

## **Análise Numérico-Experimental de Blindagens Balísticas**

**José Carlos Cachola Mestre**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Mecânica**

Orientadores: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa

Prof. Ivo Manuel Ferreira de Bragança

**Júri**

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista

Orientador: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa

Vogais: Prof. Virgínia Isabel Monteiro Nabais Infante

Coronel João Paulo Barreiros Pereira da Silva

**Novembro 2015**







## Agradecimentos

Antes de mais é importante frisar que este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto “Produção e Testes de Painéis de Proteção Balística” parcialmente suportado pelo centro de Investigação da Academia Militar/Estado-Maior do Exército.

Com este pequeno texto quero deixar um profundo agradecimento às pessoas que direta ou indiretamente me ajudaram à conclusão deste trabalho.

Aos meus orientadores, Professores Ivo Bragança e Pedro Rosa pela paciência, ajuda, esclarecimento de dúvidas e sugestões que foi dando ao longo do projeto.

Ao Diretor de Curso de Serviço de Material da Academia Militar, Tenente-Coronel Martins por todo o apoio prestado no desenvolvimento deste trabalho e pela sua constante preocupação sobre o desenvolvimento do mesmo. Também quero agradecer ao antigo diretor de Curso, Coronel Pereira da Silva que acompanhou a maioria do meu percurso na frequência deste curso e pelo sacrifício, esforço e dedicação em prol dos alunos do Serviço de Material.

Ao Professor Doutor José Borges por me ter incentivado na escolha deste tema e pela constante ajuda na superação das dificuldades encontradas.

Ao Luís Pina do INEGI pela sua prontidão, ajuda e orientações que foi dando ao longo do projeto.

Ao Raul Moreira também do INEGI, pela ajuda e paciência na superação das dificuldades encontradas no *software* de elementos finitos utilizado.

Às Oficinas Gerais de Material de Engenharia pela sua disponibilidade em efetuar o suporte metálico para os materiais serem testados no campo de tiro.

À Polícia Judiciária, em especial ao Laboratório de Polícia Científica (Área de Balística/Vestígios) pela ajuda na identificação dos materiais constituintes da munição da pistola *Walther*.

Aos meus camaradas de Engenharias da Academia Militar, em especial para aqueles que de mais perto conviveram comigo, pelos 6 anos de interajuda, sacrifícios, bons e maus momentos que passámos juntos.

Aos amigos que fiz no Instituto Superior Técnico pela ajuda na integração nas turmas e pelas sessões de estudo das várias unidades curriculares.

À minha família, em especial aos meus pais, que sempre me apoiaram nas minhas decisões e me deram força e coragem para superar este longo e árduo percurso.



## Resumo

O desenvolvimento técnico e científico em torno das blindagens tem procurado contrariar o constante aperfeiçoamento dos projéteis e do seu poder de penetração. Para cumprir este objetivo, é necessário recorrer a soluções inovadoras tanto em termos dos materiais utilizados no fabrico, como ao nível do formato da própria blindagem.

Com este trabalho pretende-se dar os primeiros passos na produção e teste de materiais em situação de tiro real, bem como na modelação e simulação dos mesmos com o objetivo de adquirir capacidades, técnicas e procedimentos para trabalhos futuros.

O trabalho teve início com a realização da pesquisa bibliográfica sobre vários aspetos desde o fabrico até à avaliação do desempenho de blindagens balísticas. O trabalho teórico desta tese incidiu na modelação por elementos finitos dos elementos balísticos (proteções e projétil) tendo como objetivo a simulação numérica da sua interação em condições de impacto. O trabalho experimental foi realizado no campo de tiro da Escola das Armas onde foram testados os alvos com os materiais compósitos produzidos e com placas de alumínio, com diferentes combinações.

A análise de resultados permitiu comparar e avaliar as diferenças entre as estimativas teóricas e as suas limitações com as observações experimentais do tiro real.

**Palavras-chave:** Blindagens, Materiais Compósitos, Campo de Tiro, Simulações Numéricas, Elementos Balísticos, Dano.



## Abstract

The scientific and technological development of armors is always trying to match the constant improvement of weapons and their piercing power, many of these are developed for specific purposes to increase their ability to protect people and equipment. To achieve this objective, it is often necessary to use innovative solutions, in terms of the materials used in the manufacture and in the type of the armor itself.

This dissertation intends to take the first steps in the production and testing of ballistic protection materials in real shooting situation, as well as modeling and simulation of the same with the purpose of acquiring skills, techniques and procedures for future work.

This work began with the search of literature on several aspects from manufacturing until evaluation shields ballistic performance. The theoretical work of this thesis focused on the modeling finite element ballistic elements (protections and projectile) with the objective of numerical simulation of their interaction in impact conditions. The experimental work was performed in the shooting range of the Escola das Armas where targets were tested with the produced composite materials and aluminum plates, with different combinations.

The results analysis allowed to compare and evaluate the differences between the theoretical approximations and their limitations with experimental observations of actual shooting.

**Key-words:** Armor, Composite Materials, Shooting Range, Numerical Simulations, Ballistic Elements, Damage.



# Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo .....	iii
Abstract.....	v
1 Introdução .....	1
2 Estado da Arte.....	3
2.1 Introdução Histórica das Blindagens .....	3
2.2 Elementos Balísticos .....	4
2.2.1 Munições de Armas Ligeiras .....	6
2.2.2 Elementos de Proteção Balística.....	9
2.2.3 Coletes Balísticos .....	11
2.2.4 Capacetes Balísticos .....	13
2.2.5 Avaliação dos Elementos de Proteção Balística .....	13
2.3 Modelos de Análise de Blindagens Balísticas .....	15
2.3.1 Testes Experimentais .....	15
2.3.2 Simulações Numéricas.....	17
3 Conceitos Associados à Análise de Impacto .....	21
3.1 Princípios Fundamentais .....	21
3.2 Equação de Estado .....	22
3.3 Classificação das Velocidade de Impacto.....	22
3.4 Ondas de Choque .....	23
3.4.1 Condições de Rankine Hugoniot.....	24
3.4.2 Equação de Estado de Mie-Gruneisen .....	26
3.5 Modos de Falha .....	27
4 Características dos Materiais .....	29
4.1 Técnicas Experimentais de Caracterização do Impacto .....	29
4.2 Propriedades Mecânicas .....	30
4.3 Materiais utilizados nas blindagens.....	30
4.3.1 Materiais Compósitos .....	30
4.4 Seleção dos Materiais para os painéis balísticos.....	36
4.5 Produção dos Materiais Compósitos.....	37

4.6	Identificação dos materiais do Projétil de 9mm.....	40
5	Ensaio Balísticos .....	41
5.1	Plano de Ensaio Balísticos .....	41
5.2	Requisitos dos Painéis Balísticos.....	42
5.3	Medidas de Segurança Implementadas.....	43
5.4	Preparação das Infraestruturas e Instalação dos Ensaio.....	44
5.5	Resultados dos Ensaio .....	46
6	Simulações Numéricas.....	57
6.1	Método dos Elementos Finitos .....	57
6.2	<i>Software</i> Abaqus .....	58
6.3	Considerações Iniciais.....	59
6.4	Modelos Constitutivos .....	60
6.4.1	Modelo de Johnson-Cook.....	60
6.4.2	Dano de Hashin .....	61
6.5	Modelos Efetuados.....	63
7	Conclusões e Trabalhos Futuros .....	73
7.1	Conclusões da Parte Experimental .....	73
7.2	Conclusões Simulações Numéricas.....	74
	Bibliografia .....	75
	Apêndices.....	79
	Apêndice A.....	79
	Apêndice B.....	81
	Apêndice C .....	83
	Apêndice D .....	91

## Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Níveis de proteção balística STANAG 4569. ....	10
Tabela 2.2 – Características típicas dos projéteis utilizados em testes balísticos.....	10
Tabela 2.3 – Níveis de proteção balística NIJ Standard-0101.06.....	13
Tabela 2.4 – Características dos painéis de proteção balística.....	16
Tabela 3.1 – Fenómenos físicos associados a intervalos de velocidades de impacto.....	23
Tabela 4.1 – Classificação dos compósitos segundo a natureza dos seus constituintes. ....	32
Tabela 5.1 – Plano de ensaios balísticos alterado.....	41
Tabela 5.2 – Resultados do ensaio balístico nº 1. ....	47
Tabela 5.3 – Resultados do ensaio balístico nº2. ....	47
Tabela 5.4 – Resultados do ensaio balístico nº3. ....	48
Tabela 5.5 – Resultados do ensaio balístico nº4. ....	49
Tabela 5.6 – Resultados do ensaio balístico nº5. ....	50
Tabela 5.7 – Resultados do ensaio balístico nº5 ..... 50	50
Tabela 5.8 – Resultados do ensaio balístico nº7. ....	51
Tabela 5.9 – Resultados do ensaio balístico nº8 ..... 52	52
Tabela 5.10 – Resultados do ensaio balístico nº9. ....	52
Tabela 5.11 – Resultados do ensaio balístico nº10. ....	53
Tabela 5.12 – Resultados do ensaio balístico nº11. ....	54
Tabela A.1 – Produtos existentes no mercado. ....	79
Tabela D.1 – Especificações das ameaças utilizadas. ....	83
Tabela D.2 – Detalhes do Ensaio Balístico N°1. ....	83
Tabela D.3 – Detalhes do Ensaio Balístico N°2. ....	84
Tabela D.4 – Detalhes do Ensaio Balístico N°3. ....	84
Tabela D.5 – Detalhes do Ensaio Balístico N°4. ....	85
Tabela D.6 – Detalhes do Ensaio Balístico N°5. ....	85
Tabela D.7 – Detalhes do Ensaio Balístico N°6 ..... 86	86
Tabela D.8 – Detalhes do Ensaio Balístico N°7. ....	86
Tabela D.9 – Detalhes do Ensaio Balístico N°8. ....	87
Tabela D.10 – Detalhes do Ensaio Balístico N°9. ....	87
Tabela D.11 – Detalhes do Ensaio Balístico N°10. ....	88
Tabela D.12 – Detalhes do Ensaio Balístico N°11. ....	89

## Lista de figuras

Figura 2.1 – Fotografia de um projétil com a representação das perturbações envolventes: 1) força de compressão sobre a ponta do projétil; 2) componente de fricção do ar sobre as superfícies laterais do projétil; 3) força de sucção na retaguarda do projétil (Pinto,2009). .....	6
Figura 2.2 – Munição de armas ligeiras (Pereira, 2010). .....	7
Figura 2.3 – Projétil em corte transversal, com as três zonas distintas (Monteiro, 2007). .....	7
Figura 2.4 – Diferentes geometrias de projéteis (Monteiro, 2007). .....	8
Figura 2.5 – Colete balístico. ....	11
Figura 2.6 – Fibras flexíveis de aramida. ....	11
Figura 2.7 – Exemplo de placas táticas. ....	12
Figura 2.8 – Exemplo de instalação de ensaios para elementos de proteção balística. Fonte: AEP 2920. ....	14
Figura 2.9 – Painéis produzidos de proteção balística. ....	16
Figura 2.10 – Painéis após os testes. ....	16
Figura 2.11 – Capacetes de proteção balística. (Esq. - Núcleo em Kevlar, Dir. - Capacete finalizado). ....	17
Figura 2.12 – Simulação efetuada com um quarto da geometria do modelo (Burger, 2012). ....	18
Figura 2.13 – Exemplo de diferentes materiais utilizados na simulação tanto para o alvo como para o projétil. (Wen et al., 2014) .....	18
Figura 4.1 – Dispositivo utilizado por Ajax para medição da velocidade do projétil. ....	30
Figura 4.2 – Compósito laminado (Ferreira, 2006). ....	33
Figura 4.3 – Homogeneização de uma lâmina (Ferreira, 2006). ....	33
Figura 4.4 – Sistema de coordenadas da lâmina (Ferreira, 2006). ....	33
Figura 4.5 – Teste de arrancamento da fibra. ....	35
Figura 4.6 – Mecanismos de rotura (Justo,1996) .....	36
Figura 4.7 – Corte das fibras: a) Corte da fibra de Kevlar; b) Corte da fibra de carbono; c) Corte da fibra de vidro .....	37
Figura 4.8 – a) Colocação das camadas de carbono e resina; b) Colocação das camadas de Kevlar, fibra de vidro e resina. ....	38
Figura 4.9 – Fase final da produção: a) Aplicação do peelply; b) Colocação do saco e da mangueira para a realização do vácuo; c) Bomba de vácuo. ....	39
Figura 4.10 – Colocação de peso no painel para aumentar a compressão. ....	39
Figura 4.11 – Equipamentos utilizados: a) SEM; b) Micrómetro Lorentzen & Wettre. ....	40
Figura 5.1 – Requisitos dos ensaios balísticos. ....	43
Figura 5.2 – Abrigo de proteção. ....	44
Figura 5.3 – Suporte de fixação dos painéis. ....	45
Figura 5.4 – Adaptador metálico para fixação dos painéis. ....	45
Figura 5.5 – Danos provocados pelo projétil. ....	47
Figura 5.6 – Danos provocados pelo projétil. ....	48
Figura 5.7 – Danos provocados pelo projétil. ....	48

