculos, lanternas de automóveis e como componente de blindagens transparentes para proteção balística.

### Placa de PEUAPM

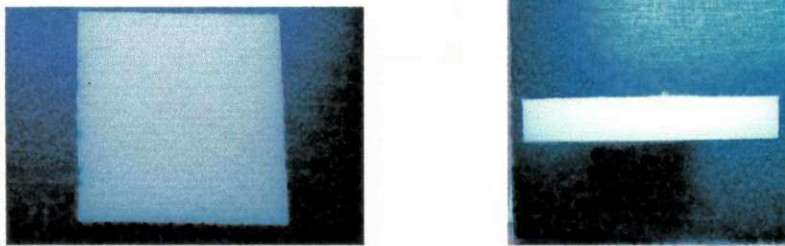


Figura 3.1 - Placa de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM).

O polietileno de ultra –alto peso molecular (PEUAPM) foi comprado na forma de placas de 3m x 3m x 1 m, sendo produzido pela AHM Indústria e Comércio Ltda. Os fabricantes processam o PEUAPM em formas de barras, tubos e perfis via extrusão e placas através da moldagem por compressão, Figura 3.1.

O PEUAPM possui excelente resistência à abrasão, maior resistência ao impacto do que qualquer outro plástico, baixo coeficiente de fricção, boa resistência química, muito estável, hidrofóbico, excelentes propriedades dielétricas e isolantes. Algumas aplicações: implantes ortopédicos, radomes de radar e dutos para a indústria petroquímica. As placas moldadas de espessura de 25 mm de PEUAPM são capazes de suportar tiros de calibre ponto 38 (.38) a uma distância de 1,50 m. O fabricante fornece os seguintes dados sobre o material, Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Propriedades das placas de PEUAPM fornecidas pelo fabricante

Material	Polietileno de ultra alto peso molecular		
Carac. Físicas	Método ASTM	Unidade	Valor
Densidade	D792	kg/m <sup>3</sup>	0,94 x 10 <sup>3</sup>
Resist. à Tração	D651	MPa	39,0
Resist. à Compressão	D695	MPa	16,54
Resist. Flexão	D790	MPa	6,893

Fonte : AHM Ind. e Comércio Ltda.

### **Materiais usados na interface**

O policarbonato alveolar é o material termoplástico mais resistente à impactos usado na construção civil, Figura 3.2.

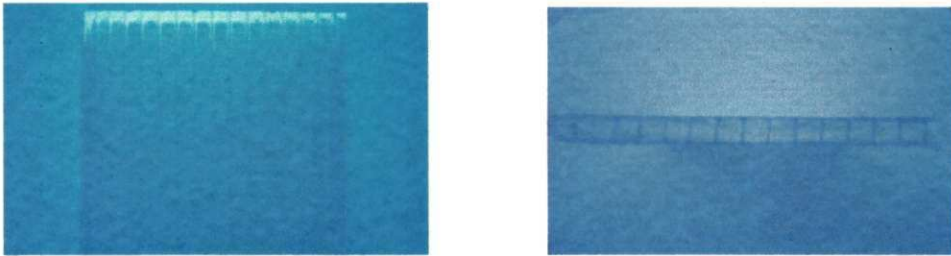


Figura 3.2 - Placa de Policarbonato Alveolar .

O Feltro foi comprado no comércio local, com composição química de 100 % lã (caracterizado no CECIT – SENAI), Figura 3.3.

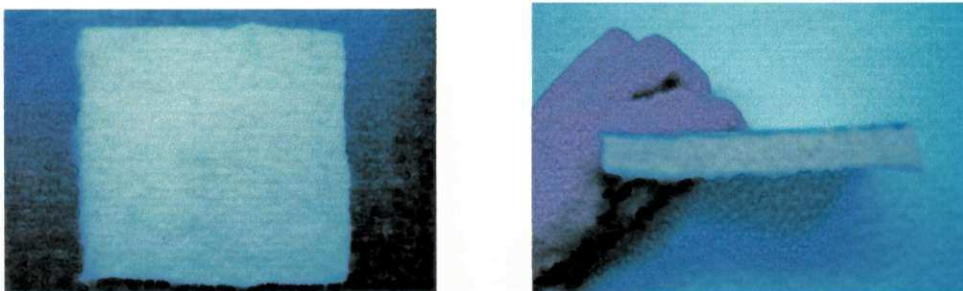


Figura 3.3 - Placa de Feltro.

A borracha é vendida na forma de placas em diversas espessuras para uso automotivo, Figura 3.4.

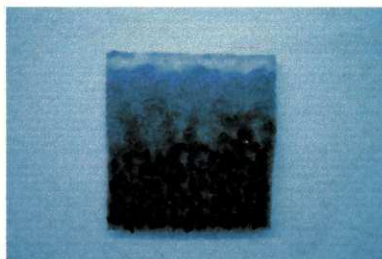


Figura 3.4 - Placa de borracha .

A espuma de poliuretano é vendida na forma de placas para usos como isolante térmico e em sistemas de refrigeração, Figura 3.5.

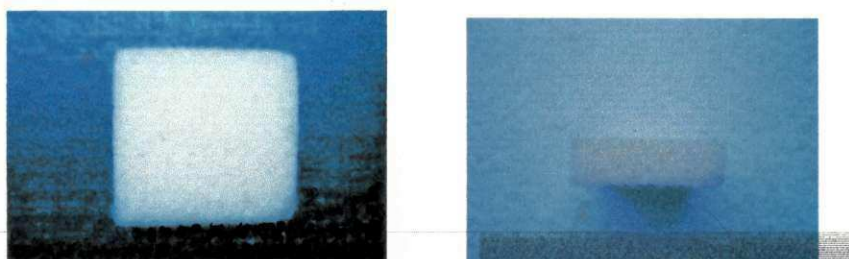


Figura 3.5 - Placa de espuma de poliuretano.

Na Tabela 3.3 observa – se as propriedades dos materiais usados na interface entre a cerâmica e a placa de apoio (“back plate”).

Tabela 3.3 – Propriedades dos materiais usados na interface.

MATERIAL DA INTERFACE	DENSIDADE SUPERFICIAL (D.S.)
Policarbonato alveolar	1,72 kg/m <sup>2</sup>
Feltro	3,3 kg/m <sup>2</sup>
Borracha	15,3 kg/m <sup>2</sup>
Espuma de poliuretano	0,4 kg/m <sup>2</sup>

### 3.2 Metodologia experimental

#### 3.2.1 Tipos de corpos de prova

#### Compósitos fabricados para o desenvolvimento da blindagem para proteção balística

Foram fabricados diversos tipos de compósitos para a seleção do tipo e espessura da placa de retaguarda e espessura da placa de cerâmica:

Tabela 3.4 – Compósitos fabricados durante o desenvolvimento da blindagem

Tipo e espessura da cerâmica	Material da interface	Placa de retaguarda
alumina de 8 mm	adesivo Sika 255	policarbonato (200mm x 200mm x 10mm ) .
alumina de 8 mm	adesivo Sika 255	acrílico (200mm x 200mm x 15mm)
alumina de 8 mm	adesivo Sika 255	acrílico (200 mm x 200 mm x 24 mm)
alumina de 8 mm	adesivo Sika 255	PEUAPM (200 mm x 200 mm x 20 mm)
alumina de 8 mm	adesivo Sika 255	PEUAPM (200 mm x 200 mm x 15 mm)
alumina 10 mm	adesivo Sika 255	PEUAPM (150 mm x 150 mm x 15 mm)
alumina 12,7 mm	adesivo Sika 255	PEUAPM (150 mm x 150 mm x 15 mm)

## Compósitos para blindagens de proteção balística

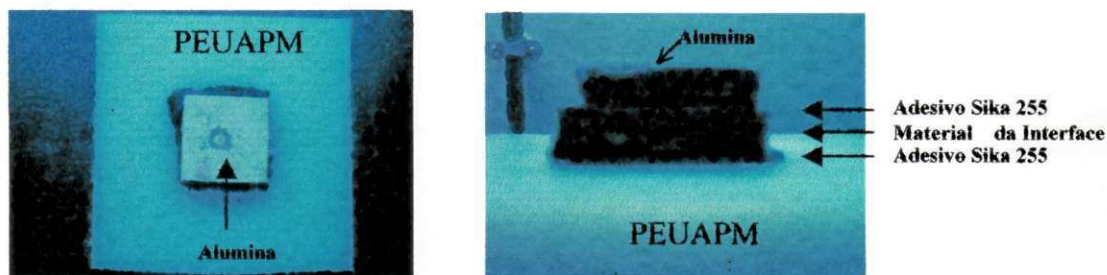


Figura 3.6 - Materiais componentes do compósito usado como blindagem : placa de cerâmica de alumina, camada de adesivo na interface (Sika 255FC), material da interface (borracha) e placa de apoio de PEUAPM.

Os compósitos foram fabricados com uma placa de alumina fabricada pela NGK Indústria e Comércio Ltda de 8 mm de espessura e 45 mm x 45 mm de área, um placa de apoio de polietileno de ultra –alto peso molecular de 15 mm de espessura e 150 mm x 150 mm de área, produzida pela AHM Indústria e Comércio Ltda, Figura 3.6.

O adesivo a base de poliuretano escolhido para colagem das cerâmicas nas interfaces e das interfaces na placa de apoio foi o Sika 255 FC. Quatro tipos de materiais para a interface foram selecionados e testados :

- Policarbonato alveolar
- Feltro
- Borracha
- Espuma de poliuretano

Todas as interfaces tinham 10 mm de espessura e 50 mm x 50 mm de área.

Os compósitos foram montados com diferentes interfaces, conforme codificação apresentada na Tabela 3.4, Figura 3.7 e Figura 3.8. Em um dos tipos a cerâmica foi colada diretamente na placa de retaguarda ( Sika – adesivo Sika 255FC), Figura 3.8.b. Foram fabricadas quatro amostras para cada tipo de corpo de prova.

Tabela 3.5 – Codificação dos compósitos usados no experimento

Material da Interface	Código
Adesivo Sika 255FC	Sika
Policarbonato Alveolar	PC
Feltro	Feltro
Borracha	Borr
Espuma de poliuretano	PU

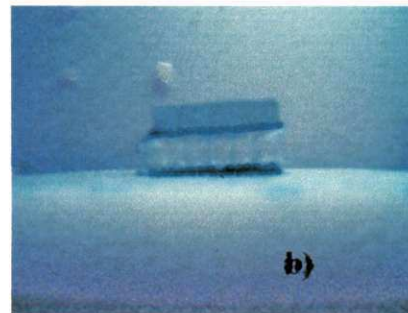


Figura 3.7 - Compósitos com seus respectivos materiais na interface : a) Espuma de poliuretano e b) Policarbonato alveolar.

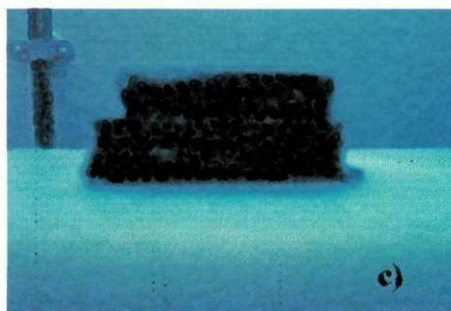
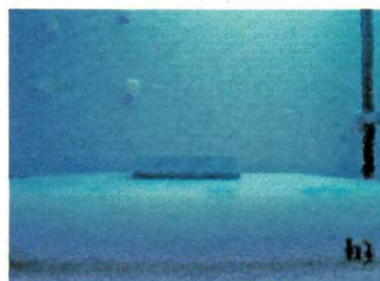
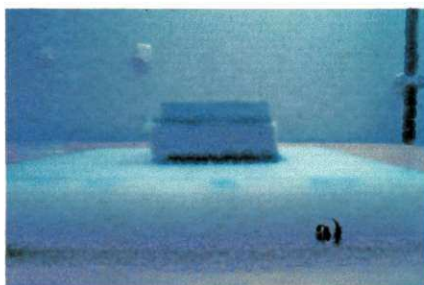


Figura 3.8 - Compósitos com seus respectivos materiais na interface : a) Feltro, b) Adesivo Sika 255FC e c) Borracha.

### 3.2.2 Processo de fabricação dos compósitos

Os compósitos foram fabricados seguindo-se os passos abaixo :

- Corte com serra de fita dos materiais usados na interface e da placa de apoio.
- Lixamento com lixa de ferro (80 mesh) das interfaces não porosas (borracha e policarbonato alveolar) e do polietileno de ultra – alto peso molecular (PEUAPM), policarbonato e acrílico - preparação para colagem.
- Aplicação do ativador químico denominado Sika 210, por meio de um pincel, nas superfícies da borracha, policarbonato alveolar, cerâmica de alumina, do PEUAPM, policarbonato e acrílico - preparação para colagem.
- Construção de uma moldura de alumínio de 0.8 mm de espessura e área de 50 x 50 mm, reutilizável, que era colocada sobre a placa de apoio e preenchida com o adesivo Sika 255FC em toda a sua espessura e área, para garantir uma mesma espessura de adesivo para todos os corpos de prova, Figura 3.9. Em seguida colocava-se sobre o adesivo o material a ser colado (cerâmica ou material para a interface). Sobre o conjunto descrito anteriormente colocava-se um peso, constituído por quatro placas de acrílico sobrepostas, de 10N por 120s para melhorar a homogeneização da espessura do adesivo, ver Figura 3.10.
- O tempo de cura para todas as amostras foi de 48 horas.

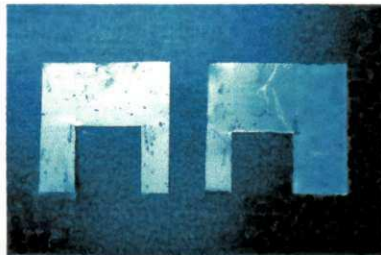


Figura 3.9 - Moldura de alumínio usada na confecção dos corpos de prova

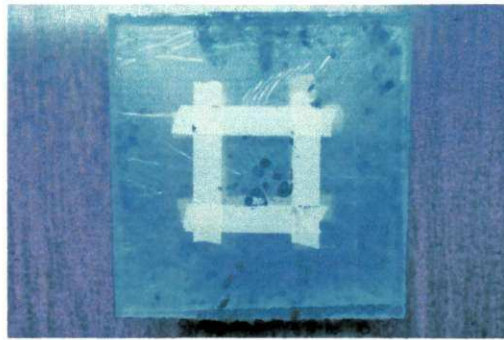


Figura 3.10 – Peso de 10N usado para melhorar a homogeneização da espessura do adesivo.

### 3.2.3 Análise granulométrica dos fragmentos

O grau de fragmentação de um material pode ser caracterizado inequivocamente através da medida da distribuição de tamanhos. Vários métodos existem, alguns são “on line” dentro de uma mina ou usina de beneficiamento, outros requerem a retirada de amostras para a subsequente análise em laboratório, e outros ainda visam medir a distribuição granulométrica do material in situ. Os tipos e os princípios de medição usados nas várias técnicas dependem do material e principalmente dos tamanhos de fragmentos a serem medidos, Tabela 3.5.

Tabela 3.6– Métodos de análise granulométrica.

Método	Intervalo de aplicação( $\mu\text{m}$ )
Fotografias/imagens de vídeo	> 10 000
Peneiramento	10 - 100 000
Elutriação	5,0 – 40
Microscopia ótica	0,25 - 50
Sedimentação gravitacional	1,0 – 40
Sedimentação centrífuga	0,05 – 5
Microscopia eletrônica	0,005 – 1

Fonte : Tavares (1997).

Na maior parte dos casos a medida de distribuição granulométrica de materiais é feita no laboratório, a partir de amostras coletadas cuidadosamente na usina. O método mais usado



na medida de distribuição granulométrica de materiais particulados é o peneiramento. Este foi o método usado neste trabalho para a Análise Granulométrica dos fragmentos resultantes dos impactos balísticos.

O método consiste na passagem de uma quantidade conhecida de amostra de material sucessivamente através de peneiras com aberturas cada vez menores. No final deste processo, a quantidade de material retido em cada peneira é pesado para determinar-se a percentagem naquela fração de tamanhos. O peneiramento é normalmente realizado a seco ou a úmido e as peneiras são normalmente agitadas de modo a permitir-se a exposição das partículas às aberturas.

Peneiras com aberturas quadradas ou eventualmente redondas são normalmente usadas e se encontram disponíveis com malhas de aproximadamente 150mm e 37 $\mu$ m. As séries de peneiras são baseadas em progressões geométricas de  $4\sqrt{2}$ . Na prática, é normalmente impraticável e desnecessário usar todas as peneiras disponíveis em uma série particular. Deste modo, séries alternativas de  $\sqrt{2}$  ou  $2\sqrt{2}$ , são normalmente usadas. Extraordinariamente peneiras de até 5 $\mu$ m (chamadas micropeneiras) são usadas, mas a obtenção de resultados confiáveis, nestes casos, é muito difícil pois o processo é extremamente tedioso. Mesmo assim, estas são preferidas quando se deseja analisar quimicamente ou mineralogicamente as frações granulométricas obtidas, uma vez que vários dos métodos disponíveis para a análise granulométrica na fração ultrafina não permitem a separação física. O ensaio de peneiramento é realizado a seco para tamanhos mais grosseiros, mas deve ser realizado a úmido para tamanhos finos (Tavares, 1997).

As seqüências de peneiras escolhidas foi a seguinte: 9,52; 6,30; 4,0; 2,56; 1,19; 0,59; 0,297; 0,149 (valores em mm). O peneirador foi o ROTAP RX – 29 – W.S.Tyler. O tempo de peneiramento para todas as amostras foi de 420s (7 minutos).

A retenção dos fragmentos foi conseguida por meio do envolvimento dos compósitos por um invólucro de Kevlar, Figura 3.11.

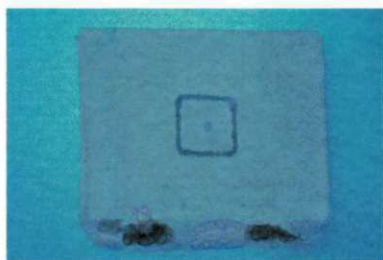


Figura 3.11 - Invólucro de Kevlar para a coleta de fragmentos da cerâmica.



Figura 3.12 - Instrumentos usados na coleta de fragmentos.

A Figura 3.12 apresenta a caixa de papelão onde era aberto os invólucros de Kevlar, a cuba de vidro para onde os fragmentos eram coletados por meio de pinceis antes de serem ensacados para o posterior peneiramento.

#### **3.2.4 Metodologia do ensaio balístico**

Os ensaios balísticos de todas as amostras foram realizados no Campo de Provas da Marambaia do Centro Tecnológico do Exército, utilizando-se uma bancada para ensaios balísticos. A bancada contém um cronógrafo AVL B212, duas barras óticas AVL B470 para medição da velocidade do projétil e um provete de tiro de onde é disparado o projétil, Figura 3.13.

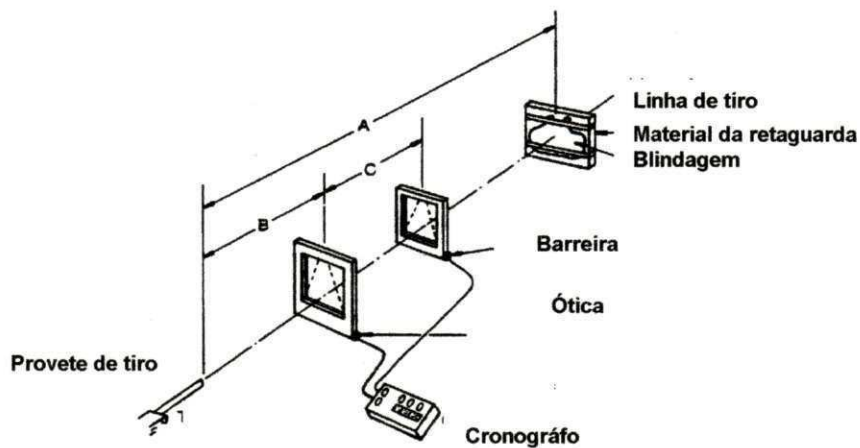


Figura 3.13 – Esquema do método de ensaio balístico. Fonte : NIJ 0101.03.

O Provete de tiro , ver Figura 3.14, estava à 10 metros do alvo ( distância “A” da Figura 3.13).



Figura 3.14 – Provete de tiro usado nos ensaios balísticos.