Figura 5.8 – Danos provocados pelo projétil no painel 0401. ....	49
Figura 5.9 – Danos provocados pelos projéteis no painel 0601. ....	50
Figura 5.10 – Danos provocados pelo projétil.....	50
Figura 5.11 – Danos provocados pelo projétil.....	51
Figura 5.12 – Danos provocados pelo projétil.....	52
Figura 5.13 – Danos provocados pelo projétil nos painéis 0302, 0901 e 1001. ....	54
Figura 6.1 – Discretização de um domínio de elementos finitos ( <i>Teixeira-Dias et al</i> , 2010). ....	58
Figura 6.2 – Plataforma gráfica interativa do Abaqus. ....	59
Figura C.1 – Preparação das armas: a) Espingarda automática G3, b) Pistola Walther, c) Reparo para a Espingarda Automática G3. ....	81
Figura C.2 – Preparação equipamento proteção e dos materiais.....	81



## Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

CICECO	Aveiro Institute of Materials
CINAMIL	Centro de Investigação da Academia Militar
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
IST	Instituto Superior Técnico
EOS	Equação de Estado
MEF	Método dos Elementos Finitos
$A$	Tensão Limite de Elasticidade
$A_{\Gamma}$	Parâmetro de Gruneisen
$B$	Constante do Material
$B_{\Gamma}$	Parâmetro de Gruneisen
$C$	Constante do Material
$C^d$	Matriz de elasticidade danificada
$d_f$	Variável de dano nas fibras
$d_m$	Variável de dano na matriz
$e_h$	Energia de Hugoniot
$e_{ref}$	Energia de Referência
$\varepsilon^{pl}$	Extensão Plástica Equivalente
$\varepsilon_f^{pl}$	Extensão Plástica Equivalente à Fratura
$F_f^c$	Dano na Fibra/Compressão
$F_f^t$	Dano na Fibra/Tração
$F_m^c$	Dano Matriz/Compressão
$F_m^t$	Dano Matriz/Tração
$G$	Módulo de Corte

$G^c$	Energia de Dissipação
$M$	Operador de Dano
$P$	Pressão
$p_h$	Pressão de Hugoniot
$S^L$	Limite de resistência ao corte longitudinal
$S^T$	Limite de resistência ao corte transversal
$T$	Temperatura
$U_p$	Velocidade das Partículas
$U_s$	Velocidade do Choque
$V$	Volume
$X^c$	Limite de resistência longitudinal de compressão
$X^T$	Limite de resistência longitudinal de tração
$Y^c$	Limite de resistência longitudinal de compressão
$Y^T$	Limite de resistência transversal de tração
$W$	Parâmetro de Dano
$\rho$	Pressão
$\Gamma$	Parâmetro de Dano

# 1 Introdução

A utilização de blindagens é de extrema importância no atual cenário de guerra moderno, assim como no cenário de guerrilha urbana. Em contexto operacional, a proteção do soldado é fundamental para permitir a sua integridade física de modo a continuar as suas funções, sendo de grande importância compreender o nível de proteção balística sob as diferentes ameaças a que este se encontra sujeito.

Com este trabalho pretende-se dar os primeiros passos na contribuição para a produção de equipamentos de segurança nas indústrias ligadas à Defesa, com a finalidade de num futuro próximo substituir a condição de Portugal como mero comprador de equipamento militar para a de participante em projetos tecnológicos de desenvolvimento e teste de novos materiais de proteção.

Este trabalho tem um carácter exploratório no teste dos materiais em situações de tiro real, como também na realização da modelação e simulação numérica dos mesmos, com o objetivo de adquirir capacidades que permitirão as bases para trabalhos promissores no futuro a nível dos procedimentos e equipamentos a nível experimental e computacional.

Este trabalho enquadra-se numa cooperação tecnológica e científica entre o CINAMIL (Academia Militar), o INEGI (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto), o CICECO (Universidade de Aveiro) e o Instituto Superior Técnico, no âmbito da avaliação do comportamento de materiais compósitos e metálicos submetidos a impactos balísticos, em particular a verificação se estes materiais são perfurados ou não pelas ameaças selecionadas em situação de tiro real e através da modelação e simulação numérica.

O presente trabalho tem como grande objetivo a construção e teste de painéis balísticos. Dentro deste objetivo, são definidos os seguintes objetivos específicos: (i) Fabrico dos painéis balísticos em materiais compósitos de acordo com a literatura; (ii) Desenvolvimento e implementação de um procedimento experimental para teste dos materiais em situação de fogo real; (iii) Avaliação qualitativa do comportamento dos materiais (perfura, não perfura); (iv) Modelação e simulação computacional dos materiais; (v) Comparação dos resultados computacionais com os experimentais.

A presente tese de mestrado está estruturada em sete capítulos. No capítulo introdutório são apresentados os objectivos do trabalho, assim como o seu enquadramento e a estrutura da tese. No Estado da Arte é realizada uma breve introdução histórica das blindagens balísticas, a exposição dos mais recentes elementos balísticos e dos mais recentes modelos de análise de blindagens, medida em que tal informação está disponível publicamente. O capítulo de Conceitos Associados à Análise do Impacto apresenta os fenómenos fundamentais que são a base para todo o trabalho efetuado no campo da dinâmica de impacto, nomeadamente na propagação das ondas de choque, na modelação balística e simulação numérica. Será ainda realizada uma classificação das velocidades de impacto e uma explicação dos modos de rotura;

O capítulo de Características dos Materiais apresenta as técnicas experimentais de caracterização do impacto de alta velocidade, bem como das formas de obtenção das propriedades mecânicas em regime dinâmico. Descrição dos materiais compósitos, exposição das suas vantagens, os seus constituintes, a sua resposta ao dano e os respetivos mecanismos de falha. No final deste capítulo será ainda apresentada a justificação da escolha destes materiais, a explicação do processo de produção dos materiais compósitos e ainda a identificação da estrutura e materiais do projétil de 9mm da pistola Walther. O capítulo de Ensaio Balísticos apresenta os procedimentos efetuados para realizar os ensaios balísticos, desde o plano de ensaios proposto antes de se efetuar o tiro, os requisitos que o painéis devem apresentar, as medidas de segurança adotadas, a preparação das infraestruturas e finalmente os resultados dos ensaios realizados. No capítulo de Simulação Numérica são apresentados os resultados da modelação numérica dos elementos balísticos. Por último, foram discutidos os resultados das simulações à luz das observações experimentais. Pelo carácter pioneiro da investigação importa ainda deixar as conclusões e perspetivas para trabalhos futuros neste domínio de forte interesse para a Academia Militar.

## 2 Estado da Arte

O presente capítulo tem como finalidade apresentar uma breve introdução histórica das blindagens balísticas, a exposição dos elementos balísticos e os modelos de análise de blindagens.

Nos elementos balísticos será realizada uma explicação das munições ligeiras, dos equipamentos de proteção individual: coletes e capacetes, e ainda o modo de avaliação dos elementos da proteção balística segundo as normas.

Dentro dos modelos de análise de blindagens será feita uma maior incidência nos modelos numéricos e experimentais, uma vez que são estes dois tipos que serão alvo de estudo neste trabalho.

### 2.1 Introdução Histórica das Blindagens

Na presença de ambientes hostis, o Homem teve sempre a preocupação de proteger a sua integridade física, recorrendo aos materiais disponíveis. Esses materiais incluíam, em tempos antigos, pele de animais, madeira, fibras naturais, aço e bronze. Ao longo da história o Homem teve que evoluir nos mecanismos e materiais de proteção à medida que o armamento também sofria a sua evolução.

Segundo (Segrelles, 1979) após o desenvolvimento do arco e da flecha que o Homem alterou o seu conceito de luta, obrigando-o a criar outros equipamentos de defesa individual, nascendo assim o escudo e a armadura. Inicialmente em couro ou fibras vegetais, materiais suficientemente resistentes para o reduzido poder de penetração das armas de arremesso da época, século 3000 a.C.

No século 2000 a.C., tanto o escudo como a armadura passaram a ser feitos de bronze, este só seria ultrapassado pelo ferro por volta de 1300 a.C. e, posteriormente, quando descoberta a metalurgia do aço, obrigando o Homem a uma profunda alteração do armamento utilizado até então. Com o aparecimento das primeiras armas de fogo no século XIV as armas defensivas tornaram-se obsoletas, não conseguiam acompanhar a evolução das armas ofensivas.

O aumento das feridas na cabeça, devido à introdução da guerra com trincheiras levou ao desenvolvimento de proteções específicas: o capacete. O exército francês desenvolveu um capacete em aço que foi introduzido em serviço em Setembro de 1915, tendo sido seguido pelo exército britânico que introduziu o modelo Mark I em Novembro do mesmo ano. O exército alemão introduziu também nesta altura um modelo que oferecia melhor proteção ao soldado, mas era, também, mais pesado do que o modelo francês e o britânico.

Durante a 2ª Guerra Mundial foi utilizada uma solução que recorria a aço para a proteção do abdómen, peito e costas. Este tipo de proteção não teve grande aceitação pelo exército devido ao seu peso ter sido considerado excessivo.

Na década de 1960 a empresa DuPont desenvolveu uma fibra para-aramídica com a designação comercial de Kevlar®. As propriedades desta fibra levaram a que passasse a ser utilizada como material de proteção balística, com um desempenho superior ao do Nylon® (Justo, 2005).

Os requisitos para os equipamentos de proteção são dependentes das aplicações do sistema a ser protegido e das ameaças espectáveis. Os fatores mais importantes são a capacidade de proteção, o custo e o peso. Este último não é um fator crítico no caso de paredes defensivas ou *bunkers*. Logo, os materiais de baixo custo podem ser utilizados aumentando a resistência com espessuras maiores.

No entanto, no caso de alvos em movimento, o peso tem uma grande influência. Como por exemplo nos veículos terrestres, ao utilizar-se sistemas de proteção balística leves não existe tanto desgaste no motor e a eficiência do veículo é maior. Nos aviões, o peso de cada parte é fundamental e deve ser tido em conta. Nas proteções pessoais onde a mobilidade é essencial, o fator peso é extremamente importante e devem ser utilizados materiais mais leves (Mansur, 2011).

O atual desenvolvimento técnico/científico em torno das proteções balísticas tem procurado confrontar o constante aperfeiçoamento dos projéteis e do seu poder de penetração. Sendo as blindagens muitas vezes desenvolvidas para fins específicos de forma a aumentar o desempenho na proteção de pessoas e equipamentos. Para cumprir esse objetivo é muitas vezes necessário recorrer a soluções inovadoras, tanto em termos dos materiais e da respetiva qualidade/quantidade utilizada no seu fabrico, como ao nível do formato da própria blindagem (Pinto, 2009).