A barreira ótica estava à 7 metros do provete de tiro (distância “B” da Figura 3.12), neste caso medíamos a velocidade de impacto ( $V_I$ ) e não a velocidade inicial ( $V_0$ ). Os dados da barreira ótica eram processados por um computador de tiro, ver Figura 3.15.



Figura 3.15 - Computador de tiro responsável pelo processamento dos dados balísticos.

O alvo era fixado em uma armação metálica por 4 grampos presos à cada uma de suas extremidades, Figura 3.16.

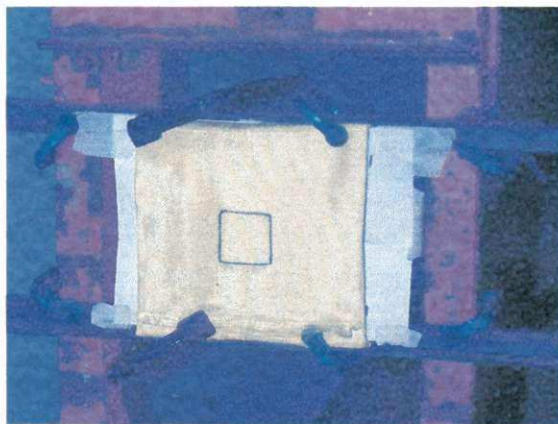


Figura 3.16 – Alvo pronto para o impacto balístico.

A munição escolhida foi a de 7,62 mm comum ou FMJ (projétil com núcleo de chumbo), fabricada pela Companhia Brasileira de Cartuchos. O projétil possui massa de  $9,7 \cdot 10^{-3}$  kg (9,7 g) e velocidade inicial de  $838 \pm 15$  m/s, Figura 3.17.



Figura 3.17 - Projétil da munição 7,62 mm comum.

#### **3.2.4.1 Análise estereoscópica do dano**

Para observar a morfologia de dano nas diversas regiões percorridas pelos projéteis, no interior das diversas placas impactadas, as mesmas foram seccionadas com uma serra manual e após o corte foram limpas com álcool em uma cuba de ultrassom.

Foi utilizado um microscópio estereoscópico acoplado à uma câmera digital, o que nos forneceu excelente qualidade de imagem, para a análise dos danos sofridos pelos corpos de prova.

A deflexão dos corpos de prova não perfurados foi medida através de um paquímetro de mesa.

#### **3.2.4.2 Metodologia de medição da velocidade residual**

Reduzir a penetração de um projétil é o principal objetivo de um sistema de blindagem. A redução de penetração está ligada diretamente a redução de energia cinética do projétil e, portanto, conhecer a velocidade residual de um projétil é um indicador importante para a determinação da eficiência balística dos materiais.

Foram testados dois métodos: o método da Barreira e o método com Radar Doppler.

##### **Método da Barreira**

Consiste em posicionar a barreira ótica por trás do alvo e medir a velocidade do projétil que transpassa o mesmo.

## Método do Radar Doppler

Consiste em avaliar a energia absorvida por um sistema de blindagem por meio da variação da energia cinética do projétil. A velocidade é medida antes pela barreira óptica e depois por uma ou mais antenas de radar DOPPLER, conforme a Figura 3.18. O clarão do tiro aciona o fotodisparador que aciona a antena receptora e está por sua vez envia o feixe eletromagnético em direção ao espelho que o reflete na direção do tiro. Assim que o espelho é destruído pelo projétil o radar perde o sinal do projétil. São necessários 5 (cinco) tiros, sendo desprezados o de maior e o de menor valor de velocidade. A média aritmética dos tiros restantes é usada para o cálculo da variação da energia cinética (Cardoso, 2001).

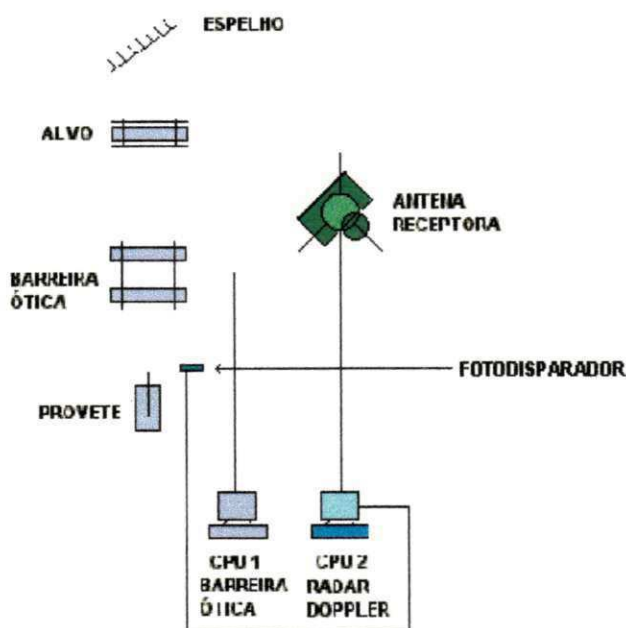


Figura 3.18 – Esquema das instalações de medição com radar DOPPLER. Fonte: Cardoso (2001).

O grande problema associado a este método é a mudança na trajetória do projétil após a perfuração do alvo. Assim, a velocidade medida pelo radar pode ser a projeção no eixo de medida do vetor velocidade, conforme se vê na Figura 3.19. Este erro pode ser avaliado colocando-se um plástico ou uma chapa testemunho atrás do alvo, sendo então medida a deflexão. Para se corrigir este erro são necessários arranjos com dois ou três radares, de acordo com a possibilidade de mudança de trajetória.

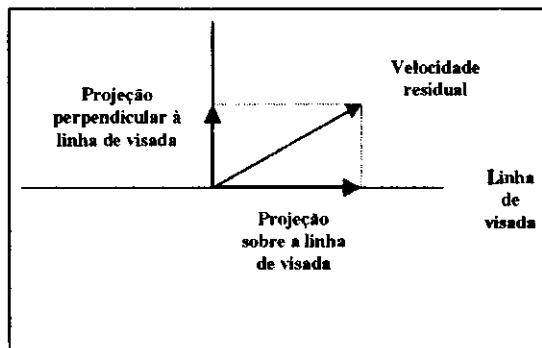


Figura 3.19 - Variação de direção do vetor velocidade. Fonte : Cardoso (2001).

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### **4.1 Desenvolvimento do compósito para blindagem de proteção balística**

##### **Seleção do adesivo**

Foram estudados dois tipos de adesivo que são : o epóxi e o poliuretano. Martínez et al. (1998) afirmam que a melhor solução para um sistema de blindagem é o uso de um adesivo elástico com uma espessura otimizada, ver seção 2.5.2.

Portanto foi escolhido o adesivo a base de poliuretano Sika 255FC.

Tanto para colar a cerâmica no material de interface como o material da interface na placa de retaguarda especificou-se o adesivo Sika 255FC. Para a definição da espessura do adesivo foi utilizado o gráfico da Figura 4.1, que apresenta curvas da energia refletida x espessura para diversas marcas comerciais do adesivo tipo Sika. Analisando a curva referente ao adesivo Sika 255FC (marca comercial disponível no mercado local) foi observado que a espessura de 0,8 mm fornece uma baixa porcentagem de onda de reflexão para este adesivo. Outra vantagem na escolha deste valor para a espessura é a maior praticidade na aplicação do adesivo durante o processo de fabricação dos compósitos.



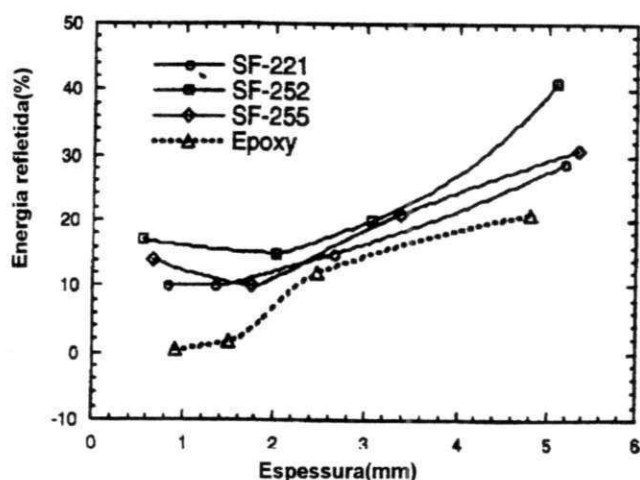


Figura 4.1 - Gráfico energia refletida versus espessura de três tipos de adesivos elásticos ( Sika 221, 252, e 255) e um adesivo epóxi. Fonte: Martínez et al. (1998).

Um problema que surgiu com a escolha do adesivo Sika 255FC, foi a remoção do mesmo dos fragmentos da cerâmica. A primeira tentativa foi mergulhar os fragmentos da cerâmica em uma cuba de vidro com ácido nítrico para tentar dissolvê-lo, não havendo sucesso. A segunda foi mergulhar os fragmentos da cerâmica em uma cuba de vidro com álcool comum, conseguindo-se assim a separação dos fragmentos do adesivo. O álcool comum não dissolve o adesivo, na verdade o adesivo absorve o álcool e perde a sua capacidade de adesão.

### Seleção da placa de retaguarda

Para a definição da placa de retaguarda do composto testou-se três diferentes tipos de materiais: placa de policarbonato (material usado em blindagem transparente), de acrílico (material usado em blindagem transparente) e de polietileno de ultra alto peso molecular.

Para a definição da espessura foi utilizado duas referências básicas: Chaves et al(1996) e o catálogo do sistema de blindagem transparente Lexgard (composto de placas de policarbonato e acrílico) da General Eletric.

Chaves et al (1996) afirmaram, através de simulação em computador, que uma placa cerâmica de 12 mm é capaz de reduzir o impacto de um tiro de fuzil 7,62 mm a um impacto equivalente a de um tiro de 9mm para a placa de retaguarda da blindagem. Com essa

informação e os dados referentes as espessuras do sistema Lexgard para esse nível de proteção (9mm), obteve-se valores de espessura para as placas de retaguarda variando de 19 mm à 24mm. Portanto as placas tiveram as seguintes espessuras: placa de policarbonato com 10 mm de espessura (máxima disponível no comércio local), placas de acrílico com 15 e 24 mm de espessura e placas de polietileno de ultra alto peso molecular com 15 e 20 mm de espessura.

### Placa de policarbonato

Os dois primeiros compósitos testados foram constituídos por uma cerâmica de alumina com 8 mm de espessura colada (adesivo Sika 255) a uma placa de retaguarda de policarbonato com 10 mm de espessura e 200 mm x 200 mm de área. Iniciou-se o ensaio balístico disparando-se contra o primeiro compósito deste tipo um tiro 7,62 mm perfurante (AP). O projétil atravessou completamente o alvo e a placa de policarbonato foi estilhaçada. No segundo compósito resolveu-se diminuir o nível da ameaça balística e se optou por usar uma munição de calibre 7,62 mm comum. O resultado obtido foi o mesmo verificado no ensaio anterior. Ambas as placas de policarbonato sofreram danos semelhantes. Os danos nestas placas foram analisados e corroborando com Costa et al. (2000), o ângulo das ramificações ( $\hat{a}$ ) foi de  $180^\circ$ , que é característico de carregamentos de impacto, Figura 4.2.

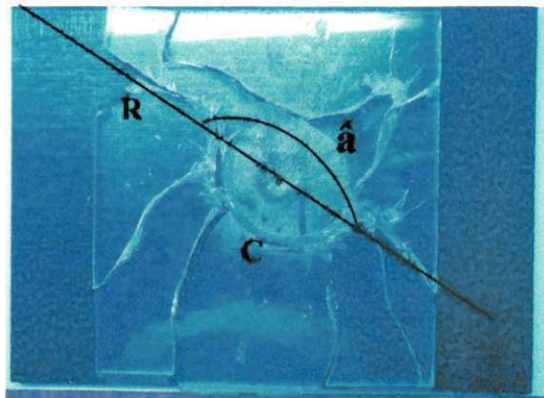


Figura 4.2 - Placa de policarbonato após o impacto.

Três tipos de danos foram caracterizados na placa de policarbonato:

- Trincas radiais ( R ) – criada pela flexão da placa.

- Trincas circunferenciais ( S ou C) - criada pela interação das ondas refletidas pelas fronteiras da placa.
- Pétala (P) - mecanismo de dano no ponto de impacto.

Analisando-se a superfície de fratura das trincas radiais na placa de policarbonato e sabendo-se que a trinca radial (devido a flexão da placa) propaga-se da superfície não impactada em direção a superfície impactada ( a superfície não impactada está tracionada e a superfície impactada está comprimida), Figura 4.3, permite-se nas próximas páginas as observações e conclusões que se seguem.



Figura 4.3 - Superfície de fratura das trincas radiais do policarbonato

No início de propagação da trinca observa-se a região do tipo espelho (característica de baixas velocidades de propagação de trinca), sem a presença da superfície do tipo Névoa (característica de uma maior velocidade de propagação de trinca). Depois da região do tipo Espelho, surge uma região de Ramificação de Trinca (nervuras) onde a velocidade de propagação de trinca é ainda maior do que na região anterior.

Analisando-se a superfície de fratura das trincas circunferenciais, a análise da fratura foi feita da superfície não impactada em direção à superfície impactada, Figura 4.4; têm-se : no início a região de Ramificação de Trinca (nervuras), e depois a região do tipo Espelho, sem a presença da superfície do tipo Névoa.

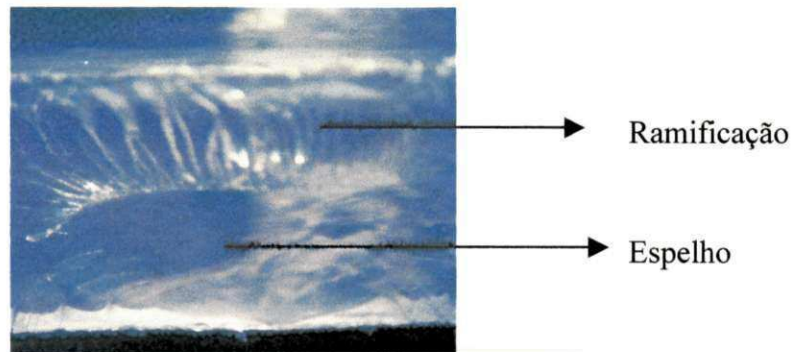


Figura 4.4- Superfície de fratura das trincas circunferenciais do policarbonato.

No ponto de impacto observa-se a formação do mecanismo de dano do tipo Pétala e poucos fragmentos, Figura 4.5.

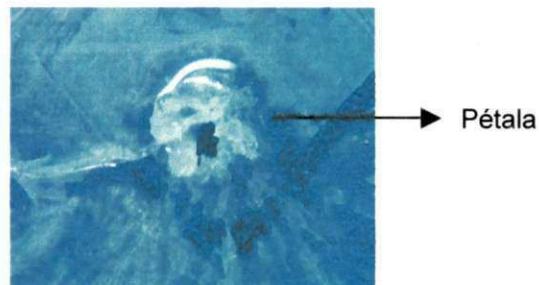


Figura 4.5 - Ponto de impacto do projétil na placa de policarbonato.

Os resultados obtidos dos ensaios de impacto tendo-se como placa de retaguarda a placa de policarbonato, com a completa destruição desta (com geração de grandes estilhaços), não foi encorajador. Portanto, o policarbonato como placa de retaguarda em um compósito para proteção balística, neste trabalho, foi descartado.

## Placa de acrílico

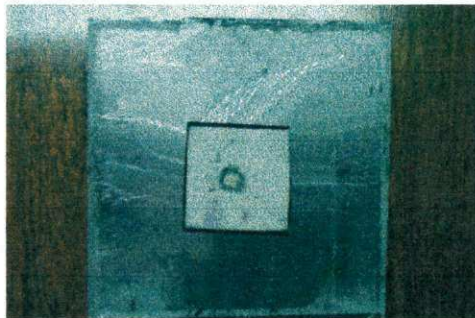


Figura 4.6 - Compósito de cerâmica de alumina colada (adesivo Sika 255) a uma placa de retaguarda de acrílico de 24 mm de espessura.

Testou – se duas diferentes espessuras de placa de acrílico: espessuras de 15 mm e 24 mm.

Os dois primeiros compósitos testados eram constituídos por uma cerâmica de alumina com 8 mm de espessura colada (adesivo Sika 255) a uma placa de retaguarda de acrílico com 15 mm de espessura e 200 mm x 200 mm de área. Iniciou-se o ensaio balístico disparando-se contra o primeiro compósito um tiro 7,62 mm perfurante (AP). O projétil atravessou completamente o alvo e a placa de acrílico foi estilhaçada. No segundo compósito disparou-se munição de 7,62 mm comum (FMJ) e o resultado foi o mesmo observado no primeiro teste.

Fabricou-se, então, um corpo de prova constituído por uma cerâmica de alumina com 8 mm de espessura colada (adesivo Sika 255) a uma placa de retaguarda de acrílico com 24mm de espessura e 200 mm x 200 mm de área. Colocou-se este compósito em um invólucro de Kevlar para que se pudesse recuperar os fragmentos da placa de acrílico gerados durante o impacto do projétil de munição do tipo 7.62 mm comum (ou FMJ, “Full Metal Jacket”). O tiro atravessou completamente o alvo, a placa de acrílico foi estilhaçada, sendo retidos os fragmentos no invólucro. Os fragmentos foram remontados e os danos sofridos por esta placa foram analisados e corroborando com Costa et al.(2000), o ângulo das ramificações ( $\hat{\alpha}$ ) foi de  $180^\circ$  que é característico de carregamentos de impacto, Figura 4.7.

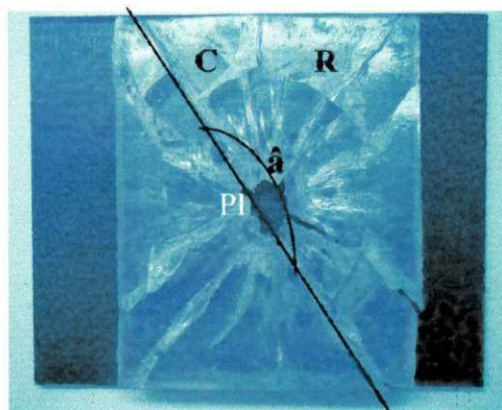


Figura 4.7 - Placa de acrílico de 24 mm após o impacto com munição do tipo 7,62 mm comum.

Três tipos de danos foram caracterizados na placa de acrílico:

- Trincas radiais ( R )
- Trincas circunferenciais ( S ou C ) - criadas pela interação das ondas refletidas pelas fronteiras da placa e no ponto de impacto (PI), formação de pequenos fragmentos.

Analisando-se a superfície de fratura das trincas radiais de acrílico e sabendo-se que a trinca radial (devido a flexão da placa) propaga-se da superfície não impactada em direção a superfície impactada (a superfície não impactada está tracionada e a superfície impactada está comprimida), Figura 4.8, permite-se nas próximas páginas as observações e conclusões que se seguem.



Figura 4.8 - Superfície de fratura das trincas radiais da placa de acrílico.

Devido ao alto valor da energia de impacto não temos a presença no início de propagação de trinca da região do tipo Espelho (característica de baixas velocidades de propagação de trinca). Observa-se a presença da superfície do tipo Névoa (característica de uma maior velocidade de propagação de trinca). Depois da região do tipo Névoa, surge a região de Ramificação de Trinca (nervuras) onde a velocidade de propagação de trinca é ainda maior do que na região anterior.

Inusitadamente após a região de Ramificação surge a região do tipo Espelho. Conclui-se que a diminuição na velocidade de propagação de trinca foi devido a alteração do estado de tensões ao longo da espessura da placa, que passou de trativo para compressivo .

A superfície de fratura das trincas circunferenciais apresenta dois tipos de marcas importantes: as Asas de Gaivota e os rastros de Ramificação, Figura 4.9.

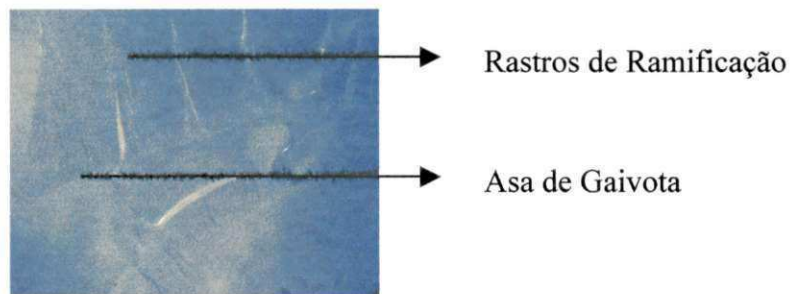


Figura 4.9- Superfície de fratura das trincas circunferenciais na placa de acrílico.

Choi et al. (1995) verificaram que o aumento da velocidade de propagação de trinca em impactos realizados contra placas de acrílico foi devido a criação de um estado de tensão trativo à frente da trinca que surgiu devido a reflexão da onda compressiva.

O resultado aqui apresentado foi contrário ao observado por Choi et al. (1995). Na realidade houve uma diminuição da velocidade de propagação de trinca devido a um estado de tensão compressivo à frente da mesma, gerado pela flexão da placa de acrílico durante o impacto.

Novamente, em função da completa destruição (grande estilhaçamento) da placa de acrílico, foi descartada neste trabalho a sua utilização como placa de retaguarda em um composto para proteção balística.

## Placa de polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM)

Inicialmente preparou-se dois corpos de prova constituídos de uma placa de PEUAPM de 20 mm de espessura (sem a presença da placa cerâmica) com 200 mm x 200mm de área para ensaio balístico com munição de 9mm FMJ (426 m/s). A idéia desse ensaio era comparar o desempenho balístico do PEUAPM nacional com a placa UDHB – 2, constituída de camadas unidirecionais de tecido de PEUAPM prensado à quente, fabricada pela fábrica holandesa Dyneema. O UDHB – 2 é vendido comercialmente como tendo nível III ( 7,62 mm FMJ) de proteção.

Os projéteis de 9mm (velocidade inicial de 378 m/s e 374 m/s) transpassaram ambas as placas de PEUAPM (sem a presença da placa cerâmica), causando dano extremamente localizado, sem nenhuma deflexão aparente das placas, Figura 4.10(a). Houve fusão do PEUAPM no ponto de impacto e por todo o caminho do projétil, com um pequeno abaulamento na superfície posterior ao impacto, Figura 4.10(b) e com mais detalhe na Figura 4.10(c). Na Figura 4.10(c) observa-se estrias ao redor do furo que representam o início do mecanismo de fratura do tipo Pétala; o diâmetro do furo de saída é inferior ao diâmetro do projétil antes do impacto. A formação do abaulamento é independente da deflexão, ocorrendo exatamente ao contrário nos metais .

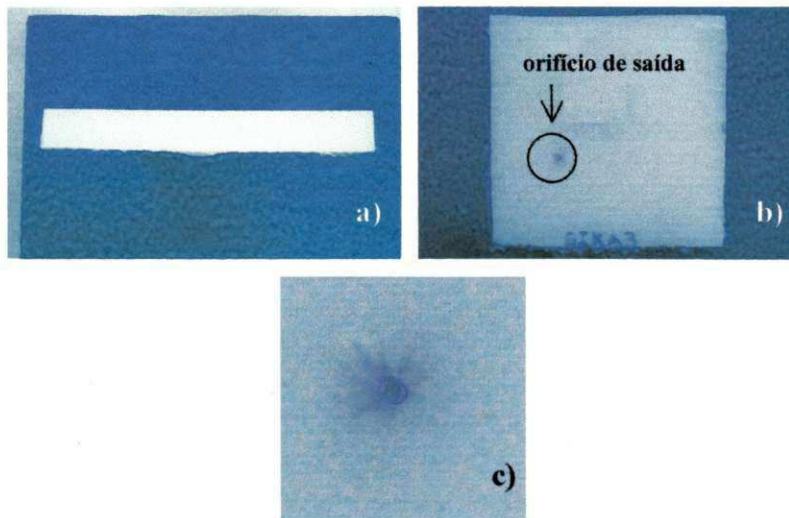


Figura 4.10 - Três vistas da placa de PEUAPM perfurada por munição de 9 mm: a) vista lateral, b) vista traseira e c) vista com maior detalhe do orifício de saída do projétil.



Não se encontrou na literatura técnica referência sobre o comportamento sob impacto balístico de uma placa de PEUAPM, entretanto, notou-se uma semelhança com o mecanismo de absorção de energia proposto por Wilkins para placas dúcteis metálicas quando são impactadas **diretamente** por projéteis de formato esférico, Figura 4.11.

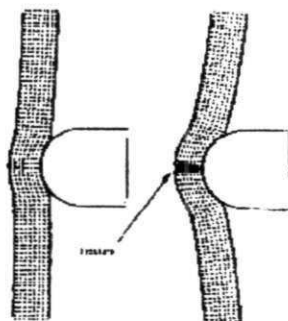


Figura 4.11 - Penetração de um projétil de aço esférico em um alvo de alumínio. Fonte: Wilkins(1978).



Figura 4.12 - Fratura com aparência de pétala com formato triangular e tridimensional. Fonte : Silva e Medeiros (1988).

Este mecanismo de deformação conhecido como Pétala está apresentado na seqüência de desenhos da Figura 4.11 e 4.12. Como pode ser observado na Figura 4.11, inicialmente, o alvo toma a forma do projétil de formato esférico, fenômeno conhecido como “Bulge” ou abaulamento, causando grandes tensões no lado oposto ao impacto no eixo de simetria e fazendo com que a fratura se propague no eixo de simetria e radialmente através da espessura, causando uma fratura com aparência de pétala com formato triangular e tridimensional, Figura 4.12.

Como a placa de PEUAPM nacional (sem a presença da placa cerâmica) não suportou o tiro de 9mm FMJ, não houve mais motivo para ensaiá-la com munição de 7,62mm FMJ, de

maior energia cinética. Após a realização desses ensaios iniciais, a atenção foi dirigida para o desenvolvimento do compósito para proteção balística.

Para a definição da placa de retaguarda do compósito testou-se duas diferentes espessuras de placa de polietileno de ultra alto peso molecular : de 15 mm e 20 mm.

Os dois primeiros compósitos testados eram constituídos por uma cerâmica de alumina com 8 mm de espessura colada (adesivo Sika 255) a uma placa de retaguarda de PEUAPM com 20 mm de espessura e 200 mm x 200 mm de área. Iniciou-se o ensaio balístico disparando-se contra o primeiro compósito deste tipo um tiro de 7,62 mm perfurante (AP). O projétil atravessou completamente o alvo e a placa de PEUAPM sofreu uma leve deflexão, Figura 4.13(a). Ocorreu a fusão do PEUAPM por todo o caminho do projétil e no ponto de impacto, na superfície posterior ao impacto, formou-se um grande abaulamento e o dano do tipo Pétala, Figura 4.13 (b) e com mais detalhe na Figura 4.13(c). No segundo, disparou-se munição de 7,62 mm (FMJ) e o resultado foi semelhante ao anterior.

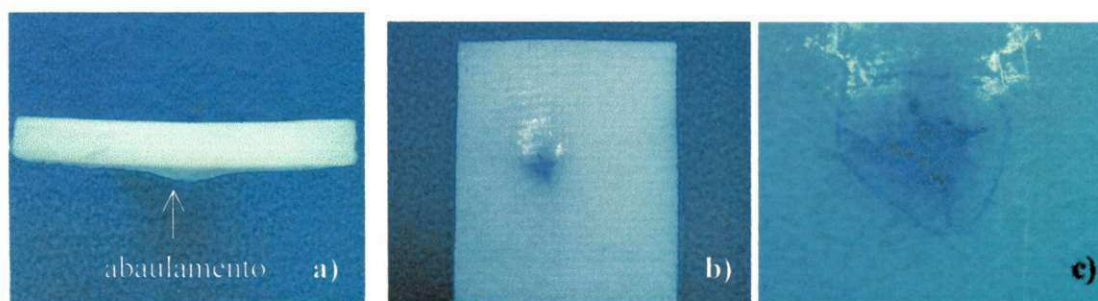


Figura 4.13 – Três vistas da placa de PEUAPM perfurada por munição 7,62 mm FMJ :a) lateral, b) traseira e c) orifício de saída do projétil.

Fabricou-se mais dois outros compósitos constituídos por uma cerâmica de alumina com 8 mm de espessura colada (adesivo Sika 255) a uma placa de retaguarda de PEUAPM com 15 mm de espessura e 200 mm x 200 mm de área. Um dos compósitos recebeu um tiro de 7.62 mm AP e o outro de 7.62 mm FMJ. Ambos apresentaram comportamento sob impacto balístico semelhante ao compósito anterior, Figura 4.14.

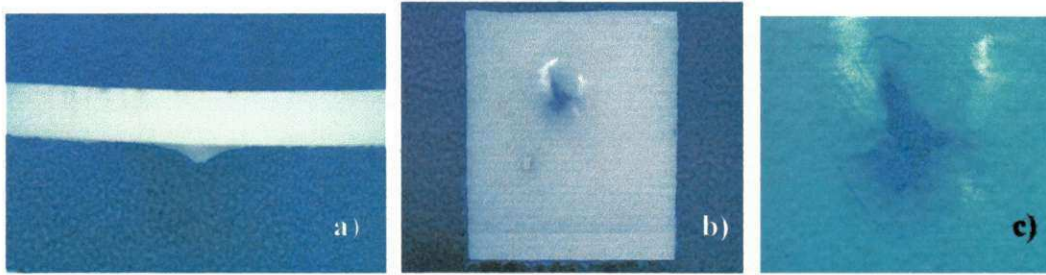


Figura 4.14- Placa de retaguarda de PEUAPM perfurada por munição de 7.62 mm FMJ : a) vista lateral, b) vista traseira e c) detalhe do orifício de saída do projétil.

Os resultados apresentados pela placa de PEUAPM, sob teste, foram satisfatórios e, portanto, a **placa de PEUAPM** foi aprovada para uso no compósito como placa de retaguarda, já que não houve estilhaçamento da mesma. Por questão de peso e custos a placa de PEUAPM de 15 mm de espessura foi a selecionada, já que o dano observado foi semelhante ao verificado na placa de 20 mm.

#### **Teste de adesividade sob impacto balístico do adesivo Sika 255 FC ao PEUAPM**



Figura 4.15 – Compósito usado para ensaio de adesividade.

Com a escolha do adesivo Sika 255FC e do PEUAPM como placa de retaguarda para uso no compósito, uma nova decisão deveria ser tomada : uso ou não do ativador químico Sika 210 no compósito. Para responder essa pergunta preparou-se um compósito em que se colou lado à lado duas cerâmicas de alumina de 8 mm de espessura à placa de PEUAPM de

20 mm e 200 mm x 200 mm de área, Figura 4.15. Durante a colagem das cerâmicas não foi utilizado o ativador químico Sika 210.

Submeteu-se a cerâmica da esquerda à um tiro de munição 7,62 mm FMJ, sendo a mesma completamente estilhaçada. A cerâmica da direita mesmo não sendo impactada pelo projétil, descolou da placa de retaguarda de PEUAPM, sem deixar o menor traço de adesivo na mesma .

Se for comparado esse resultado com o obtido pelo impacto de um projétil 7.62 mm FMJ em um compósito constituído por uma cerâmica de alumina com 12,7 mm de espessura e, que na colagem à placa de retaguarda de PEUAPM (15 mm de espessura e 150 mm x 150 mm de área) foi usado o ativador químico Sika 210 e depois o adesivo Sika 255, nota-se que uma pequena quantidade de fragmentos da cerâmica se mantêm colados a placa de PEUAPM mesmo após o impacto, Figura 4.16.



Figura 4.16- Fragmentos cerâmicos colados a placa de PEUAPM mesmo após o impacto.

Portanto, diante deste fato, o uso do ativador químico Sika 210 se tornou obrigatório nos compósitos utilizados neste trabalho.

## Seleção da placa de cerâmica de alumina

### Placa de cerâmica de alumina de 12,7 mm

Inicialmente preparou-se quatro compostos constituídos por uma cerâmica de alumina com 12,7 mm de espessura colada (adesivo Sika 255) a uma placa de retaguarda de PEUAPM com 15 mm de espessura e 150 mm x 150 mm de área. Iniciou-se o ensaio balístico disparando-se contra o primeiro corpo de prova deste tipo um projétil de 7,62 mm FMJ. O projétil não penetrou no alvo e a placa de PEUAPM sofreu apenas uma leve deflexão. No ponto de impacto formou-se o abaulamento, sem penetração e também sem a presença do mecanismo de dano do tipo Pétala, Figura 4.17(a) e (b).

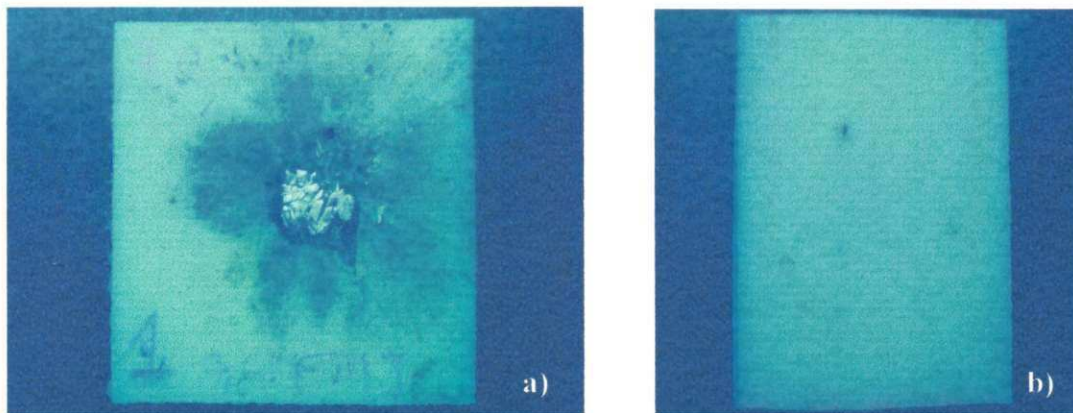


Figura 4.17 - Placa de retaguarda de PEUAPM após o impacto com munição 7.62 mm FMJ : a) vista frontal e b) vista traseira

Como não houve penetração aumentou-se o nível da ameaça para munição do tipo 7,62 mm AP. Mais uma vez não houve penetração do alvo. A placa de PEUAPM sofreu deflexão e no ponto de impacto ocorreu a formação do abaulamento, sem a presença do mecanismo de fratura do tipo Pétala, Figura 4.18(a) e (b).

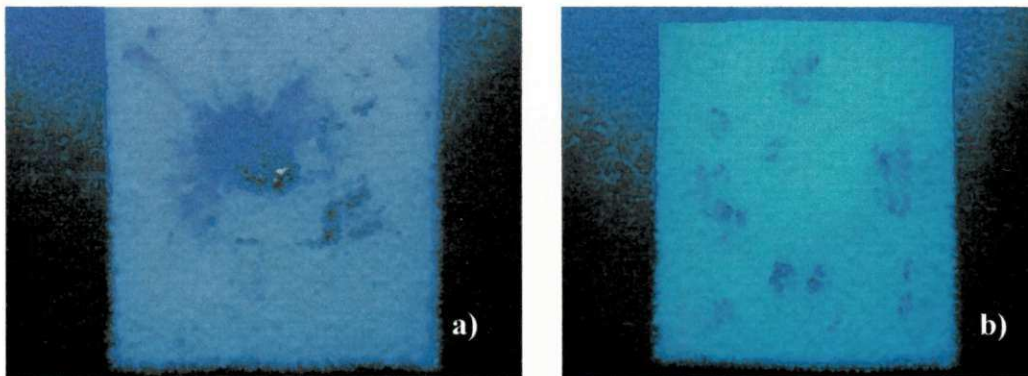


Figura 4.18 - Placa de retaguarda de PEUAPM após o impacto com munição 7,62 mm perfurante (AP): a) vista frontal e b) vista traseira

Descartou-se o uso da cerâmica de alumina 12.7 mm já que havia o interesse de estudar-se a influência dos materiais na interface de um sistema de blindagem compósita leve e o uso desta cerâmica, pelo fato de não permitir a perfuração, poderia “camuflar” os efeitos na interface.

#### **Placa de cerâmica de alumina de 10 mm**

Inicialmente preparou-se dois compósitos constituídos por uma cerâmica de alumina com 10 mm de espessura colada (adesivo Sika 255) a uma placa de apoio (retaguarda) de PEUAPM com 15mm de espessura e 150 mm x 150 mm de área. Iniciou-se o ensaio balístico disparando-se contra o primeiro compósito deste tipo um projétil de 7,62 mm comum (FMJ). O projétil atravessou completamente o alvo e a placa de apoio (retaguarda) de PEUAPM, Figura 4.19.

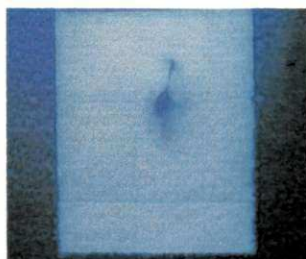


Figura 4.19 - Vista traseira da placa de PEUAPM após o impacto balístico.

### Placa de cerâmica de alumina de 8 mm

A escolha da dimensão da placa de alumina estava entre duas espessuras, a de 8 mm ou a de 10 mm, já que ambos os compósitos foram perfurados. Se o critério de escolha fosse o custo de compra de ambas as cerâmicas, a escolha recairia na cerâmica de alumina de 8mm, porém uma cerâmica de 8mm, pela sua pequena espessura, poderia não cumprir a sua função no compósito balístico que é no mínimo destruir a ponta do projétil.

Para solucionar esse problema criou-se um ensaio especial. Nesse ensaio disparou-se um projétil de 7.62 mm perfurante, que possuía no seu interior um núcleo de aço de alta dureza, contra um envelope de kevlar contendo o compósito sob teste, Figura 4.20 e 4.21.

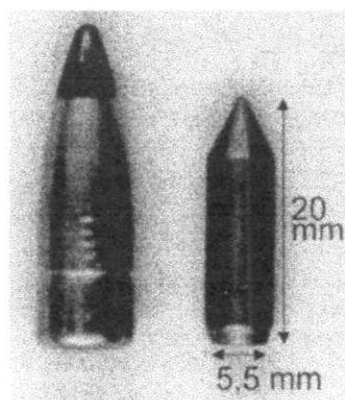


Figura 4.20 - Projétil de 7.62 mm perfurante (esquerda) com o seu núcleo de aço (direita). Fonte : Zaera et al. (2000).

No interior deste envelope foi montado um compósito constituído por uma cerâmica de alumina com 8 mm de espessura colada (adesivo Sika 255) a uma placa de retaguarda de acrílico com 24 mm de espessura e 200 mm x 200 mm de área. A idéia do uso do envelope de kevlar foi recuperar o projétil e analisar o efeito da cerâmica sobre o mesmo.

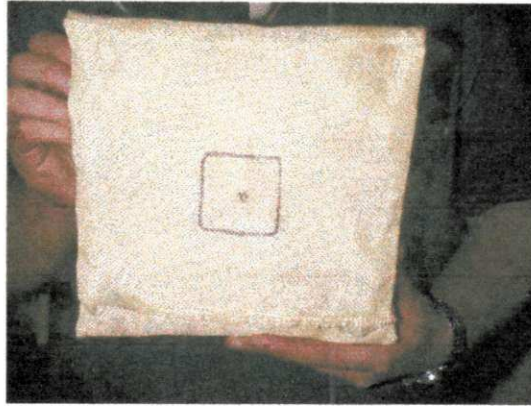


Figura 4.21 - Envelope de kevlar usado no ensaio balístico para a seleção da cerâmica.

As Figuras 4.22 e 4.23 mostram o resultado deste ensaio sobre o composto ainda dentro do invólucro e sobre a placa de retaguarda de acrílico, respectivamente.



Figura 4.22 - Invólucro de kevlar depois de impactado.

Na Figura 4.22 pode ser visto que o envelope não foi perfurado, ficando o projétil preso no seu interior e na Figura 4.23 observa-se que a placa de retaguarda foi estilhaçada e depois remontada. O dano sofrido pela placa de acrílico neste ensaio foi semelhante ao da placa de retaguarda da Figura 4.7.



- Atenuação da onda de tensão – uso de materiais que por deformação mecânica, ou, “achatamento” absorva a onda de tensão gerada durante o impacto balístico.
- Baixa densidade por área.

Encontrou-se na literatura técnica algumas referências de materiais com essas características.

San Miguel (1981) desenvolveu para o exército norte americano pisos para carros de combate absorvedores de energia explosiva utilizando materiais alveolares de aço, daí a idéia de trabalhar-se com um material nacional alveolar e a escolha recair no policarbonato alveolar.