As proteções balísticas passaram a incorporar diversos tipos de materiais em que cada um desempenha uma função específica dentro do conjunto. Os novos tipos de proteção são constituídos por materiais compósitos devido a estes possuírem elevada resistência e/ou rigidez em relação ao seu peso, e uma boa tolerância aos danos (Nayak *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2014).

As fibras mais utilizadas para proteção balística são as aramídicas e as polietilénicas de muito alto peso molecular que podem ser combinadas com uma grande diversidade de resinas. Até à data as proteções compostas apenas por materiais compósitos poliméricos demonstraram ser ineficientes contra projéteis perfurantes. Para este tipo de projéteis é necessário adicionar à proteção uma placa cerâmica, sendo os materiais mais aplicados à base de alumina, carboneto de silício e de boro. O elemento cerâmico devido à sua elevada dureza quebra a ponta/núcleo do projétil, minimizando o seu poder de penetração, enquanto o elemento compósito polimérico mantém a cerâmica em compressão e captura os fragmentos (Bürger *et al.*, 2012; Tasdermici *et al.*, 2012).

Nas últimas décadas, o desenvolvimento nas ciências dos materiais permitiu que as blindagens de proteção individual fossem utilizadas com maior regularidade, desde capacetes e escudos a coletes anti-bala. Embora só o capacete seja utilizado de forma generalizada nos exércitos atuais, tanto os escudos como os coletes anti-bala são sujeitos a estudos intensivos, como forma de constituir o equipamento básico do “soldado do futuro”. A tecnologia encontra-se em permanente evolução, para cada novo desenvolvimento ofensivo corresponderá uma nova solução defensiva (Monteiro, 2007).

## **2.2 Elementos Balísticos**

Os elementos balísticos são as munições e os elementos de proteção balística. A evolução das blindagens está em grande parte associada à evolução do armamento. O desenvolvimento verificado nas ciências dos materiais nas últimas décadas, possibilitou um progresso por parte das blindagens proporcional ao armamento. Os novos materiais que surgiram permitiram conferir a proteção balística adequada, aliando uma redução significativa de peso, conferindo ao utilizador um bem-estar necessário para o desempenho da sua missão. Para analisar a evolução e as novas tendências das estruturas de

painéis de proteção balística foram analisadas algumas patentes, trabalhos de investigação e alguns produtos existentes no mercado<sup>1</sup>.

Uma futura aplicação dos painéis balísticos que começaram a ser estudados e desenvolvidos neste trabalho destinam-se a proteção balística individual, como proteções deste tipo destacam-se essencialmente os coletes balísticos e os capacetes.

Para melhor compreensão dos elementos balísticos, irá ser feita uma descrição das munições de armas ligeiras, dos sistemas de proteção balística individual referidos anteriormente e ainda dos ensaios realizados para a avaliação dos elementos de proteção balística.

No entanto antes de se realizar essa descrição, é importante referir a ciência, Balística, que se ocupa do estudo destes fenómenos, bem como as diferentes categorias em que se divide.

### **Balística**

A balística é a ciência que estuda as forças atuantes sobre os projéteis bem como os correspondentes movimentos, nos vários meios de interesse, desde a sua posição inicial dentro das armas até à sua penetração dos alvos que é suposto atingirem. O campo da balística pode ser classificado em três grandes categorias: a balística interna, a balística externa e a balística terminal. Em alguns casos uma quarta categoria designada de balística intermédia também é considerada (Carlucci e Jacobson, 2010).

#### **Balística Interna**

A balística interna estuda exclusivamente o movimento do projétil no interior do cano (armas de fogo), sob a ação dos gases provenientes da deflagração da carga propulsora, ou seja, estuda os fenómenos que ocorrem desde o momento que a munição se encontra em repouso, até ao momento que o projétil abandona a boca do cano, isto é, todo o percurso pela alma do cano<sup>2</sup>.

#### **Balística Intermédia**

A balística intermédia estuda os fenómenos que acontecem nos projéteis desde que saem do cano da arma até ao momento em que deixam de estar influenciados pelos gases remanescentes à boca da arma.

#### **Balística Externa**

A balística externa estuda as forças que atuam sobre os projéteis e correspondentes movimentos durante a sua trajetória na atmosfera, desde que ficaram livres das influências dos gases, até aos presumíveis impactos nos alvos. As duas principais forças que atuam sobre os projéteis durante o seu deslocamento na atmosfera são:

- A força da gravidade ou atracão terrestre;

---

<sup>1</sup> Ver Apêndice A

<sup>2</sup>Alma do cano – parte interior do cano de uma arma de projeção de fogo, de forma cilíndrica e diâmetro constante, no qual estão abertas as estrias.

- A resistência do ar aos seus movimentos.

Apesar da atração terrestre ser bastante importante, a força determinante é a resistência do ar, que tem três componentes: a força de sucção provocada pelo vácuo na base do projétil; uma componente de compressão sobre a ponta do projétil, devida a uma compressão do ar naquela zona; uma componente de fricção do ar sobre as superfícies e protuberâncias laterais do projétil. Para velocidades subsônicas do projétil a componente de resistência mais importante é a de sucção, enquanto para velocidades supersônicas a resistência por compressão é a mais importante (Pinto, 2009).

Na figura 2.1 estão representadas as três componentes da força provocada pela resistência do ar

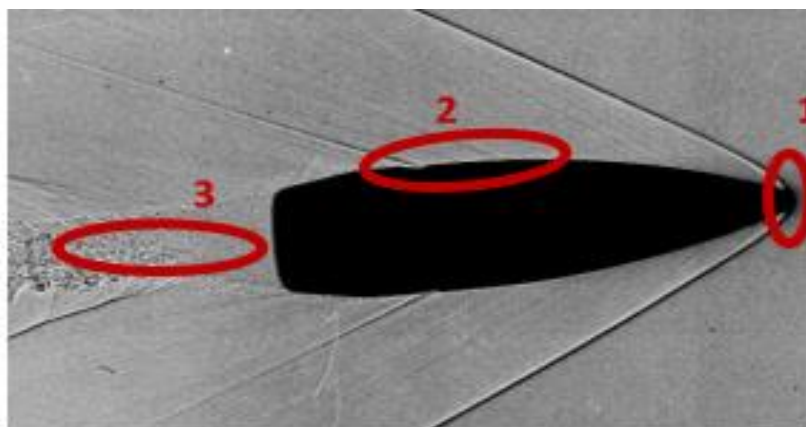


Figura 2.1 – Fotografia de um projétil com a representação das perturbações envolvidas: 1) força de compressão sobre a ponta do projétil; 2) componente de fricção do ar sobre as superfícies laterais do projétil; 3) força de sucção na retaguarda do projétil (Pinto,2009).

### 2.2.1 Munições de Armas Ligeiras

Após o início dos anos 60, Portugal deixou de acompanhar o ritmo do armamento ligeiro dos parceiros da NATO. Enquanto Portugal se empenhava nas guerras de África (1961-1974), os outros parceiros da NATO transitam para um armamento ligeiro diferente, marcado principalmente pela adoção da munição 5.56 x 45 mm NATO para espingardas de assalto e metralhadoras (permitindo obter armas mais leves e compactas) e mantendo a munição 9mm *parabellum* para pistolas (Telo e Álvares, 2004). O Exército Português, nos últimos anos tem vindo a preparar uma reestruturação do armamento nacional, com vista a uma convergência de doutrinas comparativamente aos parceiros NATO. A munição das armas ligeiras consiste no conjunto do projétil e dos meios destinados a provocar a sua propulsão, que se compõem em quatro partes fundamentais:

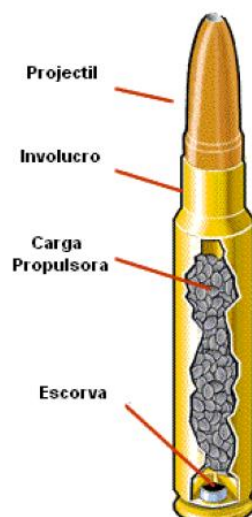


Figura 2.2 – Munição de armas ligeiras (Pereira, 2010).

### Projétil ou bala

O projétil corresponde ao componente essencial da munição com a função de provocar os efeitos desejados no objetivo, sendo a única parte da munição que passa pelo cano da arma e atinge o alvo. Geralmente, o material do projétil deve apresentar algumas características fundamentais: densidade elevada, para facilmente adquirir uma energia elevada, ser infusível, para não se fundir com o atrito na alma do cano e ser deformável, de acordo com o seu destino, vulnerante<sup>3</sup> ou derrubante<sup>4</sup>.

Em relação à composição química, o projétil divide-se principalmente em três regiões (Figura 2.3): coifa, apenas nas munições perfurantes, em chumbo para auxiliar a penetração do núcleo, camisa, suficientemente espessa para evitar a fusão do núcleo e pouco dura para não deteriorar as estrias da arma e pelo núcleo, que pode ser de chumbo, de bronze, ou de aço, no entanto por motivos de preço e peso opta-se pelo primeiro que na maioria das vezes é endurecido sendo ligado com estanho ou antimónio.

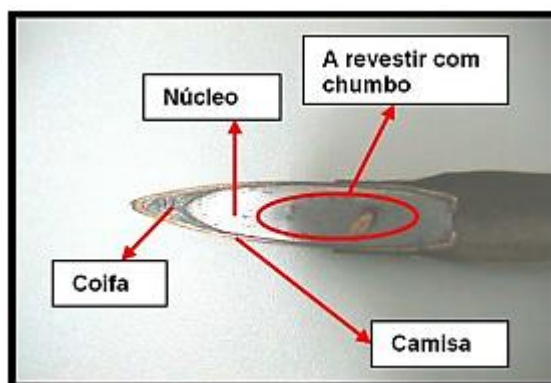


Figura 2.3 – Projétil em corte transversal, com as três zonas distintas (Monteiro, 2007).

<sup>3</sup> Poder vulnerante (que vulnera, fere): capacidade de um projétil para trespassar um corpo aquando do impacto. Quanto maior for a penetração tanto maior será o poder vulnerante.

<sup>4</sup> Poder Derrubante: o poder derrubante de uma munição é o grau da capacidade que um projétil tem para neutralizar um atacante apesar de não o atingir num órgão vital.

Relativamente à geometria dos projéteis, estes dividem-se em três partes: a ponta, a parte superior do projétil que fica fora do invólucro, o corpo, cilíndrico e geralmente com um serrilhado destinado a aumentar a fixação do projétil ao invólucro e a base, parte inferior do projétil que fica no interior do invólucro e está sujeita à ação dos gases resultantes da combustão da pólvora.

Quanto à sua forma estes podem ser geralmente, pontiagudos, cilindros ogivais e bi-ogivais (Figura 2.4), embora ultimamente tenham surgido diversas novas formas com finalidades distintas.



Figura 2.4 – Diferentes geometrias de projéteis (Monteiro, 2007).

Quanto ao peso, nos projéteis de armas ligeiras, adota-se apenas pesos entre 9 e 13 g, de modo a se conseguir trajetórias aceitáveis a todas as distâncias. Um projétil demasiadamente leve terá uma trajetória muito tensa às pequenas distâncias, enquanto um projétil pesado tê-la às grandes, pois mantendo todas as outras condições, o projétil mais leve tem maior velocidade inicial mas sofre um retardamento maior.

### **Invólucro, caixa ou estojo**

O invólucro é constituído por uma só peça que se obtém por sucessivas estiragens e recozimentos a partir de uma copela de latão (metal não-ferroso) e tem como função unir mecanicamente os restantes componentes da munição. O material do invólucro deve obedecer às seguintes características: ser maleável para que se adapte às paredes da câmara; ser resistente para que não rebente aquando a ação dos gases provocados pela explosão da pólvora; ser elástico para voltar a ter as suas dimensões iniciais de forma a facilitar a extração; e por fim, ser inoxidável para facilitar a sua conservação.