Já Gama et al (2001) simularam a propagação de uma onda unidimensional em um sistema de blindagem frágil/dúctil e concluíram que a presença de uma fina camada de borracha entre a alumina e o laminado polimérico da blindagem, atrasa e reduz a amplitude da onda de tensão para a placa de retaguarda, surgindo daí a idéia de se utilizar uma placa de borracha na interface do sistema de blindagem.

Shim e Yap (1997) usaram espuma de poliuretano para a absorção de impacto de baixa velocidade ( 3,13 à 7,39 m/s), surgindo daí a idéia de se utilizar uma placa de espuma de poliuretano na interface do sistema de blindagem.

A idéia do uso do feltro como material de interface surgiu ao notar-se que o fabricante francês de cerâmicas balísticas Ceradon usava uma fina camada deste material em suas cerâmicas com o objetivo de atenuação da onda de tensão.

Portanto as configurações finais dos compósitos para avaliação como blindagem balística foram:

Tabela 4.1- Configurações finais dos compósitos para avaliação como blindagem balística

Tipo e espessura da cerâmica	Material da interface	Tipo e espessura da placa de retaguarda	Codificação
cerâmica de alumina NGK de 8 mm	adesivo Sika 255FC	placa de PEUAPM de 15 mm	tipo Sika
cerâmica de alumina NGK de 8 mm	policarbonato alveolar	placa de PEUAPM de 15 mm	tipo PC
cerâmica de alumina NGK de 8 mm	espuma de poliuretano	placa de PEUAPM de 15 mm	tipo PU
cerâmica de alumina NGK de 8 mm	placa de feltro	placa de PEUAPM de 15 mm	tipo Feltro
cerâmica de alumina NGK de 8 mm	placa de borracha	placa de PEUAPM de 15 mm	tipo Borr

## 4.2 Resultados dos ensaios balísticos dos compósitos para blindagem

### 4.2.1 Resultado da velocidade dos projeteis usados nos ensaios balísticos

#### 4.2.1.1 Velocidade de impacto dos projeteis

A Figura 4.25 apresenta o gráfico da velocidade dos projeteis usados durante os ensaios, obtida pela barreira ótica, Figura 3.13 no Capítulo 3.

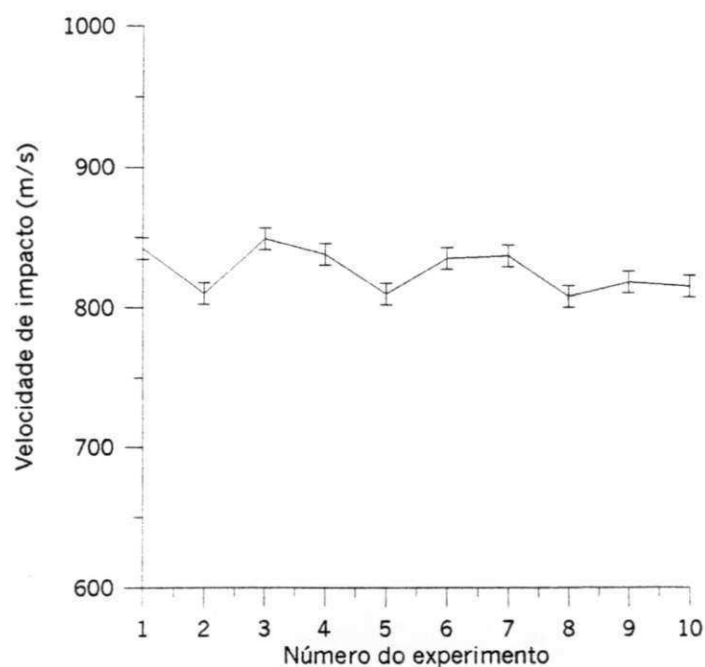


Figura 4.25 - Velocidade dos projeteis usados nos ensaios balísticos obtido pela barreira ótica.

#### 4.2.1.2 Velocidade residual dos projeteis

O objetivo ao se tentar medir a velocidade residual do projétil era estimar –se a absorção de energia cinética durante o impacto provocado pelo projétil nos compósitos. Entretanto, os métodos (método da Barreira e Radar Doppler) usados para este fim não foram consistentes e, portanto, esta alternativa deixou de ser considerada, ver Anexo A.

## 4.2.2 Análise do dano balístico dos compósitos para blindagem

### 4.2.2.1 Análise do dano balístico no compósito de alumina + feltro + PEUAPM

As Figuras 4.26 e 4.27 apresentam a fratura após o impacto balístico das respectivas cerâmicas de dois dos compósitos do tipo Feltro. Problemas operacionais intrínsecos ao ensaio balístico, como dispersão no tiro e a pequena área do alvo, fizeram com que os dois compósitos fossem atingidos fora do centro de suas respectivas placas de alumina e, portanto, esses ensaios não foram válidos para a avaliação da capacidade de proteção balística e só os danos nas cerâmicas foram analisados.

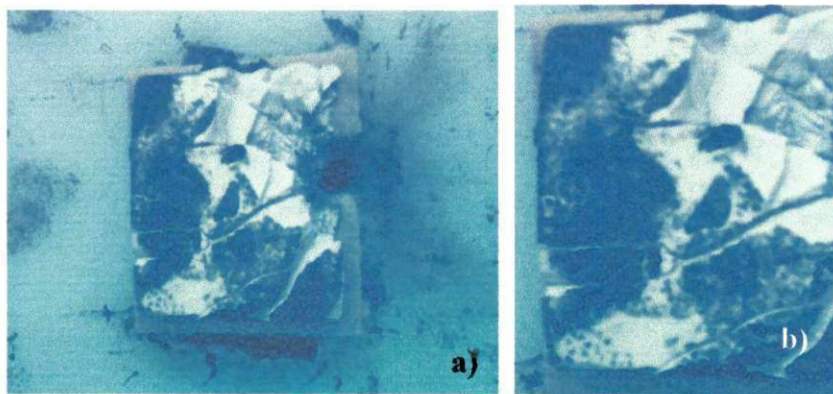


Figura 4.26 - Cerâmica após o impacto balístico de um dos compósitos do tipo Feltro :  
a) vista frontal e b) vista mais detalhada da fratura da cerâmica

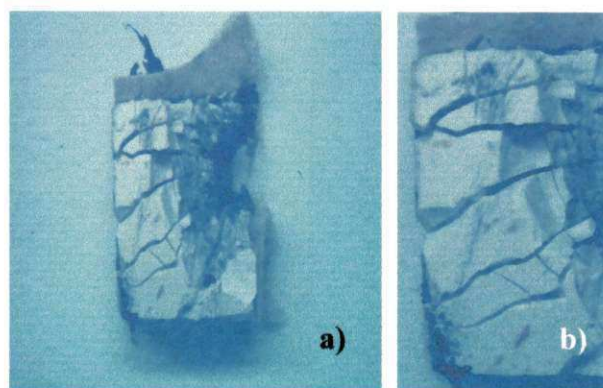


Figura 4.27 - Cerâmica após o impacto balístico de um dos compósitos do tipo Feltro  
: a) vista frontal e b) vista mais detalhada da fratura da cerâmica

Nas Figuras 4.26 e 4.27 observam-se grandes trincas radiais e grandes fragmentos, formados devido a flexão da placa. No ponto de impacto e próximo ao mesmo, têm-se respectivamente a formação de pequenos fragmentos e trincas circunferenciais.

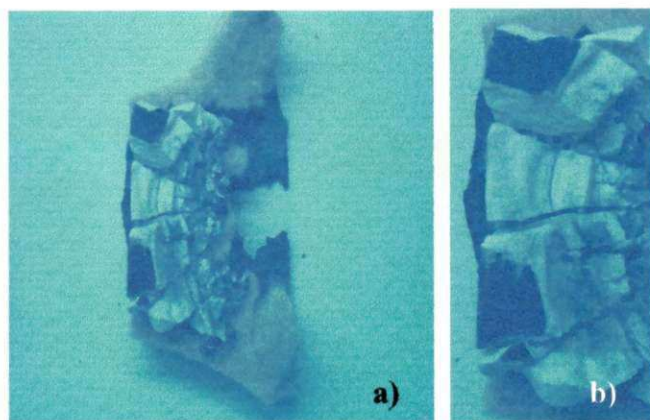


Figura 4.28 - Cerâmica após o impacto balístico de um dos compósitos do tipo Feltro : a) vista frontal e b) vista mais detalhada da fratura da cerâmica

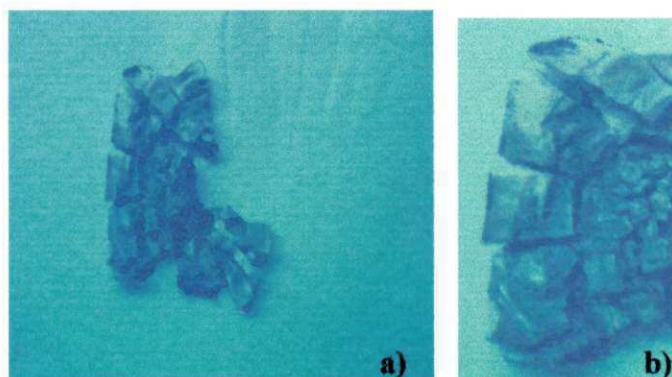


Figura 4.29 - Cerâmica após o impacto balístico de um dos compósitos do tipo Feltro : a) vista frontal e b) vista mais detalhada da fratura da cerâmica

As Figuras 4.28 e 4.29 apresentam a fratura após o impacto balístico das respectivas cerâmicas de dois compósitos do tipo Feltro. Esses ensaios foram considerados válidos para avaliação da capacidade de proteção balística. Nestes compósitos tanto o dano balístico na cerâmica quanto na placa de PEUAPM e no material da interface foram analisados. Os fragmentos da cerâmica foram submetidos à uma análise granulométrica.

Nas Figuras 4.28 e 4.29 observam-se trincas radiais formadas devido a flexão da placa e no ponto de impacto, a formação de pequenos fragmentos. Não houve a formação de grandes fragmentos devido a flexão da placa de alumina. Nota-se a presença, tanto próximo como distante do ponto de impacto, de trincas circunferenciais .

As placas de apoio (retaguarda) de PEUAPM desses compósitos foram fotografadas externamente e seccionadas com uma serra manual. Após o corte foram limpas com álcool em uma cuba de ultra – som, sendo o dano interno analisado e fotografado.

**Em ambos os compósitos, as placas de PEUAPM não sofreram perfuração, na verdade não sofreram nem ao menos penetração e sim apenas deflexão e abaulamento no ponto de impacto.** Na Figura 4.30 é apresentada a placa de apoio de PEUAPM do compósito (alumina + feltro + PEUAPM) para blindagem.

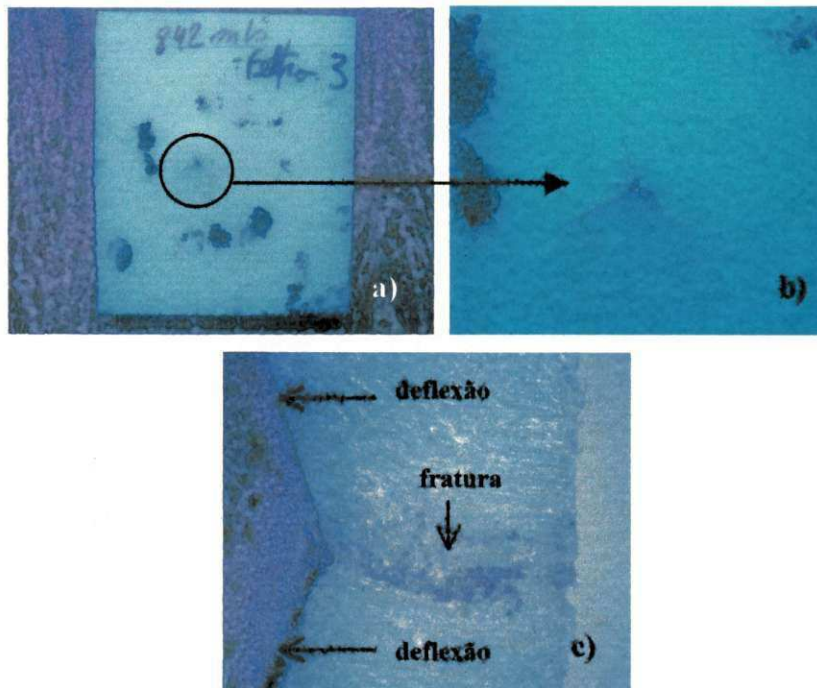


Figura 4.30 – Placa de PEUAPM em três vistas : a) vista traseira b) ampliação do abaulamento e c) corte transversal da área correspondente ao ponto do impacto.

Na Figura 4.30 (a) observa-se no ponto de impacto o início da fratura do tipo Pétala, que pode ser vista com mais detalhe na Figura 4.30(b). Na Figura 4.30(c) tem – se um corte

transversal da área correspondente ao ponto de impacto onde se vê a propagação da fratura através da espessura.

Na Figura 4.31 observa-se a placa de retaguarda de PEUAPM referente ao outro compósito para blindagem (também com interface de feltro) ensaiado.

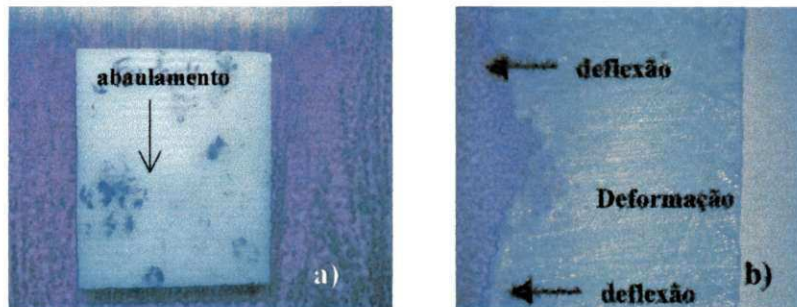


Figura 4.31 - Placa de PEUAPM em duas vistas : a) vista traseira e b) corte transversal da área do correspondente ao ponto do impacto.

O dano foi menor que o anterior. Na Figura 4.31 (b) tem-se um corte transversal da área correspondente ao ponto de impacto onde se vê, neste caso, apenas a deflexão e a deformação da placa de PEUAPM.

O dano no material de interface (de feltro) também foi analisado, como pode ser visto na Figura 4.32.

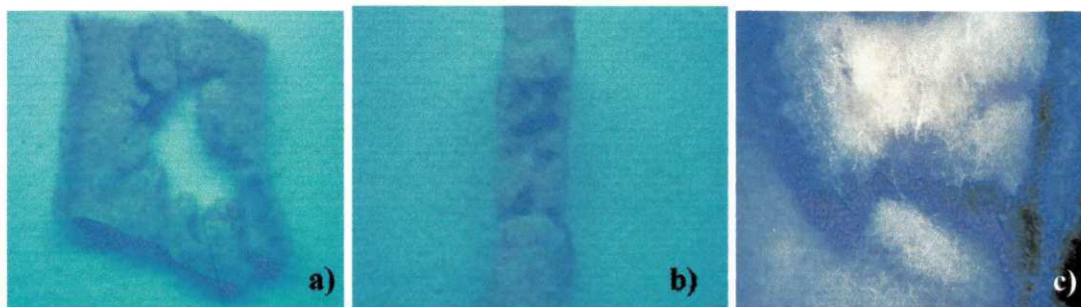


Figura 4.32 - Interface de feltro depois de impactada balisticamente.

Na Figura 4.32 observa – se em (a) uma grande área cortada no feltro devido ao impacto balístico, em (b) tem – se uma vista lateral desta área cortada e com maior detalhe na Figura 4.32 (c) observa – se que o feltro foi rasgado e desfiado.

#### 4.2.2.2 Análise do dano balístico no compósito alumina + borracha + PEUAPM

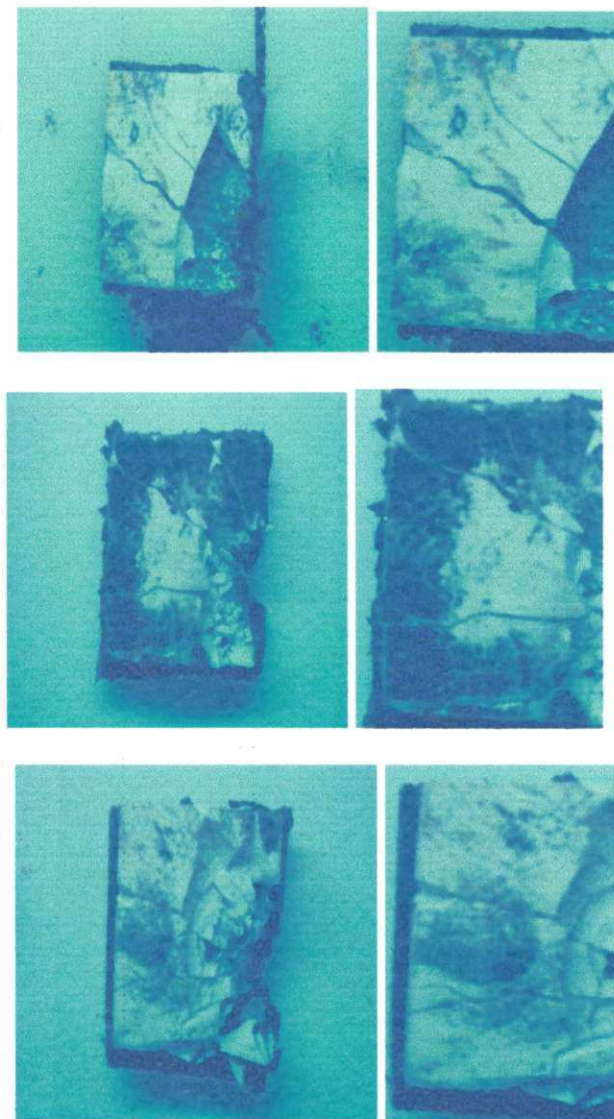


Figura 4.33 - Cerâmicas após o impacto balístico de três dos compósitos do tipo Borr.

A Figura 4.33 apresenta a fratura após o impacto balístico das cerâmicas de três dos compósitos do tipo Borr ( Borracha). Problemas operacionais intrínsecos ao ensaio balístico, como a dispersão no tiro e a pequena área do alvo, fizeram com que os compósitos fossem atingidos fora do centro de suas respectivas placas de alumina e, portanto, esses ensaios não foram considerados válidos para a avaliação da capacidade de proteção balística e só o dano nas cerâmicas foram analisados.

Na Figura 4.33 observa - se para todas as cerâmicas: grandes trincas radiais e grandes fragmentos formados devido a flexão da placa e no ponto de impacto, a formação de



pequenos fragmentos. Nota – se a presença de trincas circunferenciais próximo ao ponto de impacto.

A Figura 4.34 apresenta a fratura após o impacto balístico da cerâmica de um dos compósitos tipo Borr. A cerâmica desta figura foi atingida no centro e, portanto, esse ensaio foi considerado válido para a avaliação da capacidade de proteção balística. Neste compósito tanto o dano balístico na cerâmica quanto na placa de PEUAPM e no material da interface foram analisados, além dos fragmentos da cerâmica serem submetidos à uma análise granulométrica.

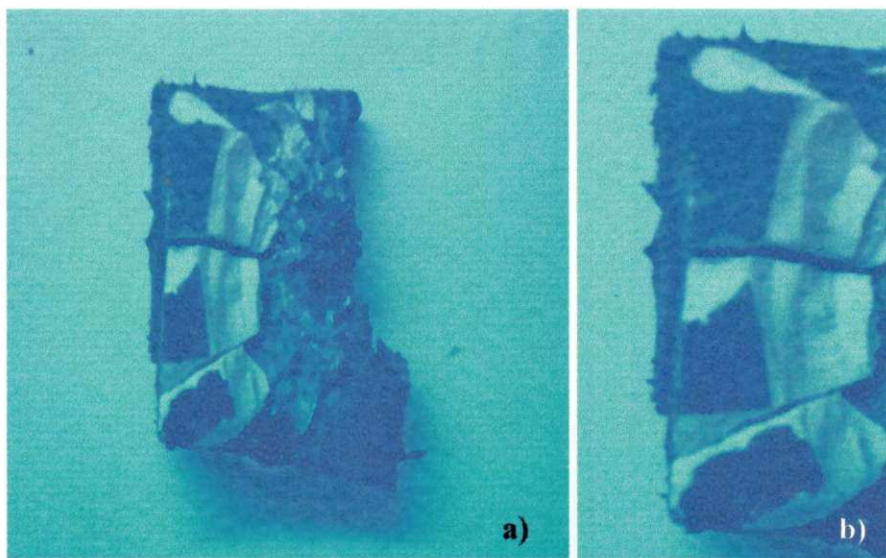


Figura 4.34 - Cerâmica após o impacto balístico de um dos compósitos do tipo Borr : a) vista frontal e b) vista mais detalhada da fratura da cerâmica.

Na Figura 4.34 observam - se trincas radiais e grandes fragmentos formados devido a flexão da placa, enquanto que no ponto de impacto formaram - se pequenos fragmentos. Nota – se a presença de trincas circunferenciais próximas ao ponto de impacto.

A placa de apoio (retaguarda) de PEUAPM desse compósito foi fotografada externamente e seccionada com uma serra manual e após o corte foi limpa com álcool em uma cuba de ultra – som, sendo o dano interno analisado e fotografado.

**A placa de PEUAPM deste compósito não sofreu perfuração, na verdade não sofreu nem ao menos penetração, notando - se apenas uma leve deflexão e um pequeno abaulamento no ponto de impacto,** Figura 4.35. Pode-se afirmar que houve pouco dano na placa de PEUAPM.

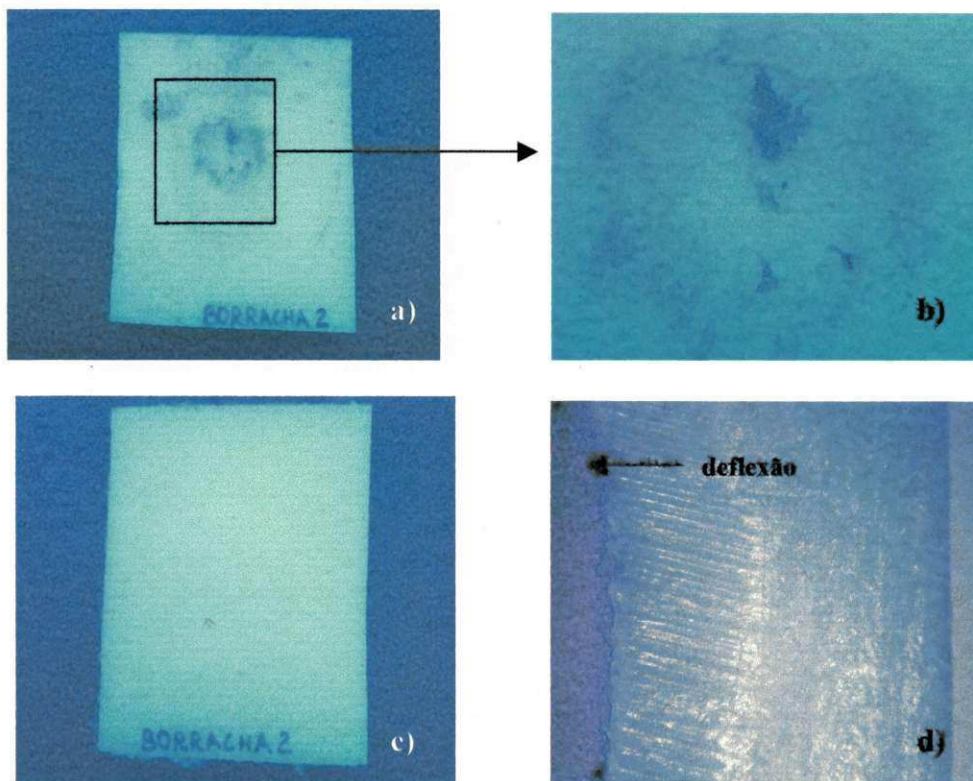


Figura 4.35 - Placa de PEUAPM após o impacto balístico em quatro vistas : a) vista frontal, b) detalhe da vista frontal, c) vista traseira e d) corte transversal da área correspondente ao ponto do impacto.

Na Figura 4.35(a) observa – se a vista frontal da placa de PEUAPM que sofreu um pequeno abaulamento no ponto de impacto, que pode ser visto com mais detalhe na Figura 4.35(b). Na Figura 4.35(c) observa – se a vista traseira da placa e como se percebe o dano é imperceptível. A Figura 4.35(d) mostra um corte transversal da área correspondente ao ponto de impacto, onde se observa uma pequena deflexão da placa.

O dano no material de interface (borracha) também foi analisado, como pode ser visto na Figura 4.36.

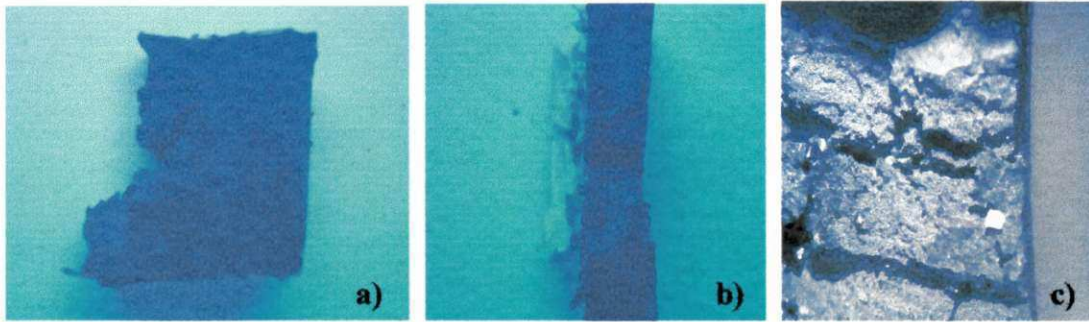


Figura 4.36 - Interface de borracha depois de impactada balisticamente.

Na Figura 4.36(a) observa – se a área cortada na borracha devido ao impacto balístico. Na Figura 4.36(b) observa – se a vista lateral desta área cortada e mais detalhadamente na Figura 4.36(c) percebe – se que a borracha foi rasgada.

#### 4.2.2.3 Análise do dano balístico no compósito alumina + adesivo Sika 255 + PEUAPM

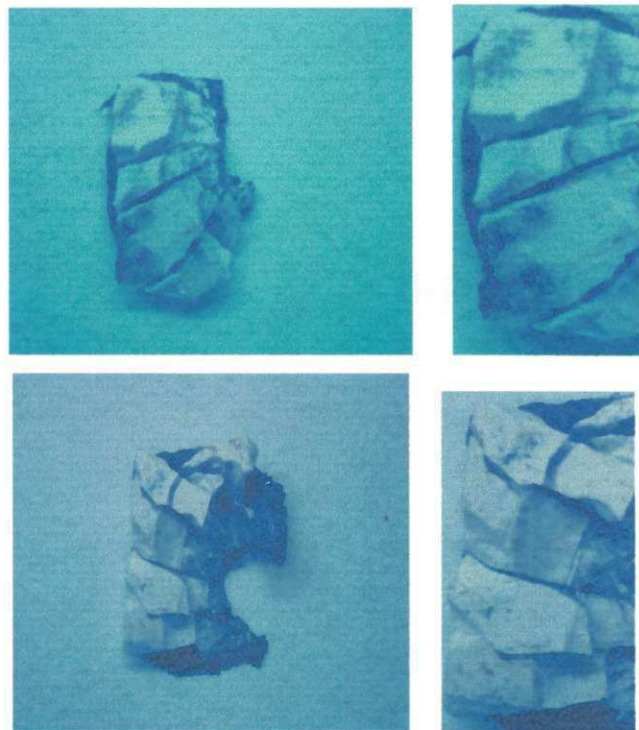


Figura 4.37 - Cerâmicas após o impacto balístico de dois dos compósitos do tipo Sika.

A Figura 4.37 apresenta a fratura após o impacto balístico das respectivas cerâmicas de dois dos compósitos do tipo Sika. Problemas operacionais intrínsecos ao ensaio balístico, como dispersão no tiro e a pequena área do alvo, fizeram com que os dois compósitos fossem atingidos fora do centro das placas de alumina e, portanto, esses ensaios não foram considerados válidos para a avaliação da capacidade de proteção balística dos mesmos e só o dano nas cerâmicas foram analisados.

Na Figura 4.37 observam-se grandes trincas radiais e grandes fragmentos formados devido a flexão da placa e no ponto de impacto, a formação de pequenos fragmentos. Nota-se a presença de trincas circunferenciais próximas ao ponto de impacto.

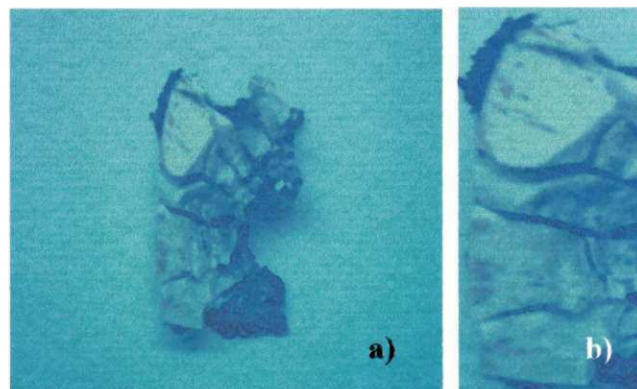


Figura 4.38 - Cerâmica após o impacto balístico de um dos compósitos do tipo Sika :  
a) vista frontal e b) vista mais detalhada da fratura da cerâmica



Figura 4.39 - Cerâmica após o impacto balístico de um dos compósitos do tipo Sika.

As Figuras 4.38 e 4.39 apresentam a fratura após o impacto balístico das respectivas cerâmicas de dois dos compósitos do tipo Sika . Estas cerâmicas foram atingidas no centro e, portanto, esses ensaios foram considerados válidos para a avaliação da capacidade de proteção balística. Nestes compósitos tanto o dano balístico na cerâmica quanto na placa de PEUAPM e no material da interface foram analisados, além dos fragmentos da cerâmica serem submetidos à uma análise granulométrica.

Na Figura 4.38 observam – se trincas radiais formadas devido a flexão da placa e no ponto de impacto, a formação de pequenos fragmentos. Não houve a formação de grandes fragmentos devido a flexão da placa de alumina. Notam – se trincas circunferenciais próximas e afastadas do ponto de impacto.

Na Figura 4.39, observa – se que a cerâmica sofreu um estilhaçamento completo.

As placas de apoio de PEUAPM desses compósitos foram fotografadas externamente e seccionadas com uma serra manual e após o corte foram limpas com álcool em uma cuba de ultra – som, sendo o dano interno analisado e fotografado.

Todas as placas de PEUAPM destes compósitos foram completamente perfuradas. Externamente apresentaram a formação da fratura do tipo Pétala no ponto de impacto, Figura 4.40(a) e com mais detalhe na Figura 4.40(b).

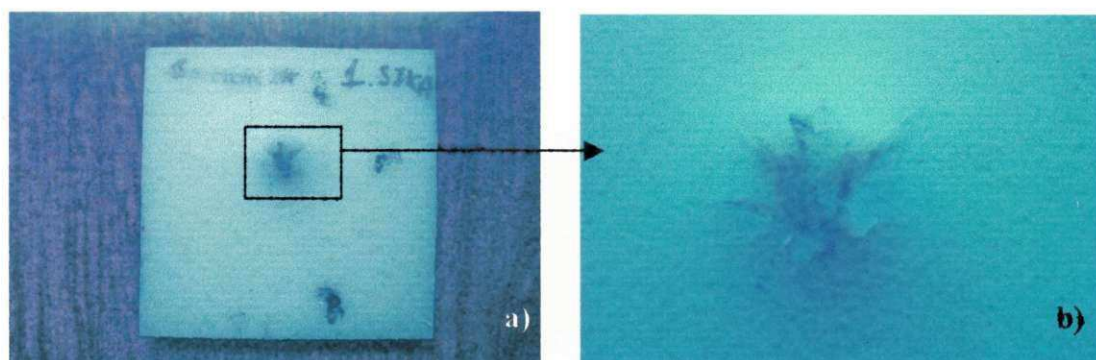


Figura 4.40 - Placa de PEUAPM após o impacto balístico em duas vistas : a) vista traseira e b) vista com o detalhe do furo de saída do projétil.

Na Figura 4.41 observa – se um corte transversal da área correspondente ao ponto do impacto, caracterizando o dano sofrido por ambas as placas, onde se vê que o caminho percorrido pelo projétil através da espessura foi totalmente fundido.

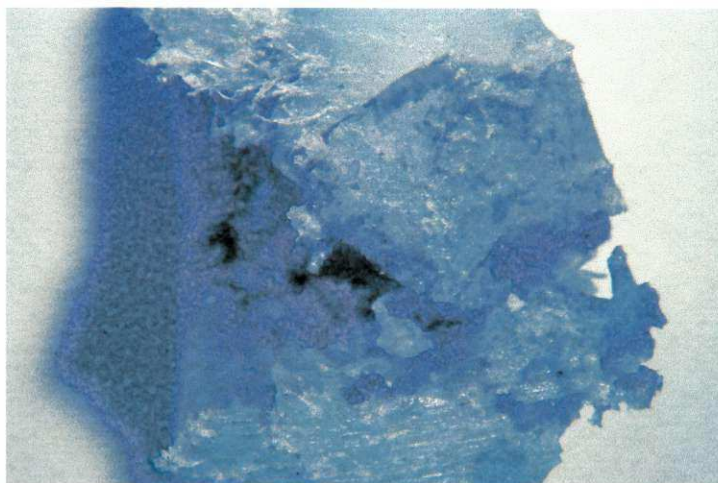


Figura 4.41 - Dano interno sofrido pela placa de PEUAPM após o impacto balístico.

O dano no material de interface (adesivo Sika 255FC) também foi analisado, como se observa na Figura 4.42.

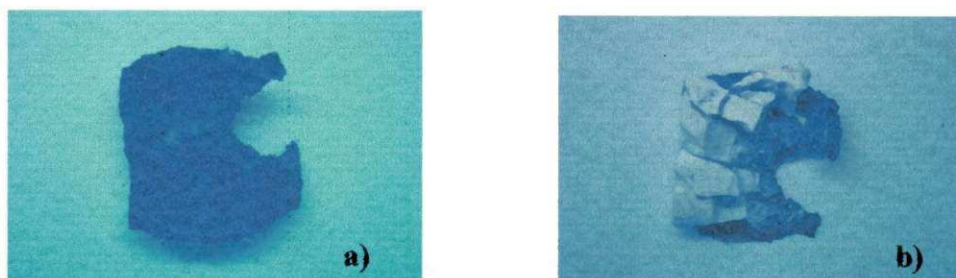


Figura 4.42 - Dano balístico na camada de adesivo Sika 255FC em corpos de prova do tipo Sika..

Na Figura 4.42(a) nota – se o dano balístico localizado sofrido por uma camada de 0.8 mm de Sika 255FC e na Figura 4.42(b) observa – se a vantagem deste comportamento, já que os fragmentos da cerâmica permanecem colados à camada de adesivo mesmo após o primeiro impacto.

#### 4.2.2.4 Análise do dano balístico no compósito alumina + espuma de poliuretano + PEUAPM

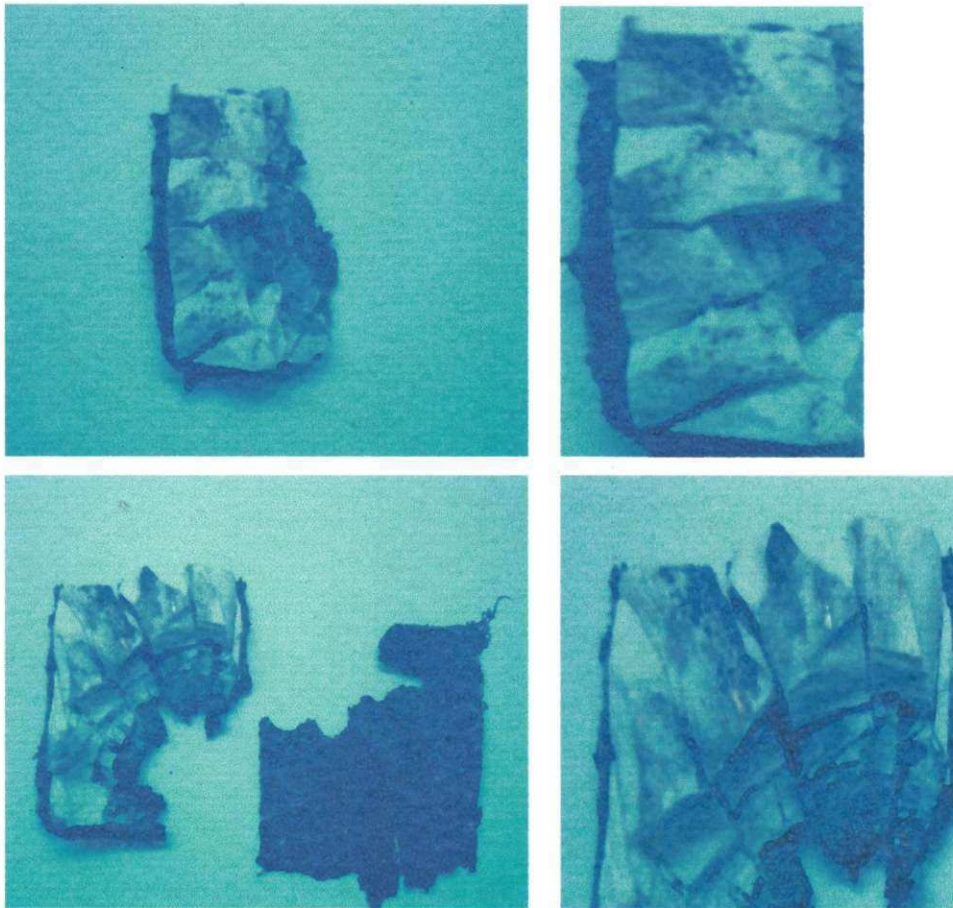


Figura 4.43 - Cerâmicas após o impacto balístico de dois dos compósitos do tipo PU.

A Figura 4.43 apresenta a fratura após o impacto balístico das respectivas cerâmicas de dois dos compósitos do tipo PU. Estas cerâmicas foram atingidas no centro e, portanto, esses ensaios foram considerados válidos para a avaliação da capacidade de proteção balística. Nestes compósitos tanto o dano balístico na cerâmica quanto na placa de PEUAPM e no material da interface foram analisados, além dos fragmentos da cerâmica serem submetidos à uma análise granulométrica.

Na Figura 4.43 observam – se grandes trincas radiais e grandes fragmentos formados devido a flexão da placa e no ponto de impacto, a formação de pequenos fragmentos. Nota – se a presença de trincas circunferenciais próximas ao ponto de impacto.

As placas de apoio de PEUAPM desses compósitos foram fotografadas externamente e seccionadas com uma serra manual e após o corte foram limpas com álcool em uma cuba de ultra – som, sendo o dano interno analisado e fotografado.

Todas as placas de PEUAPM destes compósitos foram completamente perfuradas. Externamente apresentaram pequena deflexão e a formação da fratura do tipo Pétala no ponto de impacto, Figura 4.44(a) e com mais detalhe na Figura 4.44(b).

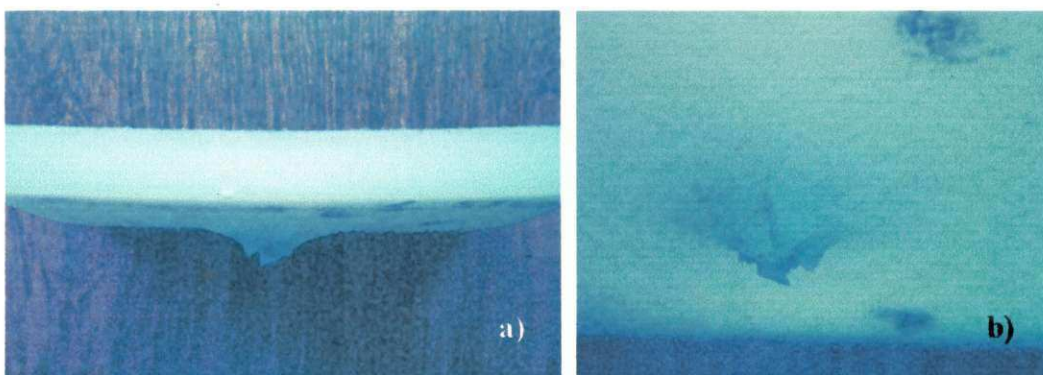


Figura 4.44 - Placa de PEUAPM após o impacto balístico em duas vistas : a) vista lateral e b) vista com o detalhe do furo de saída do projétil.