O invólucro é a parte posterior da munição, em que no seu interior está a carga propulsora, no seu extremo anterior está o projétil e no seu extremo posterior a escorva. Atualmente distinguem-se quatro partes do invólucro, nomeadamente: o colo, a concordância, o corpo e a base. O colo destina-se a segurar o projétil, ou seja, é a parte anterior do invólucro. A concordância é a parte que liga o colo ao corpo do invólucro. O corpo apresenta uma forma tronco-cónica para facilitar a sua introdução e extração na câmara, este é reforçado na base, onde é mais resistente e mais largo. A base serve de suporte para a realização da extração do invólucro da câmara e no seu centro encontra-se alojada a escorva (Telo e Álvares, 2004).

### **Carga Propulsora**

A carga propulsora (no caso das munições de armas ligeiras) não é mais do que “...uma substância explosiva constituída por pólvora química em grão”. (Telo e Alvares, 2004, p 234).

Anteriormente utilizava-se apenas a pólvora negra, no entanto quando se sentiu a necessidade de aumentar a velocidade inicial e diminuir o calibre do projétil, foi necessário recorrer a outro tipo de substância explosiva, uma vez que esta produzia pressões demasiado elevadas e um recuo igualmente elevado. Atualmente são usadas vários tipos de pólvora química de combustão progressiva que produzem uma geração contínua de gases até que o projétil saia à boca do cano.

As pólvoras usadas como carga propulsora devem respeitar um vasto conjunto de condições, entre elas estão: ter um poder corrosivo fraco; produzir pressões similares capazes de imprimir velocidades regulares nos projéteis quando deflagram; ser de fácil obtenção, ter grande potência balística; ter uma boa capacidade de conservação de modo a manter-se operacional em condições adversas; serem seguras no seu emprego, quer no seu transporte (Santos, 2010).

### **Escorva, Cápsula ou Fulminante**

A escorva, cápsula ou fulminante “é uma pequena cápsula cheia de um composto químico altamente explosivo que pode ser deflagrado por uma pequena pancada” (Hartink,2002, p.46).

Apesar de altamente explosivo, o composto químico da escorva tem de ser bastante resistente, para que não se altere com o tempo e a sua “embalagem” tem de ser de um material suficientemente mole para permitir que se deforme com o embate do percutor, mas ao mesmo tempo, resistente o suficiente para não ser perfurada pelo mesmo. Este através de um ou mais canais, vai inflamar a carga propulsora contida no invólucro originando assim o disparo (Macieira, 2008).

## **2.2.2 Elementos de Proteção Balística**

Antes de abordar os elementos de proteção balística e as suas composições, é necessário ter a noção de que existem normas e orientações que regulam os níveis de proteção balística dos mesmos, definindo a correspondente capacidade de resistência balística:

**Normas** – cujo seguimento é obrigatório e as suas indicações têm que ser respeitadas durante a realização dos ensaios aos equipamentos de proteção balística.

**Orientações** – que não estão vinculadas a nenhuma legislação, consistem em instruções de ensaio que são estabelecidas por instruções públicas ou privadas. Embora não sejam obrigatórias, devem ser tidas em consideração na realização de testes balísticos (Kneubuehl, 2003).

No que concerne à capacidade de resistência balística, seguir-se-á a *Standardization Agreement* (STANAG) 4569 *Protection Levels for Occupants of Logistic and Light Armoured Vehicles*. A STANAG 4569 indica os procedimentos e testes balísticos aplicados a vários sistemas-alvo e utiliza nos seus ensaios ameaças de maior calibre, sendo que a maior ameaça é correspondente ao nível VI. Para o presente trabalho, no entanto, considera-se a maior ameaça correspondente ao nível III. Na tabela seguinte encontram-se sintetizados os principais parâmetros envolvidos nos ensaios estabelecidos pela presente STANAG.

Tabela 2.1 – Níveis de proteção balística STANAG 4569.

Nível	Ameaça	Projétil	Distância (m)	Velocidade (m/s) [Tolerância de ±20m/s]
I	Espingarda	7.62 x 51 NATO Ball (Ball M80)	30	833 (M80)
		5.56 x 45 NATO SS109		900 (SS109)
		5.56 x 45 M193		937 (M193)
II	Espingarda	7.62 x 39 API BZ	30	695
III	Espingarda	7.62 x 51 AP (WC core)	30	930 (51 AP)
		7.62 x 54R B32 API (Dragunov)		854 (54R)
IV	Metralhadora pesada	14.5 x 114AP / B32	200	911
V	Canhão automático	25mm APDS-TM-791 ou TLB 073	500	1258
VI	Canhão automático	30 mm : APFSDS ou AP	500	1430

Apesar da diversidade de armas de fogo e da respetiva munição, o potencial de ameaça é circunscrito à energia do projétil e portanto pela sua massa e velocidade. As características dos projéteis tipicamente utilizados em testes balísticos encontram-se sumariados na tabela 2.2 (Kneubuehl, 2003).

Tabela 2.2 – Características típicas dos projéteis utilizados em testes balísticos.

Tipo de arma	Calibre	Peso do projétil (g)	Velocidade do teste (m/s)	Energia (J)	Densidade de energia (J/mm <sup>2</sup> )
Armas curtas	9mm Luger	8,0	410	670	10,5
	357 Magnum	10,2	430	940	14,8
	44 Rem. Mag.	15,5	440	1500	15,2
Armas longas	5,56 mm NATO	4,0	935	1750	72,8
Forças armadas	7,62 mm NATO	9,5	830	3270	71,8
	7,5 mm GP 11	11,3	780	3440	76,8
Armas longas	7mm Rem. Magnum	10,5	960	4840	125,7
Caça	8 x 68S	12,7	920	5375	106,9
Espingardas	12/70	31,4	425	2860	10,6

As grandezas determinantes para a caracterização dos níveis de proteção balística são a energia (equação 2.1) e a densidade de energia (equação 2.2) dos projéteis, sendo determinadas em função da massa e velocidade dos mesmos (Carlucci e Jacobson, 2010).

$$Energia\ cinética\ do\ projétil = \frac{1}{2} \text{ massa do projétil} \times \text{velocidade}^2 \quad (2.1)$$

$$Densidade\ de\ energia\ cinética = \frac{\text{energia cinética}}{\text{área do projétil}} = \frac{\text{massa do projétil} \times \text{velocidade}^2}{2 \times \text{área do projétil}} \quad (2.2)$$

### 2.2.3 Coletes Balísticos

Os coletes balísticos destinam-se a proteger as pessoas de impactos provenientes do exterior com elevada energia cinética. Apesar do seu emprego não garantir 100% de segurança, o colete balístico garante uma redução significativa da probabilidade do seu portador ser fatalmente ferido ou sofrer danos nos órgãos internos, podendo no entanto deixá-lo temporariamente incapacitado de reagir às ameaças. Desta forma, para que o seu portador esteja sempre resguardado do perigo, o nível de proteção do colete deve ser compatível com o calibre e com o risco ao qual está exposto (Monteiro, 2007).

Além da segurança, outra característica que se deve destacar nos coletes balísticos é a sua forma confortável. Constituídos por tecidos exteriores de Nylon® e um sistema de velcro nas costas, possibilitando assim um ajuste adequado e máxima mobilidade, pouco peso e possibilidade de adicionar placas táticas nas aberturas frontais laterais e traseiras como proteção adicional.



Figura 2.5 – Colete balístico.

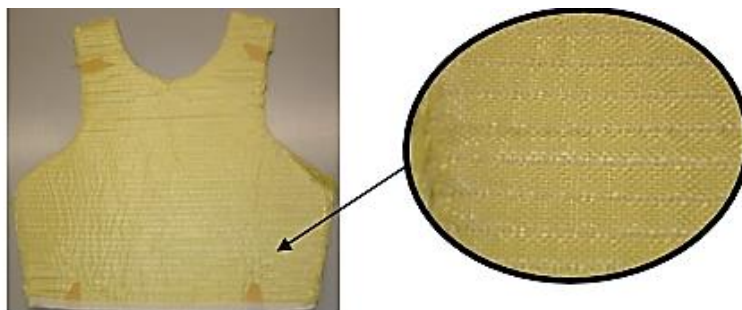


Figura 2.6 – Fibras flexíveis de aramida.

Como material base dos coletes são usadas atualmente modernas fibras balísticas, aramidas, que proporcionam um alto grau de resistência, além de flexibilidade e conforto. A aramida é constituída por um composto formado por fibras leves e de alta resistência, às quais se agregam resinas especiais. Como resultado, obtêm-se placas estruturadas com características morfológicas distintas, perfeitamente ajustáveis aos locais a serem protegidos, bastante resistentes, leves e semi-rígidas, que não perdem as suas propriedades balísticas em função do tempo ou agentes externos tais como a humidade. O tecido aramida mais conhecido e utilizado é o Kevlar® que consiste numa fibra poliamida (da mesma família do Nylon®) com carbonos em anéis aromáticos, daí receber o nome de aramida (*aromatic amid*). Desta forma, são conferidas à molécula grande rigidez e resistência mecânica. As fibras cruzadas são o resultado da junção de biliões destas moléculas que têm fortíssima interação entre si, reforçando ainda mais estas propriedades. O Kevlar® possui ainda grande resistência ao calor.

Podem ainda ser empregues polímeros alifáticos, como por exemplo o Spectra® (polietileno de altíssimo peso molecular, isto é, formado por cadeias não aromáticas muito longas), contendo só carbono na cadeia. O comprimento da cadeia e o conseqüente grau de combinação molecular são responsáveis pelas propriedades mecânicas. Devido à ausência de interações fortes, funde a temperaturas mais baixas, sendo sensível por exemplo, ao lança-chamas. Em compensação possui boas propriedades de ductilidade, sendo por isso usado em aplicações que exigem elevada resistência ao impacto (Monteiro, 2007).

## Placas Blindadas

As placas táticas (Figura 2.7) consistem numa proteção blindada extra, constituída por materiais duros que por vezes são unidas entre si. As etapas básicas para a correta preparação dos revestimentos blindados e respetiva montagem nos coletes recorrem a uniões com adesivos que garantem a não corrosão da aramida e de alta resistência, pois aguentam os impactos balísticos sem se deslocarem, impedindo a projeção de metais. Quanto aos materiais utilizados, estes variam desde tecidos de aramida cozidos e polietileno de elevada densidade a configurações de esmalte (exigência do Exército Português), cerâmicos e aço.



Figura 2.7 – Exemplo de placas táticas.

Como referido anteriormente, os elementos de proteção balística seguem normas que regulam os níveis de proteção balística. No caso dos coletes balísticos, estes são desenvolvidos segundo normas e especificações que asseguram a performance e a resistência balística desejadas. Os coletes balísticos seguem a norma do *National Institute of Justice* (NIJ) denominada de “*Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06*”, uma vez que esta norma é a mais utilizada pelos produtores de coletes balísticos. Nesta NIJ estão categorizadas as ameaças balísticas conforme o tipo do projétil, peso e velocidade (Tabela 2.3)

A utilização de fibras balísticas de aramida ou polietileno de muito alto peso molecular proporcionam um alto grau de resistência: Nível II – STANAG 4569; Nível III – NIJ. No entanto com a utilização de placas táticas o nível de proteção pode ser acrescido: Nível III – STANAG 4569; Nível IV – NIJ.

Tabela 2.3 – Níveis de proteção balística NIJ Standard-0101.06<sup>5</sup>

Nível	Projétil	Massa do Projétil (g)	Velocidade (m/s) [Tolerância de $\pm 9,1m/s$ ]
IIA	9 mm FMJ RN	8.0	355
IIA	.40 S&W FMJ	11.7	325
II	9 mm FMJ RN	8.0	379
II	.357 Magnum JSP	10.2	408
IIIA	.357 SIG FMJ FN	8.1	430
IIIA	.44 Magnum SJHP	15.6	408
III	7.62 mm NATO FMJ	9.6	847
IV	.30 Caliber M2 AP	10.8	878

AP - Armour Piercing; FMJ - Full Metal Jacket; FN - Flat Nose; JSP - Jacketed Soft Point; RN - Round Nose; SIG - Sig Sauer; SJHP - Semi Jacketed Hollow Point; S&W - Smith & Wesson;

## 2.2.4 Capacetes Balísticos

Os capacetes balísticos estão destinados a proteger o combatente contra lesões causadas por projéteis balísticos provenientes de armas de fogo, bem como de estilhaços, tipicamente até ao nível de proteção balística III (NIJ).

O material presente neste tipo de proteção balística pode ser: tecidos de Nylon®, metais, cerâmicos, mas atualmente o mais usual é este ser produzido em aramida pré-impregnada com resinas e enformado a quente. Devem possuir quatro furos destinados ao encaixe do suporte interno, feito em Nylon® resistente revestido por couro, com almofadas para amortecimento de impacto na região frontal, lateral, dorsal e topo fixados com velcro. O suporte, de modo a possibilitar um maior conforto, deve permitir uma fácil regulação (Pinto,2009).

## 2.2.5 Avaliação dos Elementos de Proteção Balística

A avaliação dos Elementos de Proteção Balística são executadas de acordo com as seguintes normas: *Allied Engineering Publication* (AEP) – 2920; STANAG 4569; NIJ Standard – 0101.06.

A AEP – 2920 descreve os procedimentos para a classificação das proteções balísticas ligeiras de ameaças como as munições e fragmentos. Nesta AEP estão explanados todos os procedimentos sobre testes balísticos e todos os procedimentos de avaliação dos mesmos, com vista a avaliar o nível de

<sup>5</sup> Nos níveis IIA, II,IIIA, IV os calibres do projétil encontram-se em polegadas.

proteção dos elementos de proteção balística. Para tal, a presente AEP define as classes dos projéteis e dos fragmentos.

Os procedimentos de ensaios balísticos, critérios e métodos de designação descritos na AEP referida aplicam-se a amostras de materiais e a elementos de proteção balística, como *hard armour* (proteção rígida), *soft armour* (proteção flexível), capacetes de proteção balística e a combinações entre *hard armour* e *soft armour*. No caso da avaliação de *hard armour* deve-se também definir a largura da zona de impacto, bem como o número de impactos por painel. Para um impacto ser considerado válido, deverá ainda ocorrer a uma distância superior a 30mm de qualquer apoio ou ponto de fixação, bordo, impacto prévio, deformação ou perturbação do material.

Os procedimentos de ensaios balísticos podem também ser utilizados para o desenvolvimento, qualificação e aquisição de novos equipamentos e materiais.

Para efeitos de classificação os alvos são divididos nas seguintes categorias:

- Soft armour;
- Hard armour;
- Hard armour (em conjunto com soft armour);
- Capacetes balísticos;
- Óculos de proteção;
- Proteção de cara.

### Instalação do Ensaio Para os Elementos de Proteção Balística

De acordo com a norma AEP 2920, a disposição da instalação de ensaios para os elementos de proteção balística deverá ser semelhante à figura 2.8. Deverá ser constituído por: uma arma (ou canhão balístico); sistema de deteção e medição de velocidades de projéteis; sistema de fixação dos painéis a ensaiar; placa testemunha; e pelo projétil.

A placa testemunha ou o material BFS (*Back Face Signature*) quando o ensaio executado é a *hard armour* (sozinho, ou seja, apenas o painel), deverá estar de forma que a distância entre o painel e o material BFS representem a sua utilização real.

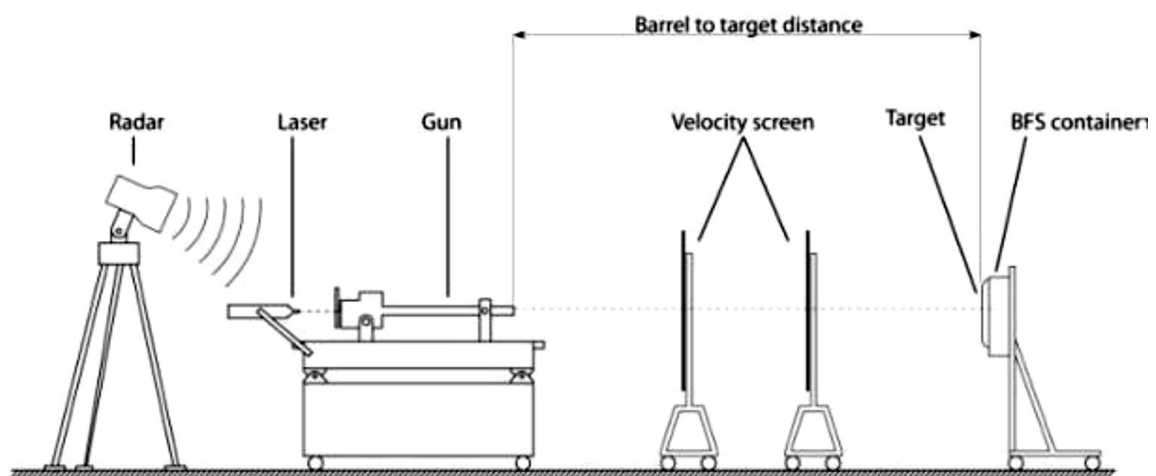


Figura 2.8 – Exemplo de instalação de ensaios para elementos de proteção balística. Fonte: AEP 2920.

### **Descrição e inspeção do alvo**

Antes de qualquer ensaio balístico, toda a instalação de ensaios deve ser inspecionada, bem como todos os painéis devem ser inspecionados visualmente para verificar se houve danos durante o transporte. Caso se observem danos, o ensaio a esse mesmo painel não deverá ser executado, devendo ser registado como danificado.

Todos os alvos deverão apresentar a seguinte informação:

- O número de série;
- A categoria do alvo;
- Tipo de munição a utilizar;
- Identificação da superfície de entrada e saída do alvo;

Durante os ensaios balísticos, todos os impactos devem ser individualmente marcados em cada alvo.

## **2.3 Modelos de Análise de Blindagens Balísticas**

Os modelos de análise mais utilizados têm sido classificados em três categorias (Justo, 1995):

**a) Empíricos** – modelos que resultam da correlação de um grande número de observações experimentais e, em geral, dirigidos aos casos específicos, não permitindo extrapolações.

**b) Aproximados analiticamente** – modelos que resultam da introdução de hipóteses simplificativas que permitem exprimir os fenómenos através de equações diferenciais ou, às vezes, integro-diferenciais ou integrais. Baseiam-se, frequentemente na escrita das condições de energia e momento. O método analítico, quando devidamente delimitado por hipóteses simplificativas, pode ser de grande uso na obtenção de informações fenomenológicas sobre os mecanismos de penetração, quando comparado aos outros métodos.

**c) Numéricos** – modelos a que se chega essencialmente por aplicação de técnicas de elementos finitos ou de diferenças finitas, e que permitem a solução das equações de equilíbrio do contínuo.

### **2.3.1 Testes Experimentais**

O INEGI já desenvolveu vários trabalhos no âmbito de proteções balísticas, desde o desenvolvimento de novos materiais até à avaliação do desempenho de painéis de proteção balística com diferentes camadas de materiais compósitos de matriz polimérica.

Como trabalho exploratório, o INEGI produziu 3 placas de proteção balística com superfícies em fibra de carbono e núcleo de Kevlar® e matriz de policarbonato.

Na tabela e nas figuras que se seguem encontram-se expostos alguns detalhes deste estudo.

Tabela 2.4 – Características dos painéis de proteção balística.

<b>Características</b>	<b>Placa 1</b>	<b>Placa 2</b>	<b>Placa 3</b>
<b>1ª Camada</b>	5x Carbono	7x Carbono	10x Carbono
<b>2ª Camada</b>	30x Kevlar	46x Kevlar	60x Kevlar
<b>3ª Camada</b>	5x Carbono	7x Carbono	10x Carbono
<b>Matriz</b>	21x Filme de Policarbonato	31x Filme de Policarbonato	41x Filme de Policarbonato
<b>Espessura (mm)</b>	9.3	13.5	19.0
<b>Dimensões (mm x mm)</b>	299 x 295	290 x 289	295 x 284
<b>Peso (Kg)</b>	1.066	1.509	2.068
<b>Peso por m<sup>2</sup> (Kg/m<sup>2</sup>)</b>	12.09	18.01	24.68

Estes painéis foram testados em ambiente não controlado, com uma espingarda automática G-3, calibre 7.62 mm utilizada pelo Exército Português.

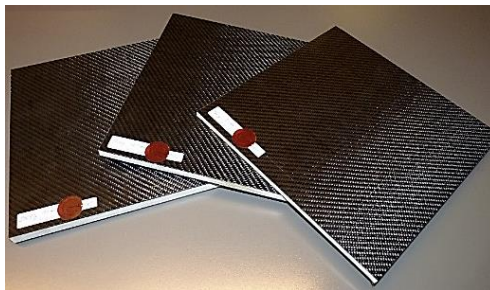


Figura 2.9 – Painéis produzidos de proteção balística.

Os testes foram realizados a 50 m e 100 m tendo-se obtido perfurações completas em todos os painéis. Por fim realizou-se um teste no qual todas as placas foram colocadas em série a 50 m e, obteve-se perfuração completa através de todos os painéis. Na Figura 2.10 pode-se observar a aparência dos painéis após os ensaios realizados.

a) Lado de entrada do projétil



b) Lado de saída do projétil

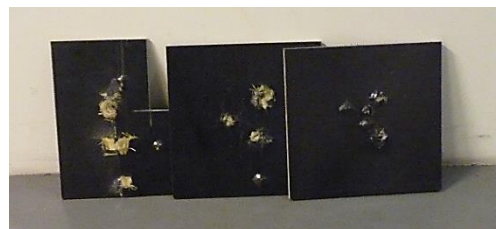


Figura 2.10 – Painéis após os testes.

Também como trabalho exploratório no âmbito da conformação de materiais de proteção balística, foram produzidos capacetes em fibra de vidro com núcleo de Kevlar®. Na figura 2.11 pode ver-se o núcleo do capacete (mais claro) e o capacete finalizado (preto).



Figura 2.11 – Capacetes de proteção balística. (Esq. - Núcleo em Kevlar, Dir. - Capacete finalizado).

### 2.3.2 Simulações Numéricas

As simulações numéricas são uma grande ferramenta a nível computacional que permitem prever os fenómenos físicos com maior precisão. No entanto é importante ter em conta que ao modelo virtual que descreve o fenómeno físico podem estar associados erros grosseiros de modelação, que conduzirão necessariamente a resultados numéricos, apesar de corretos para o modelo fornecido pelo utilizador, poderão estar desajustados do problema inicial que o utilizador se propunha resolver. Desta forma para além do completo conhecimento das características físicas e geométricas do problema real a resolver, o utilizador necessita de ter experiência e espírito crítico para perceber não só as potencialidades mas sobretudo as limitações do modelo que está a simular (Teixeira-Dias *et al.*, 2010).

A grande vantagem das simulações numéricas relativamente aos testes experimentais é que não acarretam o custo da produção dos materiais e o gasto de munições e equipamento na carreira de tiro.

No decorrer deste trabalho foram efetuadas pesquisas de simulações numéricas, do *software Abaqus* mas também de outros softwares. Muitas destas simulações eram muito complexas tanto pelo seu refinamento da malha, quer pelo número de materiais envolvidos tanto no projétil, tanto na quantidade e diversidade de camadas que o alvo apresentava. Para reduzir o tempo de simulação muitos autores decidiram restringir a simulação a um quarto da geometria do modelo, e incluir restrições de simetria como é possível verificar na figura 2.12. Por outro lado na figura 2.13 encontra-se o exemplo de uma simulação algo complexa onde se utilizou diferentes materiais tanto na munição como no alvo.