Na Figura 4.45 observa – se um corte transversal da área correspondente ao ponto do impacto, caracterizando o dano sofrido por ambas as placas e onde se vê que o caminho percorrido pelo projétil através da espessura foi totalmente fundido.

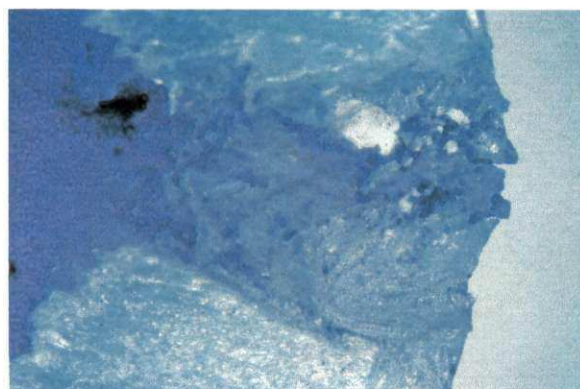


Figura 4.45 - Dano interno sofrido pela placa de PEUAPM após o impacto balístico.



Os outros dois compósitos com material na interface de espuma de poliuretano tiveram os seus resultados invalidados devido a problemas operacionais intrínsecos ao ensaio balístico, como dispersão no tiro e muito baixa velocidade do projétil e, portanto, não foram analisados.

O dano no material de interface (espuma de poliuretano) também foi analisado, como se observa na Figura 4.46.



Figura 4.46 - Interface de espuma de poliuretano depois de impactada balisticamente.

Não sobrou vestígios da espuma de poliuretano depois do impacto balístico.

#### **4.2.2.5 Análise do dano balístico no compósito alumina + policarbonato alveolar + PEUAPM**

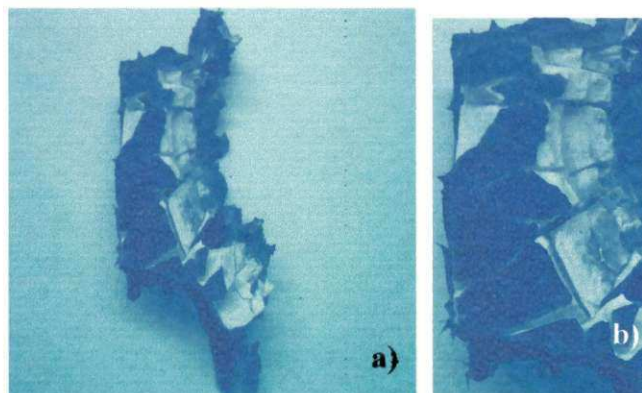


Figura 4.47 - Cerâmica após o impacto balístico de um dos compósitos do tipo PC : a) vista frontal e b) vista mais detalhada da fratura da cerâmica.

A Figura 4.47 apresenta a fratura após o impacto balístico da cerâmica de um dos compósitos do tipo PC. Problemas operacionais intrínsecos ao ensaio balístico, como dispersão no tiro e a pequena área do alvo, fizeram com que o compósito fosse atingido fora do centro da placa de alumina e, portanto, esse ensaio não foi considerado válido para a avaliação da capacidade de proteção balística e só o dano na cerâmica foi analisado.

Na Figura 4.47 observam-se grandes trincas radiais e grandes fragmentos formados devido a flexão da placa. Não se observou a formação de pequenos fragmentos no ponto de impacto. Nota-se a presença de trincas circunferenciais próximo ao ponto de impacto.

As Figuras 4.48 e 4.49 apresentam a fratura após o impacto balístico das respectivas cerâmicas de três dos compósitos do tipo PC. Estas cerâmicas das Figuras 4.48 e 4.49 foram atingidos no centro da placa de alumina e, portanto, esses ensaios foram considerados válidos para a avaliação da capacidade de proteção balística. Nestes compósitos tanto o dano balístico nas cerâmicas quanto na placa de PEUAPM e no material da interface foram analisados, além dos fragmentos das cerâmicas serem submetidos à uma análise granulométrica.

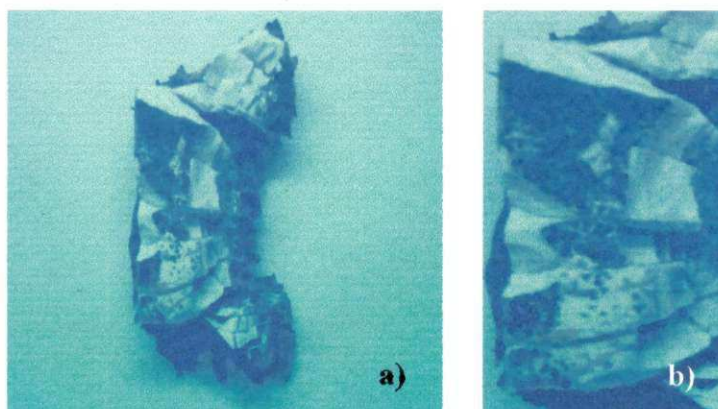


Figura 4.48 - Cerâmica após o impacto balístico de um dos compósitos do tipo PC : a) vista frontal e b) vista mais detalhada da fratura da cerâmica

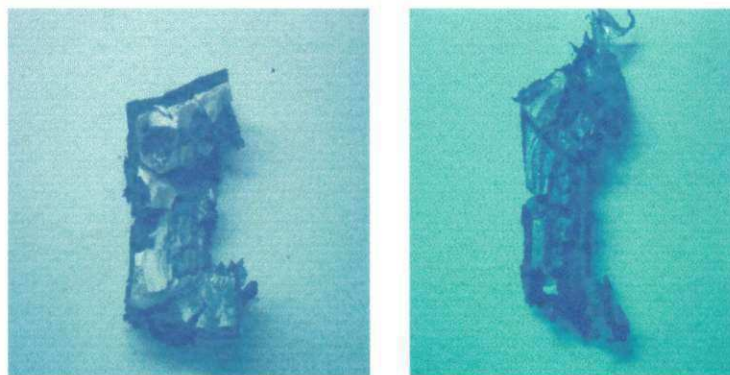


Figura 4.49 - Cerâmicas após o impacto balístico de dois dos compósitos do tipo PC.

A fragmentação da cerâmica do compósito da Figura 4.48 apresenta grandes trincas radiais e grandes fragmentos formados pela flexão da placa. Não se observou a formação de pequenos fragmentos no ponto de impacto. Nota-se a presença de trincas circunferenciais praticamente só nas proximidades do ponto de impacto.

Na Figura 4.49, as cerâmicas sofreram um estilhaçamento completo.

As placas de retaguarda de PEUAPM desses compósitos foram fotografadas externamente e seccionadas com uma serra manual e após o corte foram limpas com álcool em uma cuba de ultra-som, sendo o dano interno analisado e fotografado.

Todas as placas de PEUAPM destes compósitos foram completamente perfuradas. Externamente apresentaram a formação da fratura do tipo Pétala no ponto de impacto, como mostra a Figura 4.50 (a) e com mais detalhe na Figura 4.50(b).

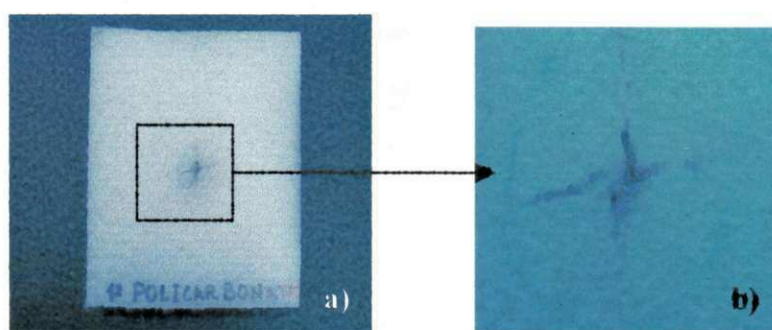


Figura 4.50 - Placa de PEUAPM após o impacto balístico em duas vistas : a) vista traseira e b) vista com o detalhe do furo de saída do projétil.

Na Figura 4.51 observa-se um corte transversal da área correspondente ao ponto do impacto, caracterizando o dano sofrido por estas placas. O caminho percorrido pelo projétil através da espessura foi totalmente fundido.

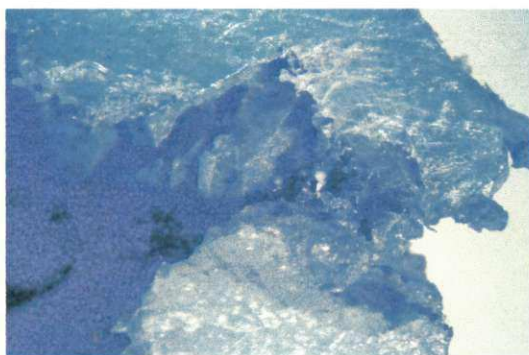


Figura 4.51 - Dano interno sofrido pela placa de PEUAPM após o impacto balístico.

O dano no material de interface (policarbonato alveolar) também foi analisado, como se observa na Figura 4.52.

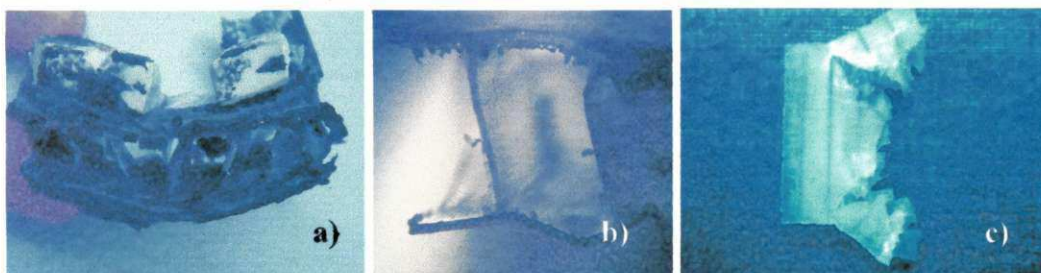


Figura 4.52 - Interface de policarbonato alveolar depois de impactada balisticamente.

Na Figura 4.52 observam-se os mecanismos de absorção de energia da interface de policarbonato alveolar : a) deflexão da placa , b) flambagem das paredes e c) cisalhamento (“rasgamento”).

### 4.2.3 Resultados da análise dos fragmentos das placas de alumina coletados dos compósitos para proteção balística

#### 4.2.3.1 Curvas de distribuição acumulada passante de massa e de distribuição retida dos fragmentos da cerâmica dos compósitos para proteção balística impactados

As curvas de distribuição acumulada passante de massa geradas pelos diferentes tipos de compósitos, podem ser observadas na Figura 4.53.

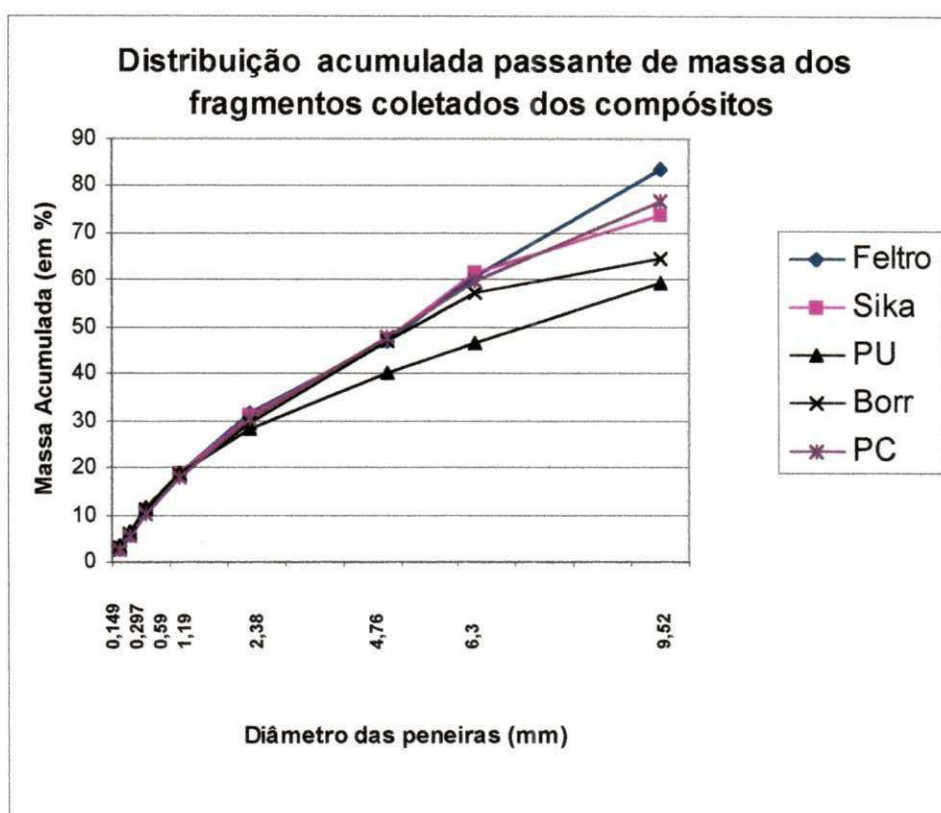


Figura 4.53 - Gráfico da distribuição acumulada passante de massa dos fragmentos coletados dos compósitos impactados.

O gráfico da Figura 4.53 mostra que de uma maneira geral os compósitos do tipo Feltro, Sika, Borr e PC tiveram uma maior fragmentação do que o compósito do tipo PU e que em média 6% da massa das cerâmicas dos compósitos foi transformada em pó após o

impacto balístico. Esse pó está relacionado com o fenômeno da cominuição no ponto de impacto mencionado por Meyers (1994) e Horsfall (1996).

Woodward et al. (1994) impactando balisticamente cerâmicas de alumina observaram que fragmentos menores do que 0,18 mm e entre 1 e 2 mm eram originados respectivamente do processo de erosão do projétil no ponto de impacto e pela reflexão da onda de tensão gerada pelo mesmo.

Os fragmentos entre 1 e 2 mm localizam - se em maior quantidade ao redor do ponto de impacto, Figuras 4.54 e 4.55.

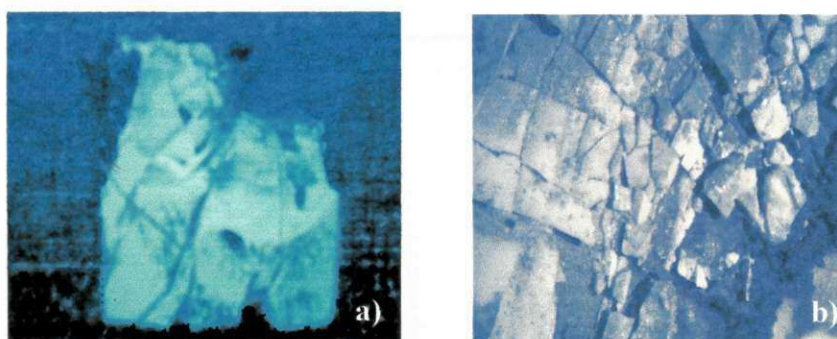


Figura 4.54 - Cerâmica impactada balisticamente : a) vista geral e b) detalhe do ponto de impacto com os pequenos fragmentos de alumina.

Seguindo Woodward et al. (1994) e fazendo as devidas adaptações para as peneiras usadas temos: as massas retidas nas peneiras  $< 0,149$  mais a da peneira  $0,149$  mm, que compreendem os fragmentos menores do que  $0,297$  mm, representam o processo de erosão sofrido pelo projétil e a massa retida na peneira  $1,19$  mm, que compreendem os fragmentos entre  $1,19$  e  $2,38$  mm, representa o dano dinâmico (quanto maior a reflexão da onda de tensão, maior a massa retida nessa peneira) sofrido pela placa de alumina durante o impacto balístico. Os resultados dessa análise estão plotados na Figura 4.56.

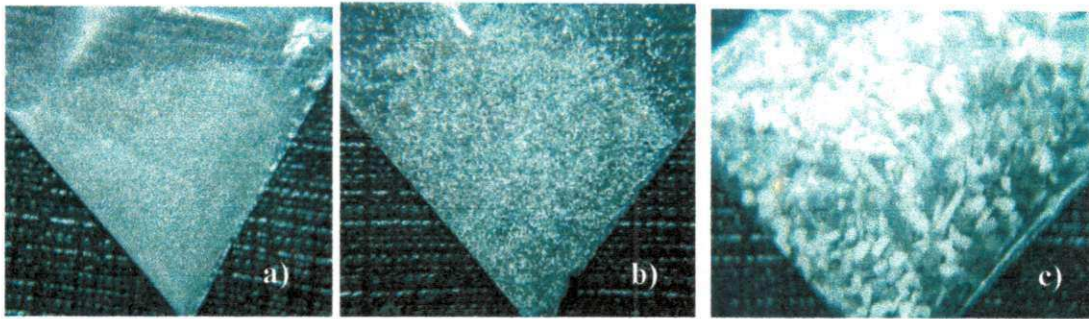


Figura 4.55 - Fragmentos contidos nas peneiras menores do que 0,149 mm (a), 0,149 mm (b) e 1,19 mm (c).

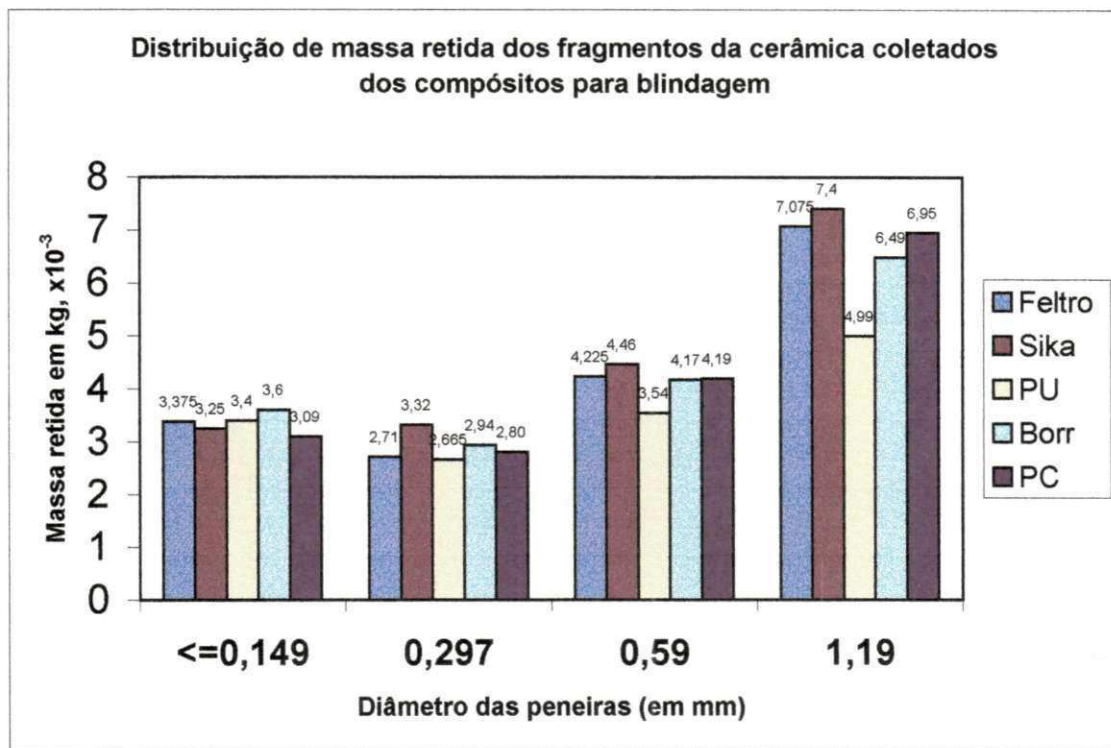


Figura 4.56 - Gráfico de distribuição de massa retida das peneiras menores do que 2,38 mm dos fragmentos das placas de alumina dos compósitos para blindagem.

O gráfico da Figura 4.56 mostra que os compósitos do tipo Feltro, Sika, PU, Borr e PC tiveram semelhante dano devido a erosão do projétil. Esse resultado já era esperado já que se manteve sempre o mesmo tipo de placa cerâmica ( alumina fabricada pela NGK) para todos os compósitos para blindagem.