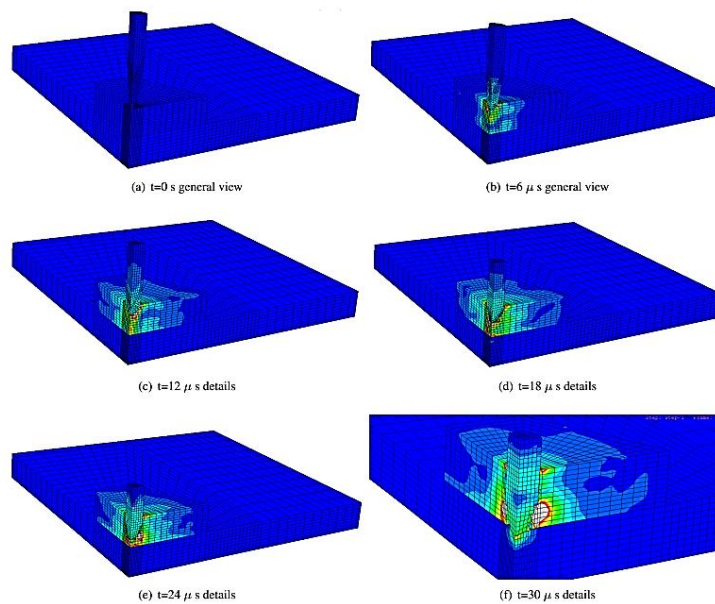


Figura 2.12 – Simulação efetuada com um quarto da geometria do modelo (Burger, 2012).

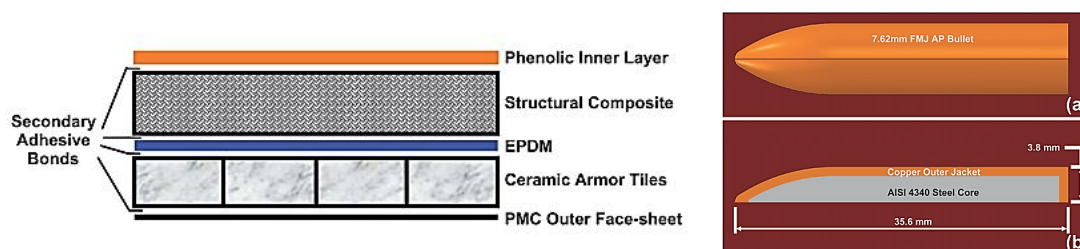


Figura 2.13 – Exemplo de diferentes materiais utilizados na simulação tanto para o alvo como para o projétil. (Wen et al., 2014)

Como já referido, existem muitos *softwares* de elementos finitos com as ferramentas e capacidades necessárias para realizarem simulações de impactos balísticos. Tendo em conta que o *software* utilizado nesta dissertação é o *Abaqus*, vai ser exposto alguns estudos realizados neste âmbito com o este *software*.

Em (A. Arias *et al.*, 2007) é efetuado um estudo numérico de perfuração de diferentes formas de projéteis em placas de aço de fina espessura. As simulações numéricas foram realizadas no *Abaqus-Explicit* com uma malha adaptável para a placa. Para a definição do comportamento dos materiais e a sua fratura foram utilizados os modelos de plasticidade e de fratura de Johnson-Cook para se prever o processo de perfuração de uma forma completa. Três tipos de forma de projéteis (pontiado, cónico e hemisférico) foram simulados com uma grande amplitude de velocidades desde 190 m/s a 600 m/s.

Em (A. H. Sheikh *et al.*, 2008) é explicado o comportamento de compósitos laminados simples e multicamada submetidos a impactos balísticos. Foi utilizada uma arma de ar comprimido para disparar os projéteis, que conseguem alcançar uma velocidade suficiente para perfurar painéis compósitos laminados em multicamada. As velocidades de impacto e residuais foram medidas para estimar a absorção de energia no processo de impacto. O *software Abaqus* foi utilizado para realizar as

simulações numéricas onde os projéteis foram modelados como corpos rígidos e os laminados foram modelados como elementos *shell*.

Em (Brenda L. Buitrago *et al.*, 2009) é investigado a perfuração de compósitos multicamada submetidos a impactos balísticos de alta velocidade. Os compósitos estudados eram constituídos por carbono/epóxi e alumínio como camada traseira. Estes materiais foram modelados no *software Abaqus* com elementos tridimensionais. O modelo foi validado com testes experimentais comparando a velocidade residual, o limite balístico e o tempo de contacto.

Em (Ireneusz Lapczyk e Juan A. Hurtado, 2007) é explicado a modelação do dano progressivo em materiais reforçados com fibras. Estes apresentaram um modelo de dano anisotrópico adequado para prever o comportamento à falha e pós-falha nestes materiais. O modelo destina-se a prever o comportamento de materiais elasto-plásticos que não apresentam deformação plástica significativa antes da fratura. Foram considerados e modelados separadamente quatro modos de falha: tensão e compressão das fibras, tensão e compressão da matriz.

Em (Sunil Kumar *et al.*, 2009) é estudado o efeito de impactos balísticos contra compósitos laminados utilizando simulações numéricas. Estas simulações foram realizadas com o objetivo de avaliar a resposta balística de placas de compósitos laminados constituídas por Kevlar®/epóxi, muito utilizado nos equipamentos de proteção pessoal. Estas placas foram submetidas a impactos com uma gama de velocidades entre os 100 e os 1000 m/s. Com a realização destas simulações estimou-se a velocidade do limite balístico do material, a energia absorvida pela placa, o tempo de contacto, o efeito do diâmetro e da massa do projétil.



### 3 Conceitos Associados à Análise de Impacto

Neste capítulo serão expostos os três princípios fundamentais que são a base para todo o trabalho efetuado no campo da dinâmica de impacto, nomeadamente na propagação das ondas de choque, na modelação balística e simulação numérica. Será ainda realizada uma classificação das velocidades de impacto, uma explicação das ondas de choque e dos modos de rotura.

#### 3.1 Princípios Fundamentais

Existem três princípios fundamentais que são a base dos fenómenos de impacto, são estes: a conservação da massa, a conservação do momento e a conservação da energia (Zukas,1982).

A conservação da massa estabelece que a massa não pode ser nem criada nem destruída. Pode ser expressa da seguinte forma:

$$\int_V \rho dV = const \quad (3.1)$$

Onde  $\rho$  é a densidade e  $V$  o volume do material.

A segunda lei da conservação afirma que a força resultante é igual à taxa de variação da quantidade de movimento.

A conservação do momento pode ser escrita de diversas formas. Considerando a massa constante, pode ser expressa pela segunda lei de Newton.

$$F = m \frac{dv}{dt} \quad (3.2)$$

Onde  $F$  é a força aplicada,  $m$  é a massa,  $v$  a velocidade e  $t$  o tempo que se realiza a aplicação da força. A conservação do momento para um sistema fechado de  $n$  massas,  $m_i$ , não sujeito a forças externas tem a seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^n m_i v_i = const \quad (3.3)$$

Uma outra forma útil é conhecida como a lei de impulso, esta pode ser obtida multiplicando  $dt$  em ambos os lados da equação 3.2 e fazer a integração:

$$Impulso = \int F dt = \int m dv = mv_f - mv_i \quad (3.4)$$

O impulso é aplicado pela força ao longo de um dado intervalo de tempo. Os valores de  $v_i$  e  $v_f$  correspondem à velocidade inicial e final, respetivamente. A quantidade de movimento de um objeto é alterada a partir de um valor inicial  $mv_i$  para um valor final  $mv_f$  quando um impulso é transmitido.

A conservação de energia afirma que a quantidade total de energia é conservada, embora possa haver alteração de formas. Pode ser escrita para um conjunto de massas,  $j$ , de acordo com a seguinte expressão:

$$\sum_j E_i + \sum_j \frac{1}{2} \rho v_i^2 = \sum_j E_f + \sum_j \frac{1}{2} \rho v_f^2 + W \quad (3.5)$$

Onde  $E$  corresponde à energia interna,  $\frac{1}{2} \rho v^2$  é a energia cinética, e  $W$  o trabalho realizado no sistema.

### 3.2 Equação de Estado

Uma equação de estado (EOS), relaciona as propriedades termodinâmicas (pressão e energia interna) de um material com a sua densidade e temperatura. Durante um impacto balístico, as pressões envolvidas são muito elevadas, por vezes mais elevadas do que a resistência do material. Quando isso acontece é conveniente a utilização de uma EOS.

Os efeitos de compressibilidade (mudanças de densidade) e os processos termodinâmicos irreversíveis como o aquecimento devido ao choque são considerados pela EOS (Anderson, 1987).

Quando se faz a modelação de problemas de impacto, é comum dividir a tensão em duas componentes, tensão hidrostática e tensão de desvio:

$$[\sigma] = [\sigma_h] + [\sigma_d] \quad (3.6)$$

Onde  $[\sigma]$  é o tensor das tensões,  $[\sigma_h]$  é o tensor das tensões hidrostáticas, e  $[\sigma_d]$  é o tensor das tensões de desvio. Por exemplo, para o caso de um material paralelepípedo, a tensão hidrostática provoca alterações no volume, e portanto, é também conhecida por tensão volumétrica. O tensor de desvio por outro lado provoca alterações na forma.

As tensões hidrostáticas são caracterizadas pelas EOS, enquanto as tensões de desvio são caracterizadas pelas equações constitutivas dos materiais (Lee, 2008).

### 3.3 Classificação das Velocidade de Impacto

As designações de impacto a baixa velocidade ou alta velocidade exigem que sejam definidos limites que tornem essa terminologia mais objetiva. Para esse fim, referem-se os valores e conceitos adotados.

Segundo Zukas (1982) os fenómenos de impacto podem ser divididos de acordo com a velocidade a que ocorrem, atribuindo-se as classificações abaixo indicadas:

**Impacto a baixa velocidade:**  $v < 250$  m/s

**Impacto a média velocidade:**  $250 < v < 0.5$  km/s

**Impacto a alta velocidade:**  $0.5$  km/s  $< v < 2$  km/s

**Impacto a hipervelocidade:**  $v > 2$  km/s

Aos impactos a baixa velocidade associam-se ações e reações da ordem dos milissegundos e penetrações ou deformações de contacto fundamentalmente determinadas pelo comportamento global da estrutura.

Na faixa de velocidades de 0.5 a 2 km/s, a resposta da estrutura, globalmente, tem pouca relevância no estudo do comportamento da região que sofre o impacto. O impacto deve ser então tratado como

um fenómeno de propagação de ondas em que os aspetos de velocidade de deformação, geometria escoamento plástico e os modos de rotura têm que ser considerados na modelação do processo.

Na faixa de velocidades de 2 a 3 km/s, as pressões locais causariam tensões várias vezes maiores do que as resistências dos materiais e encontra-se um comportamento típico de fluidos.

Para velocidades muito altas, superiores a 12 km/s, ocorre vaporização dos materiais ao dar-se a colisão. Atendo a estes aspectos, Zukas (1982) propôs uma classificação dos fenómenos de impacto que se resumem na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Fenómenos físicos associados a intervalos de velocidades de impacto.

<b>Velocidade de deformação (/s)</b>	<b>Velocidade de impacto</b>	<b>Efeitos</b>	<b>Causa</b>
$10^8$	>12 km/s	Impacto explosivo com vaporização	–
$10^6$ a $10^7$	3 a 12 km/s	Impacto hidrodinâmico compressível	Aceleração por explosão
$10^4$ a $10^6$	2 a 3 km/s	Comportamento como fluido Tensões máximas	“Canhão” de gás ou detonador sólido
$10^2$ a $10^4$	0,5 a 1 km/s	Resposta viscosa ainda significativa	“Canhão” com detonador sólido
1 a 100	50 a 500 m/s	Comportamento plástico	Mecânica ou arma de ar comprimido
<1	<50 m/s	Comportamento elástico com plasticidade localizada	Mecânica ou arma de ar comprimido

### 3.4 Ondas de Choque

No que diz respeito a eventos dinâmicos em altas velocidades, as ondas de choque estão presentes e podem ser definidas como uma onda mecânica de amplitude finita, sendo iniciadas quando o material é submetido a uma rápida compressão. Um movimento forçado num meio deformável cria essas ondas, muitas vezes chamado de distúrbio. Este meio é composto por pontos de material, que são forçados a deslocarem-se da sua posição de equilíbrio, devido à perturbação que se propaga através do material. Esta propagação transmite quantidades de energia ponto a ponto no interior do material, na forma de energia cinética e potencial, ou seja, uma onda mecânica pode ser caracterizada pelo transporte de energia através de movimentos oscilatórios entre pontos do material, sobre uma posição de equilíbrio. Porém, o meio oferece resistência contra o movimento e, eventualmente, este irá diminuir até que um estado de deformação estática seja alcançado, devido às perdas por atrito e difusão de ondas.