O gráfico da Figura 4.56 mostra que os compósitos do tipo Feltro, Sika, Borr e PC tiveram um maior dano dinâmico (ou seja, maior reflexão da onda de tensão) do que o compósito do tipo PU. A interface de PU foi a única que foi completamente destruída (Figura 4.46) e este comportamento provavelmente explique a diferença de fragmentação com relação aos outros materiais usados na interface. Pode-se imaginar que parte da onda de compressão ao desintegrar a espuma de poliuretano, perdeu um de seus meios de propagação, não conseguindo retornar para a placa de alumina como uma onda de reflexão.

O uso de um material alveolar como interface não gerou maior reflexão da onda de tensão quando comparado com os outros materiais não-alveolares como feltro, borracha e polietileno de ultra alto peso molecular (compósito com interface do tipo Sika).

#### 4.2.3.2 Relação entre a energia gasta para criar novas superfícies de fratura durante o processo de fragmentação da cerâmica ( $E_{frag}$ ) e a eficiência balística de um sistema de blindagem

Os compósitos para blindagem submetidos aos ensaios balísticos apresentaram a seguinte distribuição de energia gasta para criar novas superfícies de fratura durante o processo de fragmentação da cerâmica ( $E_{frag}$ ), Tabela 4.1.

Tabela 4.2 - Energia absorvida na criação das superfícies de fratura dos fragmentos da cerâmica ( $E_{frag}$ ).

Material usado na interface	Energia absorvida na forma de criação de superfícies de fratura dos fragmentos da cerâmica ( $E_{frag}$ ), em Joules	% $E_{frag}$ /Energia cinética do projétil (3309J)
Adesivo Sika 255	1,63J	0,0493
Polycarbonato Alveolar	1,61J	0,0487
Feltro	1,79J	0,0541
Borracha	1,73J	0,0523
Espuma de Poliuretano	1,78J	0,0538

Horsfall e Buckley (1996), Mayselless et al. (1987), Woodward et al. (1994) e Gama et al. (2001) observaram que a absorção da energia cinética do projétil na forma de energia de



fratura por parte da cerâmica é desprezível. Woodward et al. (1994) mostraram que dos 16,95kJ de energia cinética de impacto submetidas a placas de Alumina AD 995, apenas 8J foram absorvidas em forma de energia de fratura. Gama et al. (2001) afirmaram que no máximo 0,2% da energia de impacto é absorvida em forma de energia de fratura na cerâmica.

Mayselless et al. (1987) mostraram que dos 4kJ de energia cinética de impacto submetidas à placas de Alumina AD 995, apenas 2J foram absorvidos em forma de energia de fratura, resultado semelhante encontrado por Woodward et al. (1994).

Na Tabela 4.1 o valor médio da energia absorvida para criar as superfícies de fratura dos fragmentos da cerâmica foi de 1,70J (Efrag), que representa um valor médio percentual de 0,051% da energia cinética de impacto do projétil (para uma velocidade média de 826 m/s e massa de  $9 \times 10^{-3}$  kg para o projétil), Figura 3.17. Os resultados encontrados estão em concordância com os observados por Horsfall e Buckley (1996), Mayselless et al. (1987), Woodward et al. (1994) e Gama et al. (2001).

Os resultados mostram que a influência da energia absorvida para criar as superfícies de fratura dos fragmentos da cerâmica, na blindagem, é desprezível na Eficiência Balística (redução na penetração do projétil) ou, então, por si só não se trata de um parâmetro adequado como método de avaliação balística. Por exemplo os compósitos do tipo Feltro e Borr não apresentaram perfuração durante o teste balístico, entretanto, o compósito do tipo PU com equivalente absorção de energia de fratura (Efrag), foi perfurado completamente pelo projétil.

#### **4.2.3.3 Considerações finais sobre a eficiência balística de blindagens com diferentes Densidades Superficiais**

O peso é um parâmetro importante na seleção de materiais para um uso em uma blindagem balística. Portanto para uma comparação entre os sistemas compósitos desenvolvidos foi calculado a Densidade Superficial e a Energia Absorvida Específica dos mesmos.

#### **Cálculo da Densidade Superficial**

O termo "Areal Density" ou Densidade Superficial (DS) é definido como a medida de densidade por área de um corpo, em  $\text{kg/m}^2$ . Este parâmetro permite a comparação da razão

peso por área entre blindagens balísticas constituídas por diferentes materiais. A Tabela 4.2 apresenta os valores calculados de DS dos compósitos para blindagem não perfurados.

Tabela 4.3 - Valores de Densidade Superficial dos compósitos.

Tipo do compósito	Espessura ( mm)	Densidade Superficial(DS) (kg/m <sup>2</sup> )
tipo Feltro	33	46,52
tipo Borr	33	58,52
Alumina de 12,7 mm de espessura + placa de PEUAPM (15 mm)	27,7	57,22

#### Cálculo da Energia Absorvida Específica

O termo “Specific Energy Absorbed” ou Energia Absorvida Específica (EAE) é definido como a razão entre a energia cinética dispensada pelo projétil, em Joule (J), e a Densidade Superficial, em kg/m<sup>2</sup>, possuindo a unidade Jm<sup>2</sup>/kg. O conhecimento deste parâmetro permite a comparação de eficiência balística, entre blindagens com diferentes DS, submetidas a distintas energias cinéticas de impacto.

A Tabela 4.3 apresenta os valores calculados de EAE dos compósitos para blindagem não perfurados.

Tabela 4.4 - Valores de Energia Absorvida Específica (EAE) dos compósitos.

Tipo do compósito	Espessura ( mm)	Energia Absorvida Específica (EAE) (Jm <sup>2</sup> / kg)
tipo Feltro	33	71,13
tipo Borr	33	56,54
Alumina de 12,7 mm de espessura + placa de PEUAPM (15 mm)	27,7	57,82

Pode-se comparar os resultados obtidos para os compósitos da Tabela 4.3 com a blindagem utilizada em carros-forte do mercado nacional para munição 7,62 mm comum (Nível III de proteção balística), formada por um composto de aço e borracha balística, possuindo densidade superficial de  $120 \text{ kg/m}^2$ , EAE de  $27,57 \text{ Jm}^2/\text{kg}$  e uma espessura de 60 mm, Figuras 4.57, 4.58 e 4.59. Os resultados da Tabela 4.2 e Tabela 4.3 são importantes, pois a redução de peso, espessura e a maior absorção específica de energia cinética são consideráveis.

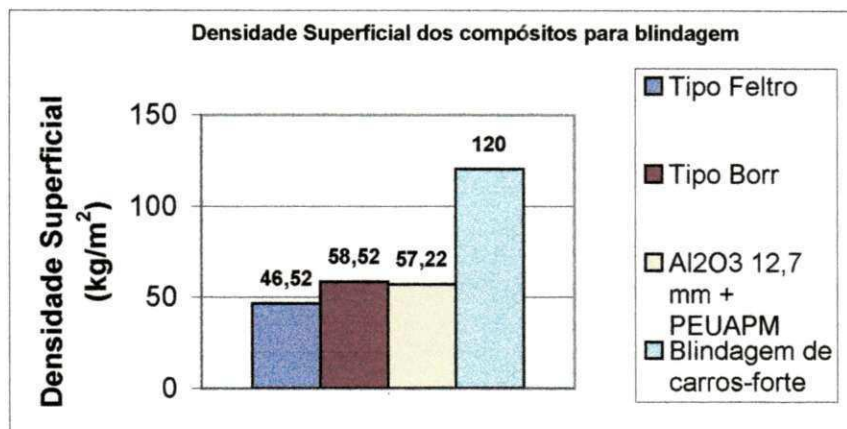


Figura 4.57 – Densidade Superficial dos compósitos para blindagem.

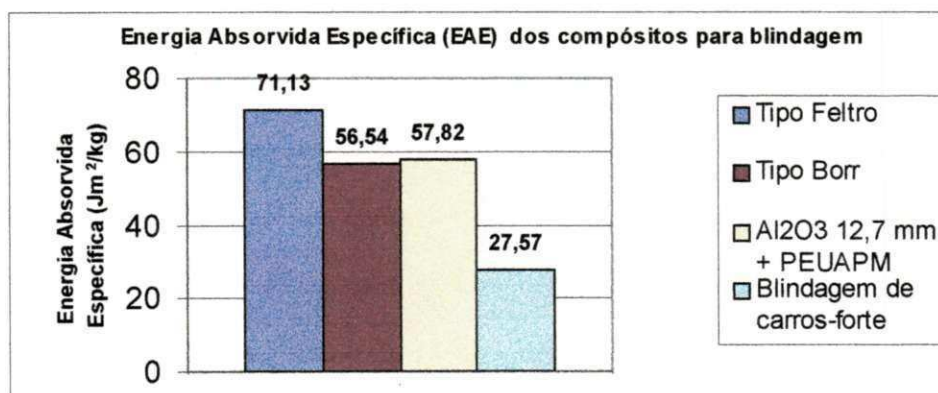


Figura 4.58 – Energia Absorvida Específica dos compósitos para blindagem.

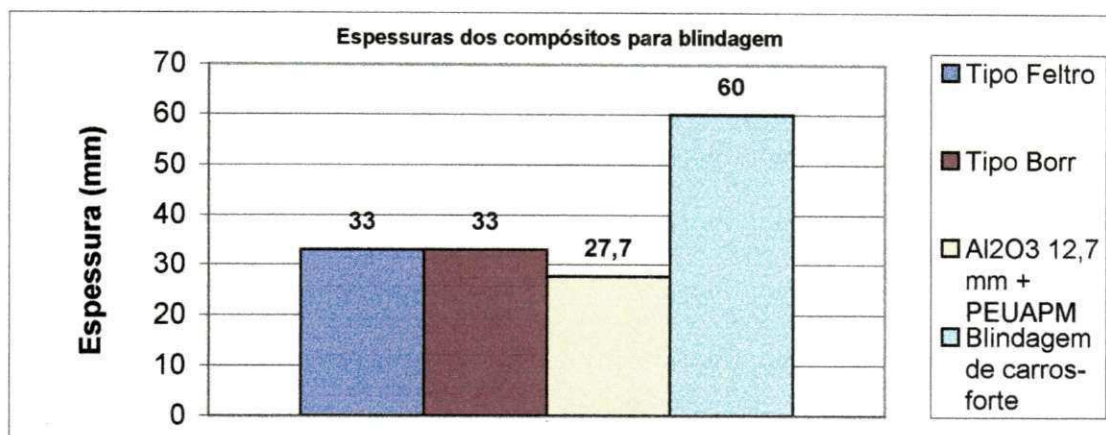


Figura 4.59 – Espessura dos compósitos para blindagem.

#### 4.2.4 Considerações finais dos resultados dos ensaios balísticos dos compósitos para blindagem

As placas de PEUAPM dos compósitos do tipo Borr e Feltro não sofreram perfuração. O compósito do tipo Borr foi o que apresentou menor dano balístico na placa de apoio. Os compósitos do tipo Sika, PU e PC foram perfurados e aparentemente suas respectivas placas de apoio de PEUAPM tiveram dano balístico semelhante.

Observou-se que :

- As cerâmicas dos compósitos do tipo Feltro e do tipo Sika apresentaram trincas circunferenciais tanto próximas como distantes do ponto de impacto.
- As cerâmicas dos compósitos Borr, PC e PU apresentaram trincas circunferenciais próximas ao ponto de impacto.
- Todas as cerâmicas dos 5 diferentes tipos de compósitos apresentaram trincas radiais, resultado da flexão da placa cerâmica.

Na análise das superfícies de fratura das cerâmicas não foi possível correlacionar a presença e a forma de distribuição das trincas radiais e circunferenciais com a diferença de comportamento balístico entre os compósitos para blindagem ensaiados.

Usando-se um paquímetro de mesa mediu-se a altura do ponto mais alto do abaulamento das placas de apoio de PEUAPM dos compósitos não penetrados (tipo Feltro e Borr). Os resultados estão plotados na Tabela 4.5:

Tabela 4.5 - Medida da deflexão dos compósitos não penetrados

Material da interface	Deflexão máxima (mm)
Borracha	3,6
Feltro	6,1

A placa de apoio do compósito tipo Feltro defletiu mais do que a placa de apoio do compósito tipo Borr.

A análise da deflexão destes dois compósitos em conjunto com as superfícies de fratura das cerâmicas, Figuras 4.28, 4.29 e 4.34 e com a curva de distribuição acumulada passante de massa dos fragmentos coletados, Figura 4.53, permite algumas considerações que, embora não conclusivas em face do pequeno número de corpos de prova considerados válidos, merecem a atenção :

- a) quando se usa um material como interface entre a placa cerâmica e a placa de apoio, a deflexão da placa de apoio não é suficiente para caracterizar, por si só, a qualidade do comportamento balístico da blindagem;
- b) ou seja, uma maior deflexão da placa de apoio (compósito com interface de feltro) não assegura um comportamento melhor com relação a formação de trincas radiais na cerâmica ( geradas pela flexão da placa cerâmica).
- c) a borracha como material de interface no compósito para blindagem, aparentemente não só limitou a flexão da placa cerâmica e, portanto, controlando a formação de trincas radiais, como também absorveu mais energia cinética do projétil, sendo um dos fatores limitantes da flexão da placa de apoio.

Dos compósitos estudados e sob as condições de tiro a que foram expostos , os que apresentaram melhor performance para blindagens foram as configurações que continham como material de interface o feltro e a borracha.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

#### **5.1 Conclusões**

- O uso adequado de materiais na interface de um sistema de blindagem cerâmica – placa dúctil polimérica pode maximizar a sua capacidade de proteção balística.
- Dos compósitos para blindagem balística estudados os que apresentaram melhor eficiência balística foram aqueles que tinham como material de interface entre a placa cerâmica e a placa de apoio, a borracha e o feltro.
- Os compósitos tipo Feltro e tipo Borr apresentaram o melhor desempenho balístico.

- Na análise das superfícies de fratura das cerâmicas não foi possível correlacionar a presença e a forma de distribuição das trincas radiais e circunferenciais com a diferença de comportamento balístico entre os compósitos para blindagem ensaiados.
- Quando se usa um material como interface entre a placa cerâmica e a placa de apoio (retaguarda), a deflexão da placa de apoio não é suficiente para caracterizar a qualidade do comportamento balístico da blindagem.
- O gráfico da distribuição acumulada passante de massa dos fragmentos coletados dos compósitos impactados mostrou que de uma maneira geral os compósitos do tipo Feltro, Sika, Borr e PC tiveram uma maior fragmentação do que o compósito do tipo PU.
- O fenômeno de cominuição no ponto de impacto deve ser melhor estudado com o objetivo de verificar a sua real importância nos mecanismos de absorção de energia cinética do projétil.
- O gráfico de distribuição de massa retida das peneiras menores do que 2,38 mm dos fragmentos das placas de alumina dos compósitos para blindagem mostrou que os compósitos do tipo Feltro, Sika, Borr e PC tiveram um maior dano dinâmico (ou seja, maior reflexão da onda de tensão) do que o compósito do tipo PU.
- O uso de um material alveolar como interface (compósito do tipo PC) não gerou maior reflexão da onda de tensão quando comparado com os outros materiais não – alveolares como feltro, borracha e polietileno de ultra alto peso molecular (compósito com interface do tipo Sika).
- Os resultados mostraram que a influência da energia absorvida para criar as superfícies de fratura dos fragmentos da cerâmica, na blindagem, é desprezível na Eficiência Balística (redução na penetração do projétil).

- O compósito do tipo Feltro é 25 % mais leve, possui um EAE 25% maior do que o compósito tipo Borr.
- Os compósitos do tipo Borr e o compósito  $Al_2O_3$  (12,7 mm) + PEUAPM possuem valores semelhantes de peso, EAE e espessura.
- A comparação dos compósitos que apresentaram melhor desempenho balístico (com interface de feltro e borracha) com compósitos atualmente utilizados em blindagens de carros-forte mostra que os compósitos desenvolvidos apresentam vantagens comparativas que justificam acreditar no potencial comercial dos mesmos.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Estudo da influência da variação da espessura de cada um dos materiais usados como interface neste trabalho em um sistema de blindagem compósito.
- Estudo de um maior número de corpos de prova, variando a espessura da placa cerâmica e do material de interface borracha e feltro, visando uma melhor compreensão do comportamento da blindagem com relação a formação de trincas radiais ( flexão da placa cerâmica ) e trincas circunferenciais (reflexão da onda de tensão) na placa cerâmica.
- Otimização das espessuras dos compósitos que apresentaram melhor desempenho, com vista a uma possível utilização comercial dos mesmos.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCHAR, R. **Estudo do comportamento balístico de blindagens leves**. 1988. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

ACCHAR, ROBERTO et al. Efeito da umidade sobre a resistência balística de uma blindagem leve individual. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. VIII, n. 2, p. 63 - 71, abr/jun 1991.

ACCHAR, ROBERTO. Proteção balística individual: otimização do emprego do tecido de fibras de aramida. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. VII, n. 2, p. 14 - 20, abr/jun 1990.

AJDELSZTAJN, L. Comportamento de placas de material compósito submetidas à impactos balísticos, In: 13ª CBECIMAT, VI SEMEL.

AJDELSZTAJN, L. Desenvolvimento de placas de material compósito para aplicação em proteções contra impactos balísticos. 1998. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, Universidade Federal do Rio Janeiro, Rio de Janeiro.

ALMOHANDES, A.A. et al. Experimental investigation of the ballistic resistance of steel-fiberglass reinforced polyester laminated plates. **Composites : Part B 27B**, p. 447-458, 1996.

ALVES, P. V. S. Um futuro sinistro. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. X, n. 4, out/dez 1993.

ANDREWS, M. C. et al. Review : Interfacial properties of aramid/epoxy model composites. **Journal of Materials Science**, v. 31, p. 3893 - 3913, 1996.

ARAÚJO, C. E. F. et al. **Comportamento balístico de blindagens híbridas cerâmico -**

**polímeros**. Projeto de Fim de Curso, Instituto Militar de Engenharia, novembro de 1995.

ATKINSON, B. K. **Fracture Mechanics of Rock**. London : Academic Press Inc. Ltd., 1987

AVERY, J. G. et al. Fracture Control in Ballistic - Damaged Graphite / Epoxy Wing Structure, In: Fracture Mechanics: Thirteenth Conference, ASTM, 1981.

BACKMAN, M. E. ; GOLDSMITH, W. The Mechanics of penetration of projectiles into targets. **Int. J. Engng. Sci.**, v. 16, p. 1 - 99, 1978.

BASHENOV, S. Dissipation of energy by bulletproof aramid fabric. **Journal of Materials Science**, v. 32, p. 4167 - 4173, 1997.

BEN-DOR, G. et al. Effect of air gap and order of plates on ballistic resistance of two layered armor. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v.31, p. 233-241, 1999.

BEN-DOR, G. et al. Effect of air gap on ballistic resistance of targets for conical impactors. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v.30, p. 243-249, 1998.

BEN-DOR, G. et al. On the ballistic resistance of multilayered targets with air gaps. **Int. J. Solids Structures**, v.35, n. 23, p. 3097-3103, 1998.

BEN-DOR, G. et al. Optimization of two component ceramic armor for a given impact velocity. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v.33, p. 185-190, 2000.

BIBO G. A. et al. Review :The role of reinforcement architecture on impact damage mechanisms and post - impact compression behaviour. **Journal of Materials Science**, v. 31 , p. 1115 - 1137, 1996

BLACKWELL, J. **Tempestade no Deserto**. Rio de Janeiro : Editora Objetiva Ltda, 1991, 258 p.

BRUCK, H. A. A one-dimensional model for designing functionally graded materials to manage stress waves. **Int. J. Solids Structures**, v.37, p. 6383-6395, 2000.

CALDWELL, J. S. JR. The future of combat. **Defence Systems International**, 2001.

CARDOSO, A. L. V et al. Estudo científico de blindagens - trabalhos e projetos no Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, In: Encontro Técnico de Química – Militar, 1999, Instituto de Pesquisa da Marinha, Rio de Janeiro.

CARDOSO, A. L. V et al. A evolução das blindagens para viaturas militares de reconhecimento, In: Encontro Técnico de Química – Militar, 2000, Instituto de Pesquisa da Marinha, Rio de Janeiro.

CARDOSO, A. L. V. **Estudo Técnico do IPD GM01/2001**.

CHAUDHRI, M. M. et al. Single particle impact damage of fused silica. **Journal of Materials Science**, n. 5, p. 345 - 352, 1980.

CHAVES, G. Q. et al. **Fabricação, caracterização e ensaio balístico de placas cerâmicas para blindagem compósita**. Projeto de Fim de Curso. Instituto Militar de Engenharia, novembro 1996.

CHIN, ERNEST S. C. Army focused research team on functionally graded armor composites. **Materials Science and Engineering**, v. A259, p. 155 - 161, 1999

CHOI, J. H. et al. Long-rod impact phenomena: role of wave interaction on crack propagation. **International Journal of Impact Engineering**, v. 17, p. 195-204, 1995.

CIMPOERU, S. J. The durability aspect of armouring with ceramic tiles. **Journal of Materials Science**, n. 15, p. 837 - 839, 1996.

COOPER, PAUL W. et al. **Introduction to the technology of explosives**. New York : Ed. Wiley - Vch, , 1996.

COSTA, C. A. et al. Fractografia em vidros. **Cerâmica**, v. 46, n. 299, p. 139-144, 2000.

DA COSTA, A. M. JR et al. Shock - waves on polymer composites. **Journal of Materials Science Letters** , v.16, p. 1480 - 1482, 1997.

DA COSTA, A. M. JR et al. Woven glass fibre/epoxy composites under shock – waves. **Latin American Applied Research**, v. 26, p. 19 - 21, 1996.

D'ALMEIDA, J. R. et al. Comportamento Balístico de Blindagens Leves. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. VI, n. 4, p. 64 - 70, out/dez 1989.

Dyneema : catálogo

EBELING, T et al. Delamination failure of a single yarn glass fiber composite. **Journal of Composite Materials**, v. 31, n. 13, 1997

EBELING,T. et al. Delamination failure of woven glass fiber composite. **Journal of Composite Materials**, v.31, n. 13,1997

ELIAS, C. N. O emprego de munições com carga oca na luta contra carros de combate. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. IV, n. 3, p. 7 -12, julho/setembro 1987.

EVANS, A. G. et al. Strength degradation by projectile impacts. **Journal of the American Ceramic Society**, v.56, n.8, Jan.1973

FATT, M.S.H. ; PARK, K.S. Perforation of honeycomb sandwich plates by projectiles. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 31, p. 889-899, 2000.

FERREIRA, D. B. B. **Comportamento mecânico de blindagens compósitas leves**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

FINK, B.K. Performance Metrics for Composite Integral Armor. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 13, p. 417-431, Set. 2000.

FRANZEN, R.R. et al. The influence of experimental design on depth-of-penetration (DOP) test results and derived ballistic efficiencies. **International Journal of Impact Engineering**, v.19, n. 8, p. 727-737, 1997.

GAMA, B. A. et al. Aluminum foam integral armor: a new dimension in armor design. **Composite Structures**, v. 52, p. 381-395, 2001.

GAMA, B. A.; GILLESPIE, J. W. Jr. Study of Through-Thickness Wave Propagation in Multi-Layer Hybrid Lightweight Armor. **Proceedings of the 13<sup>th</sup> Annual Technical Conference of the American Society for Composites**, Set. 21-23, 1998, Baltimore, MD.

GARLAND, D. State of the science in body armour, In: Defence Systems International, 1989.

GELLERT E. P. et al. Energy transfer in ballistic perforation of fibre reinforced composites. **Journal of Materials Science**, v.33, p.1845-1850,1998

GOLDSMITH, W.; LOUIE, DELL L. Axial perforation of aluminum honeycombs by projectiles. **Int. J. Solids Structures**, v. 32, n. 8/9, p. 1017-1046, 1995

GONÇALVES, D. P.; MELO, F. C. LOURENÇO. Blindagem para aeronaves, In: Encontro Técnico de Química – Militar, 1999, Instituto de Pesquisa da Marinha, Rio de Janeiro.

GUDEN, G. et al. Quasi - static and dynamic compression behavior of na FP alumina -

reinforced aluminum metal matrix composite. **Journal of Materials Science**, v.33, p. 3285 - 3291, 1998.

HOLMBERG, ROGER et al. **Rock Blasting and Explosives Engineering**. Ed. CRC Press, 1994.

HORSFALL, I.; BUCKLEY, D. The effect of through-thickness cracks on the ballistic performance of ceramic armour systems. **International Journal of Impact Engineering**, v.18, n. 3, p. 309-318, 1996.

HUANG, X. et al. Effect of single impact damage on strength of alumina and zirconia toughened alumina. **Journal of Materials Science**, n. 15, p. 1925 - 1926, 1996.

JANG, J. et al. Failure of ceramic/fibre - reinforced plastic composites under hypervelocity impact loading. **Journal of Materials Science**, v.32, p. 23 - 33, 1997

LAIBLE, ROY C. **Ballistic Materials and penetration mechanics**. Netherlands: Ed. Elsevier Scientific Publishing Company, 1980.

LEE, B. L. et al. Failure of Spectra Polyethylene Fiber - Reinforced Composites under Ballistic Impact Loading. **Journal of Composite Materials**, v. 28, n. 13, p. 1202 - 1226, 1994.

LIMA, L. M. V C. Ondas Hidrodinâmicas. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. IX, n.2, abr/jun, 1992.

LIU, D. Impact - Induced Delamination - A View of Bending stiffness Mismatching. **Journal of Composite Materials**, v.22, 1988.

LIU, D. Matrix Cracking in impacted glass/epoxy plates. **Journal of Composite Materials**, v. 21, jul., 1987.

MADRUGA, T. P. Alumina em blindagem balística. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**.

MAEKAWA, SHIN, H - S. et al. Particle impact damage on ceramics. **Proceedings of the KSME/JSME Joint Conference**, 6-7 Julho, 1990. Seoul, Korea.

MARTÍNEZ, M. A. et al. Confined compression of elastic adhesives at high rates of strain. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, v. 18, p. 375-383, 1998

MATCHEN, B. Applications of ceramics in armor products. **Key Engineering Materials**, v. 122-124, p. 333-342, 1996.

MAYSELESS, M. et al. Impact on ceramic targets. **Journal of Applied Mechanics**, v. 54, p. 373 - 378, jun., 1987.

MEYERS, M. A. **Dynamic Behavior of Materials**. New York : Wiley – Interscience Publication, 1994, 668 p.

MIGUEL, A. SAN. Composite floor armor for military tanks and the likes. Patente de 28/08/1981, DTIC, U. S. Army.

MORAES, R. F. Um breve histórico sobre a propagação da onda. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia** , v. XIII, n. 2, 1996.

MOSS, G. M. et al. **Military Ballistic : A basic manual**. UK: Ed. Brassey's Ltd, 1995.

NANDURI, M.; SHUKLA, A. Microstructural characterization of SiC/Al and FP/Al metal matrix composites subjected to dynamic loadings. **Journal of Materials Science**, v.31, p. 633-641, 1996.

NOBBE, T. A. Armor goes hi – tech. **ME** , p. 30 - 33, jun., 1986.

NORMA MIL - B - 44053A 84

NORMA MIL - I - 17368C 84

NORMA MIL - PRF - 46303E

NORMA MIL - STD - 662F

NORMA MINISTÉRIO DA JUSTIÇA - BRASIL, 2 DE OUTUBRO 1995.

NORMA NIJ STANDARD 0101.03

NUNES, J. R. et al. Breve estudo sobre seu desenvolvimento. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. II, n. 4, p. 36 - 40, out/dez, 1985.

OLSSON, R. Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 31, p. 879-887, 2000.

ORGORKIEWICZ, R. M. Armor for combat vehicles : New armor materials. **Machine Design**, 1969.

ORGORKIEWICZ, R. M. Armoured vehicles of composite materials. **International Defense Review**, v. 22, p. 969 - 970, 1989.

PETERS, S. T. **Handbook of composites**. London : Ed. Chapman & Hall, 1998.

PIGGOTT, M. R. et al. Compression strength of carbon, glass and kevlar - 49 fibre reinforced polyester resins. **Journal of Materials Science** v.15, p. 2523 - 2538, 1980

PINHEIRO, M. A . S. Compósitos reforçados por tecidos. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. XVII, n. 1, 2000.



PINTO, ANDRÉ LUÍS. **Relação entre microestrutura e propriedades mecânicas no polipropileno de ultra alto peso molecular.** 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

PREVORSEK, DUSAN C. et al. Analysis of the temperature rise in the projectile and extended chain polyethylene fiber composite armor during ballistic impact and penetration. **Polymer Engineering and Science**, v.34, n. 2, Jan.1994.

REAUGH, J. E. et al. Impact studies of five ceramic materials and pyrex. **International Journal of Impact Engineering**, v.23, p. 771-782, 1999.

RICH, G.; BUNSELL, A. R. The behavior of boron - aluminium composites during and after impact. **Journal of Materials Science**, v. 14, p. 2373 - 2383, 1979

RICKERBY, D. G. et al. The effect of approach direction on damage in MgO due to spherical particle impact. **Journal of Materials Science**, n. 15, p. 2435 - 2447, 1980.

RINEHART, J. S. On fractures caused by explosions and impacts. **Quarterly of the Colorado School of Mines**, v. 55, n. 4, p. 69-155, 1960.

SAVAGE, G. M. Fabric and fibre reinforced laminate armours. **Metals and Materials**, v. 5, p. 285 - 290, 1989.

SCARPONI, CLAUDIO et al. Impact testing on composites laminates and sandwich panels. **Journal of Composite Materials**, v. 30, n. 17, 1996

SHERMAN, D. Impact failure mechanisms in alumina tiles on finite thickness support and the effect of confinement. **International Journal of Impact Engineering**, v. 24, p. 313-328, 2000.

SHERMAN, DOV; BRANDON, D. G. The ballistic failure mechanism and sequence in semi - infinite supported alumina tiles. **J. Mater. Res.**, v.12, n. 5, p. 1335 - 1343, maio, 1997.

SHIM V.P.W.; YAP, K.Y. Modelling impact deformation of foam – plate sandwich systems. **International Journal of Impact Engineering**, v. 19, n. 7, p. 615-636, 1997.

SILVA, P. L. TEIXEIRA et al . **Balística Terminal**. Projeto de Fim de Curso, Instituto Militar de Engenharia, 1988.

SOUSA, A. N. **Materiais Alternativos para Aplicações em Blindagens Balísticas**. 1999. 195 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

Spectra ( Allied Signal Inc. ) : catálogo

SRIVATSAN, T. S. Microstructure, tensile properties and fracture behaviour of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particulate - reinforced aluminium alloy metal matrix composites. **Journal of Materials Science**, v. 31, p. 1375 - 1388,1996.

STAVROPOULOS, C. D. et al.Effect of thickness on the compressive performance of ballistically impacted carbon fibre reinforced plastic ( CFRP) laminates. **Journal of Materials Science**, v. 32, p. 931 - 936, 1997.

STEADMAN, NICK. Ballistic Instrumentation - Essential for Quality Control. **Defence**, nov. 1988.

SUAREZ, J. C. MIGUEZ. Materiais para uso em blindagens de carros de combate e em proteção individual. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**

SUAREZ, J. C. MIGUEZ. Proteção individual. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v.VII, n. 2, p. 58 - 65, abr/jun 1990.

SUZUKI, A.; NATSUMURA, T. et al. Particle impact damage in silicon carbide. **Proceedings of the KSME/JSME Joint Conference**, 6-7 Julho, 1990. Seoul, Korea.

TAVARES, L. M. M. **Tratamento de Minérios (Notas de Aula)**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFRJ, 1998.

Twaron : Aramid Fibers : catálogo

Twaron : CT Microfilament : catálogo

U. S. ARMY MATERIAL COMMAND HEADQUARTERS (USA). **Elements of terminal ballistics part two, collection and analysis of data concerning targets**. Research and Development of Material, Engineering Design Handbook, 1962 (desclassificado 1976).

WILKINS, MARK L. Mechanics of Penetration and Perforation. **Int. J. Engng. Sci.**, v. 16, p. 793-807, 1978.

WOODWARD, R. L. et al. A study of fragmentation in the ballistic impact of ceramics. **International Journal of Impact Engineering**, v.15, n. 5, p. 605-618, 1994.

WU, HSI - YUNG T. et al. Impact induced stresses, strains, and delamination in composite plates. **Journal of Composite Materials**, v. 22, jun. 1988.

WU, HSI - YUNG T. et al. Measurements of matrix cracking and delamination caused by impact on composite plates. **Journal of Composite Materials**, v. 22, jun. 1988.

XAVIER, C., WIEBECK, H. et al. Desenvolvimento de compósitos cerâmicos para blindagens balística. In: 13ª CBECIMAT, VI SEMEL.

YU, JENNY Z. et al. Impact responses of gradient designed textile structural, composites under low and high impact velocities. In : ANTEC, 1994. p. 2352 – 2357.

ZAERA, R. et al. Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armours subjected to impact. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 31, p. 823-833, 2000.

ZHU, GUOQI et al. Penetration of laminated kevlar by projectiles - I. Experimental Investigation. **Int. J. Solids Structures**, v. 29, n. 4, p. 399 - 420, 1992

ZHU, GUOQI et al. Penetration of laminated kevlar by projectiles - II. Analytical Model. **Int. J. Solids Structures**, v. 29, n. 4, p.421 - 436, 1992.

ZUKAS, JONAS A. et al. Impact Dynamics. New York: Ed. Wiley - Interscience Publication, 1982.

## **ANEXOS**

## ANEXO A - Determinação da velocidade residual do projétil

### Método da barreira

Almohandes et al. (1996) conseguiram medir a velocidade residual de projéteis perforantes que transpassaram alvos dúcteis (placas de aço).

Neste experimento testou-se um corpo de prova do tipo Sika (feito especialmente para esse teste e sem o uso do invólucro de kevlar) com munição do tipo 7,62 mm comum.

Infelizmente, os estilhaços da cerâmica acionaram a barreira ótica e velocidades absurdas foram medidas, portanto, nenhum resultado foi aproveitado e se descartou esse método.

### Método do Radar Doppler

Neste experimento testou-se 4 compósitos tipo Sika (feito especialmente para esse teste e sem o uso do invólucro de kevlar) com munição do tipo 7,62 mm comum. Nas Figuras A1 à A3 observam-se as curvas levantadas de velocidade versus distância.

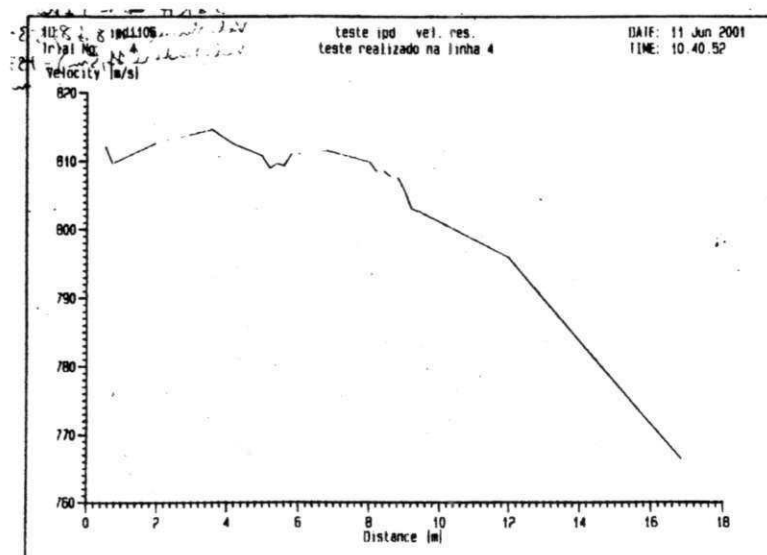


Figura A1 - Velocidade do projétil versus distância para o primeiro tiro.

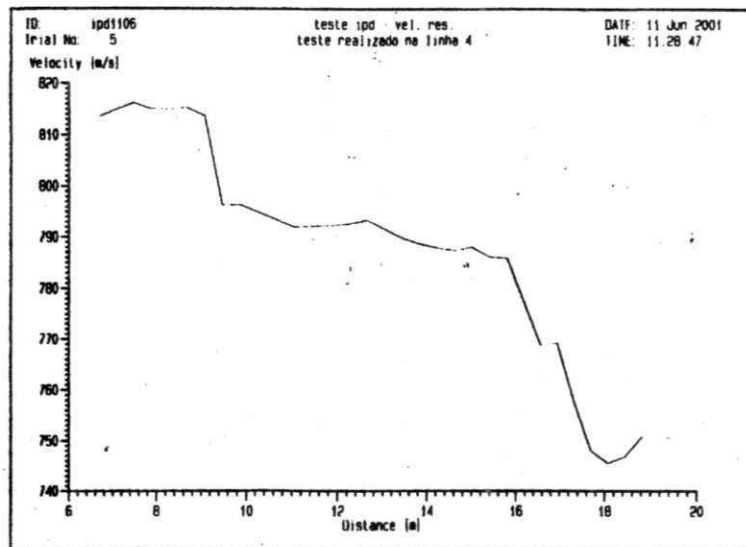


Figura A2 - Velocidade do projétil versus distância para o segundo tiro.

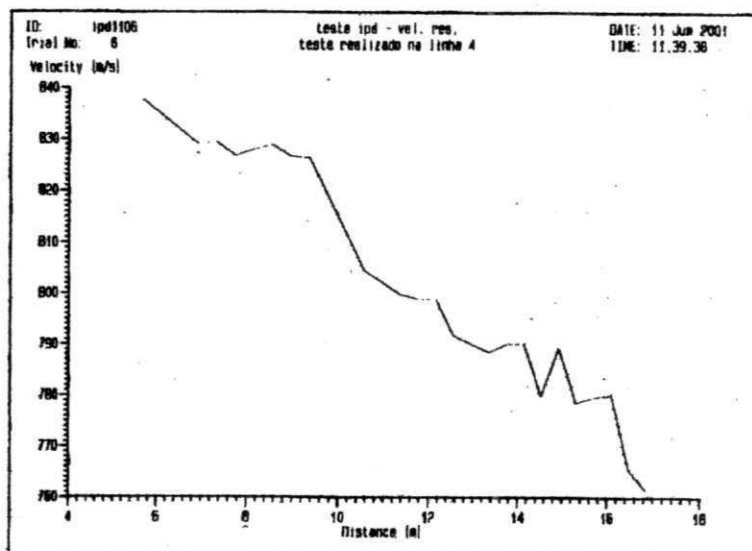


Figura A3 - Velocidade do projétil versus distância para o terceiro tiro.

As Figuras A1, A2 e A3 mostram uma grande oscilação nos valores da velocidade do projétil entre 0 e 10 metros, quando na verdade neste intervalo a velocidade deveria ser praticamente constante. Outra característica comum aos três gráficos é que em alguns pontos deste intervalo a velocidade do projétil aumenta, algo que não reflete a realidade. Como essas variações de velocidade não puderam ser explicadas, resolveu-se plotar o gráfico

velocidade versus tempo para um tiro com munição do tipo 7,62 mm comum sem alvo, Figura A4.

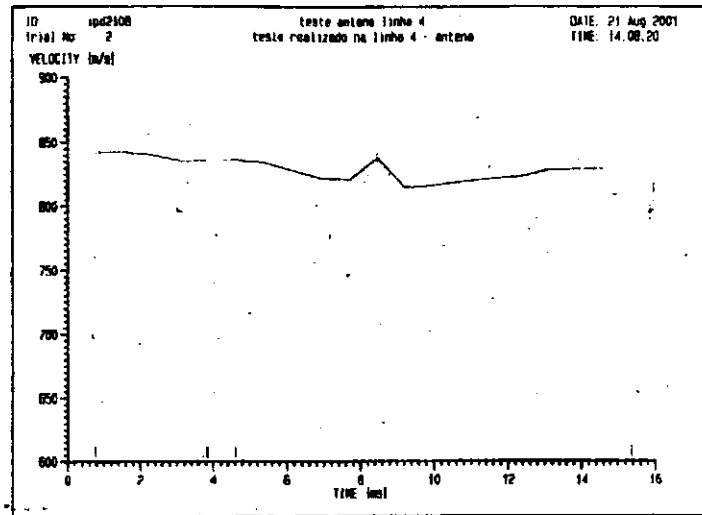


Figura A4 - Velocidade do projétil versus tempo para o quarto tiro.

Como pode ser observado na Figura A4, a variação entre 8 e 10 metros caracteriza novamente um aumento na velocidade do projétil.

O objetivo ao se tentar medir a velocidade residual do projétil era estimar-se a absorção de energia cinética durante o impacto provocado pelo projétil nos compósitos, entretanto, os métodos (método da Barreira e Radar Doppler) usados para este fim não foram consistentes e, portanto, esta alternativa deixou de ser considerada.