A figura 3.2, ilustra uma analogia entre o movimento das partículas sobre a sua condição de equilíbrio e um esquema de amortecimento.

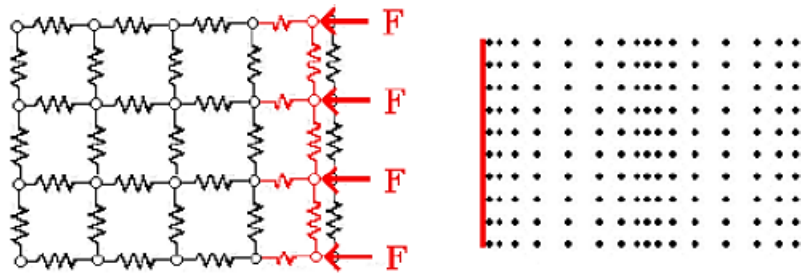


Figura 3.2 – Movimento das partículas sobre a sua condição de equilíbrio (Lama,2013).

A propagação de ondas de choque promove a transferência e propagação de energia num intervalo de tempo muito reduzido, na ordem dos microssegundos. Denomina-se onda elástica a que transmite tensões dentro do regime elástico do material, com velocidade num meio contínuo, sendo dependente da massa específica e do módulo de elasticidade do material. Para além das ondas poderem refletir ou refratar, podem ser gerados outros tipos de onda, ou seja, caso uma onda do tipo longitudinal, colida com uma interface qualquer, esta pode decompor-se em outros tipos de onda, sejam do tipo transversais, refletidas e/ou refratadas.

Quando num material dúctil a tensão excede o limite elástico, ocorre a deformação plástica, a qual pode ser gerada em função de deformações quasi-estáticas ou dinâmicas.

Quando a intensidade da carga resultante provoca tensões que ultrapassam o limite de elasticidade dos materiais, produzem-se ondas elásticas seguidas de ondas plásticas com velocidades mais baixas (Lama,2013).

### 3.4.1 Condições de Rankine Hugoniot

Rankine e Hugoniot descreveram o comportamento das ondas de choque, sendo a sua teoria geralmente aceite na maioria das situações. Estes descreveram a relação entre ambos os lados de uma onda de choque num escoamento unidimensional em fluidos ou deformações unidimensionais em sólidos, onde existe conservação da massa, momento e energia (Adams,2006).

A relação pode ser obtida através do impacto entre duas placas, que provocam uma frente de choque que se propaga através de um material compressível no tempo,  $\Delta t$ , com uma velocidade de choque  $U_s$  desde a linha A para a C.

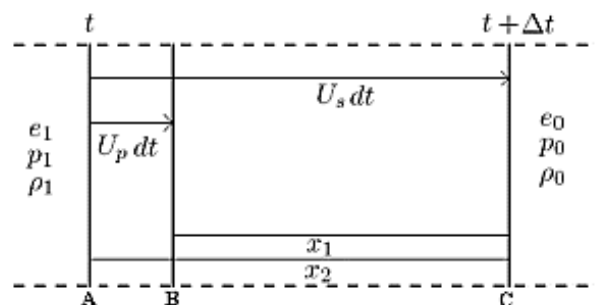


Figura 3.3 – Representação esquemática de uma frente de choque (linha C) propagando-se através de um material compressível (Adams,2006).

A onda de choque provoca uma pressão  $p_1$  (atrás da onda de choque) que é rapidamente aplicada à face da placa. Esta face estava inicialmente à pressão  $p_0$  (na frente da onda de choque). Esta pressão comprime o material para uma nova densidade  $\rho_1$  (compressão desde a linha A para a linha B) e ao mesmo tempo o material é acelerado com uma velocidade nas partículas  $U_p$ .

Através dos princípios da conservação da massa, momento e energia, as condições de Rankine-Hugoniot podem ser expressas como:

$$\rho_0 U_s = \rho_1 (U_s - U_p) \quad (3.7)$$

$$p_1 - p_0 = \rho_0 U_s U_p \quad (3.8)$$

$$p_1 U_p = \frac{1}{2} \rho_0 U_s U_p^2 + \rho_0 U_s (e_1 - e_0) \quad (3.9)$$

Os valores  $e_0$  e  $e_1$  são as energias internas específicas na frente e atrás da onda de choque, respetivamente. Utilizando as condições de Rankine-Hugoniot da conservação da massa, momento e energia e eliminando  $U_s$  e  $U_p$  (3.9), a equação da conservação da energia pode ser expressa como a relação de Rankine-Hugoniot:

$$(e_1 - e_0) = \frac{1}{2} (p_1 - p_0) \left( \frac{1}{\rho_0} + \frac{1}{\rho_1} \right) \quad (3.10)$$

Os valores  $\frac{1}{\rho_0} = v_0$  e  $\frac{1}{\rho_1} = v_1$  são os volumes específicos. Estas quatro equações são usualmente chamadas de “*jump conditions*”, que devem ser estabelecidas em ambos os lados da frente de choque. Uma relação da velocidade do choque  $U_s$  pode ser obtida substituindo a velocidade das partículas  $U_p$  a partir da equação 3.7 e 3.8 com a suposição que a pressão, densidade e energia interna são conhecidas no estado inicial:

$$U_s^2 = \frac{1}{\rho_0^2} \frac{p_1 - p_0}{v_0 - v_1} \quad (3.11)$$

No caso dos materiais sólidos, observações experimentais indicam que a velocidade do choque pode ser escrita como uma função linear da seguinte forma:

$$U_s = A_\Gamma + B_\Gamma U_p \quad (3.12)$$

Onde  $A_\Gamma$  representa a velocidade da onda num determinado meio, velocidade do som no material e  $B_\Gamma$  é uma constante que está relacionada com o parâmetro de Gruneisen ( $\Gamma$ ):

$$B_\Gamma = \frac{1 + \Gamma}{2} \quad (3.13)$$

Sobre o parâmetro  $\Gamma$ , que corresponde a uma característica do material, o seu significado será explicado quando for apresentada a EOS de Mie-Gruneisen

A relação da equação 3.10, quando combinada com as condições de Rankine – Hugoniot da conservação da massa e do momento, a pressão e energia de Hugoniot podem ser obtidas. A pressão

de Hugoniot  $p_h$  (diferença entre a pressão entre parte frontal e traseira da onda de choque) é apenas uma função da densidade.

A equação 3.8 pode ser reescrita assumindo a compressão relativa:  $\eta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho} = 1 - J$ , eliminando as velocidades fazendo:  $U_p = \eta U_s$  (obtido a partir da equação 3.7), e  $U_s = \frac{A_\Gamma}{1 - B_\Gamma \eta}$  (obtido a partir da equação 3.12). a pressão de Hugoniot,  $p_h = p_1 - p_0$ , pode ser escrita como:

$$p_h = \frac{\rho_0 A_\Gamma^2 \eta}{(1 - B_\Gamma \eta)^2} \quad (3.14)$$

A energia de Hugoniot,  $e_h = e_1 - e_0$ , (diferença entre a energia entre a parte frontal e traseira da onda de choque) é facilmente obtida a partir da equação 3.10 e é definida como:

$$e_h = \frac{1}{2} p_h (v_0 - v_1) = \frac{p_h \eta}{2 \rho_0} \quad (3.15)$$

### 3.4.2 Equação de Estado de Mie-Gruneisen

A equação de estado de Mie-Gruneisen relaciona o comportamento volumétrico dos materiais quando estes são sujeitos às ondas de choque.

#### Parâmetro de Gruneisen

O parâmetro de Gruneisen ( $\Gamma$ ) pode ser considerado como a medida da variação da pressão com o aumento a energia interna específica a volume constante. A equação de estado de Mie-Gruneisen pode ser expressa utilizando o parâmetro de Gruneisen:

$$\delta p = \Gamma \delta e \quad (3.16)$$

A diferença da pressão e da energia entre o estado atual e um estado de 0 Kelvin, pode ser escrita da seguinte forma:

$$p - p_{ref} = \Gamma \rho (e - e_{ref}) \quad (3.17)$$

Este estado de referência pode ser relacionado com outro. A forma mais comum da equação de estado de Mie-Gruneisen é relacionada com as equações de pressão e energia de Hugoniot. Substituindo a pressão (3.14) e energia (3.15) como estados de referência em (3.17) fornece a descrição completa da equação de estado de Mie-Gruneisen:

$$p = \frac{\rho_0 A_\Gamma^2 \eta}{(1 - B_\Gamma \eta)^2} \left( 1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right) + \Gamma_0 \rho_0 e \quad (3.19)$$

Esta EOS encontra-se disponível no *software* de elementos finitos utilizado, pelo que vai ser utilizada para modelar a resposta dos materiais quando estes são sujeitos às ondas de choque.

### 3.5 Modos de Falha

Os diversos modos de falha do elemento de proteção estão representados na Figura 3.4. A fragmentação (spalling) é muito comum e é o resultado da reflexão da onda da face traseira do painel. É comum para os materiais mais resistentes à compressão do que em tração. O destacamento (scabbing) é semelhante à fragmentação, que resulta de uma grande deformação do painel que começa numa fenda num local onde possui falta de homogeneidade local.

Descamação (petaling) ocorre quando as tensões radiais circunferenciais são elevadas e a velocidade de impacto do projétil está perto do limite balístico. A obturação (plugging) e a perfuração (piercing) ocorrem em materiais que são bastante dúcteis e quando a velocidade de impacto do projétil é muito próxima do limite balístico. A fratura frágil (brittle fracture) ocorre geralmente em painéis com baixa densidade. As fissuras radiais (radial cracking) são comuns nos materiais cerâmicos onde a resistência à tração é menor do que a resistência à compressão (Carlucci e Jacobson, 2010).

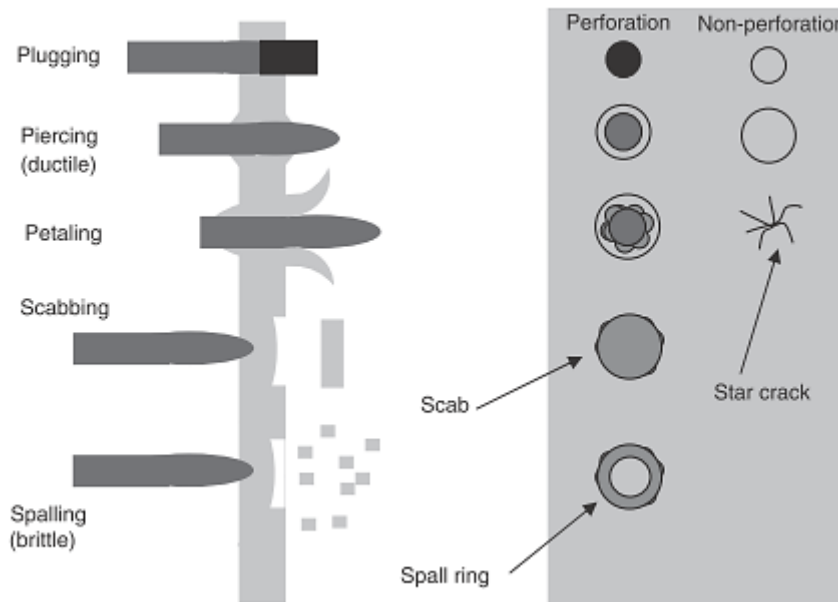


Figura 3.4 – Modos de falha das estruturas de painéis de proteção balística.

No que diz respeito aos danos provocados pelos modos de falha referidos anteriormente em pessoas e equipamentos, pode-se concluir que os mais críticos são os 3 primeiros da figura 3.4: *plugging*, *piercing* e *petaling*, pois são modos de falha em que a velocidade de impacto do projétil é muito elevada e este atravessa com alguma facilidade a proteção balística provocando deste modo danos na pessoa ou equipamento que a proteção se encontra a proteger.

Os dois últimos, *scabbing* e *spalling*, são menos críticos que os anteriores, pois com uma placa adicional de proteção poderia ser suficiente para reter os estilhaços provenientes do projétil e da primeira placa de proteção



## 4 Características dos Materiais

Este capítulo divide-se em três grandes partes. Na primeira parte, embora não tenham sido utilizadas neste trabalho, considerou-se relevante fazer uma exposição de algumas técnicas experimentais de caracterização do impacto de alta velocidade bem como das formas de obtenção das propriedades mecânicas em regime dinâmico.

Na segunda parte será feita uma breve explicação dos materiais compósitos, dos seus constituintes (matrizes e fibras), das suas vantagens relativamente aos outros materiais, dos mecanismos de dano e falha nestes materiais.

Na última parte será feita uma justificação da escolha dos materiais seleccionados para os painéis balísticos, a explicação do processo de produção dos materiais compósitos e ainda o modo de identificação dos materiais e da respetiva espessura que ocupam no projétil de 9mm da pistola *Walther*.

### 4.1 Técnicas Experimentais de Caracterização do Impacto

Para poder caracterizar o comportamento de materiais quando sujeitos a impactos é desejável obter o máximo de informação sobre os fenómenos relevantes. No caso de impacto de baixa velocidade é possível obter a evolução da força ao longo do tempo utilizando um transdutor de força. No caso de impacto de alta velocidade, o lançamento do projétil é, habitualmente, feito recorrendo a pólvora para lançar os projéteis. Devido a instabilidades associadas ao voo livre destes objetos e às elevadas velocidades alcançadas, a determinação da trajetória é muito complexa. A medição da variação de velocidade durante a interação no impacto não é fácil, sendo relativamente mais simples determinar a velocidade de impacto e a velocidade residual do projétil (Justo, 2005).

A maioria dos sistemas atualmente disponíveis está limitada a determinar valores instantâneos, ou discretos, de velocidade. Os sistemas típicos incluem a fotografia de alta velocidade, cronómetros e sensores óticos, tendo o primeiro sistema a desvantagem do custo elevado. No caso dos cronómetros e sensores óticos, como a velocidade é calculada a partir da distância entre os sensores e do tempo medido pelo cronómetro, apenas se conseguem obter valores discretos. Sendo a principal desvantagem apontada o facto de apenas fornecerem valores de velocidade num número limitado de pontos ao longo da trajetória do projétil.

Existem alguns sistemas que permitem caracterizar a velocidade do projétil durante o impacto.

Um dos métodos capaz de medição contínua é baseado em interferometria laser. O princípio da interferometria laser é intersectar dois feixes de laser coerentes, formando um volume de medida elipsoidal. Quando os dois feixes se intersectam formam-se franjas, e à medida que o projétil passa através destas franjas, luz de diferentes intensidades é dispersa. A frequência de alteração da intensidade da luz pode ser detetada com um fotodetector, sendo os dados representados como um historial de velocidade vs tempo ao longo do impacto. Outro método realizar medições de forma contínua consiste na utilização de um projétil instrumentado, seja com uma célula de carga ou com acelerómetro. Um exemplo da aplicação deste método pode ser encontrado em (Delfosse, 1993), onde o projétil utilizado tinha uma célula de carga incorporada. Este tipo de sistema é capaz de medir a evolução da força ou aceleração durante o impacto, sendo a principal limitação o facto da velocidade

máxima estar limitada a 50 m/s. Esta limitação advém dos fios que são usados para transmitir do projétil romperam com facilidade a velocidades superiores. Acresce ainda o inconveniente da massa do projétil instrumentado ser muito superior ao projétil “normal”.

Ayax (1993) utilizou um sistema simples que permite monitorizar a evolução da velocidade do projétil. A forma deste projétil tinha uma particularidade: a parte posterior era cônica, sendo o comprimento alterado de forma a conservar a massa pretendida. Um esquema do dispositivo utilizado pode ser visto na figura 4.1.

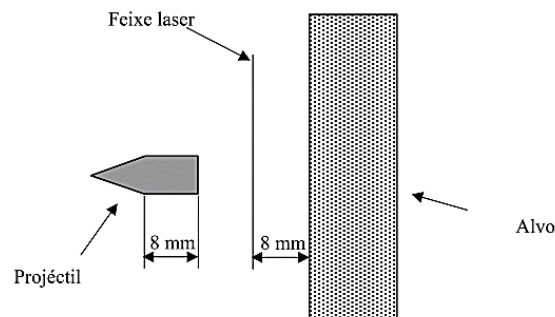


Figura 4.1 – Dispositivo utilizado por Ayax para medição da velocidade do projétil.

## 4.2 Propriedades Mecânicas

Apesar das propriedades mecânicas em regime *quasi* – estático serem bem conhecidas, as propriedades obtidas em regime dinâmico têm merecido a atenção de vários investigadores. Dispositivos como o pêndulo Charpy e de queda de peso têm sido largamente empregues. Porém, ou a energia é demasiado baixa quando comparada com a de um impacto de alta velocidade, ou o provete é testado em compressão não se obtendo facilmente as propriedades à tração. Para além disso, a razão de deformação não permanece constante durante o teste, não se podendo portanto obter uma lei constitutiva do comportamento do material.

Atualmente os avanços mais importantes na caracterização de materiais compósitos em regime dinâmico têm sido realizados com o dispositivo experimental Barra de Hopkinson.

## 4.3 Materiais utilizados nas blindagens

Uma série de critérios devem ser considerados ao selecionar materiais para o uso em sistemas de blindagem incluindo o seu volume e custo. Não existe nenhum sistema de proteção que seja o melhor, pois um dado material pode proporcionar uma proteção adequada contra uma ameaça específica num dado sistema de configuração, pode ser inadequado para uma aplicação diferente, particularmente se o volume e o peso forem fatores importantes.

### 4.3.1 Materiais Compósitos

Uma vez que neste trabalho vão ser utilizados estes materiais irá ser realizada uma exposição mais profunda sobre o que são estes materiais, do que são constituídos bem como o seu comportamento durante impactos balísticos e ainda os vários tipos de dano que ocorrem nestes materiais.

### **O que são materiais compósitos?**

Um material compósito é constituído pela “assemblagem” de materiais de naturezas diferentes, que completando-se, resultam num material cujo desempenho é no conjunto, superior ao dos componentes considerados separadamente. As suas propriedades resultam das propriedades dos materiais constituintes, da sua distribuição geométrica e das suas interações.

O uso destes materiais tem-se generalizado e presentemente é vulgar encontrá-los, não só, nas indústrias, aeronáutica, aeroespacial, naval, automóvel e construção civil, como em aplicações militares.

Os materiais compósitos oferecem várias vantagens sobre os materiais estruturais convencionais, nomeadamente o seu módulo de elasticidade específico (relativamente à densidade) bastante elevado, resistência à rotura específica elevada, bem como boa resistência à corrosão e fadiga. No entanto, apresentam algumas desvantagens, como uma má resposta ao impacto localizado. Tem sido desenvolvido um grande esforço de investigação para compreender a resposta ao impacto destes materiais, quer estudando as suas propriedades a razões de deformação elevadas, quer a sua resposta ao impacto de projéteis. O impacto de baixa velocidade tem sido estudado extensivamente nas últimas décadas. Por outro lado, os estudos publicados sobre o impacto de alta velocidade têm sido em número muito menor. Uma das principais razões para o número reduzido de publicações sobre impacto de alta velocidade deve-se ao facto que muito do trabalho desenvolvido não é publicado em literatura científica “aberta”, por esta área de investigação esta ligada à Defesa, sendo considerada “sensível” (Justo, 2005).

### **Classificação dos Materiais Compósitos**

Em (Berthelot, 1992) os materiais compósitos são classificados quanto à forma e quanto à natureza dos seus constituintes. Quanto à forma podem ser compósitos de partículas e compósitos de fibras. Nos compósitos de fibras estas podem ser contínuas ou descontínuas e constituem o elemento de reforço da matriz. Nos compósitos de partículas estas podem ser utilizadas para melhorar as propriedades da matriz, como por exemplo aumentar a rigidez e a resistência à abrasão, diminuir a dilatação de origem térmica, ou apenas como carga de enchimento para redução de custos. Quanto à natureza dos constituintes podemos ter compósitos de matriz orgânica (materiais poliméricos), de matriz metálica (ligas leves e ultra leves de alumínio, magnésio, de titânio, etc.) e de matriz mineral (cerâmica), reforçados com fibras ou partículas de materiais de natureza diversa, de acordo com a tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Classificação dos compósitos segundo a natureza dos seus constituintes.

		<b>Natureza da Matriz</b>		
		<b>Orgânica</b>	<b>Metálica</b>	<b>Mineral</b>
<b>Reforços</b>	<b>Minerais:</b> Vidro, Carbono, etc.	<b>Minerais:</b> Carbono, Carboneto de Silício (SiC), etc.)	<b>Metálicas:</b> Boro	<b>Metálicas:</b> Boro
	<b>Orgânicas:</b> Kevlar, Poliamidas, etc.			
	<b>Metálicas:</b> Boro, Alumínio, etc.			<b>Minerais:</b> Carbonetos, Nitratos, etc.

### Fibras

As propriedades mecânicas dos materiais compósitos reforçados com fibras dependem não só dos seus constituintes (tipo de fibra e resina, fração volúmica, tratamentos das fibras e/ou resina, orientação, diâmetro e dimensão das fibras) mas também de outros fatores, como: processo de fabrico, temperatura, humidade e porosidade da resina (Reis, 2001).

### Matrizes

O tipo de matriz pode influenciar significativamente as propriedades mecânicas dos materiais compósitos. Apesar de suportar uma pequena fração da carga aplicada, pode-se dizer que quanto mais resistente for a matriz melhor será o desempenho do compósito (Reis, 2001). O modo de falha também é fortemente afetado pelo tipo de material utilizado na matriz, ao considerar a resistência da interface fibra/matriz. À matriz cabe também a responsabilidade de molhar completamente as fibras para, deste modo, fazer uma transferência eficaz das cargas e protege-las contra ataques químicos e/ou danos mecânicos como o desgaste. Por outro lado, elas condicionam muitas vezes a temperatura de trabalho, as propriedades elétricas, o processo de fabrico e a própria qualidade do acabamento superficial da peça (Mazumdar, 2002).

Dentro dos vários materiais passíveis de serem usados como matriz, os plásticos são aqueles que assumem maior expressão e, face às especificidades das aplicações, pode-se recorrer tanto às resinas termoendurecíveis como as termoplásticas.

### Compósitos Laminados

No caso dos materiais compósitos cujo reforço é constituído por fibras, a orientação das fibras determina a sua anisotropia. A possibilidade do controlo da anisotropia do conjunto final e da natureza e proporção dos constituintes pelo projeto e fabrico adequados às propriedades convenientes constitui uma das características fundamentais destes materiais. Os materiais compósitos podem ser concebidos consoante os objetivos e propriedades pretendidas.

### Homogeneização das Lâminas

A lâmina de um compósito é constituída pelas fibras de reforço envolvidas pela matriz. Uma lâmina é assim um material heterogéneo. Porém, é possível representá-la como um material homogéneo determinando as suas propriedades com base nas propriedades dos seus constituintes.

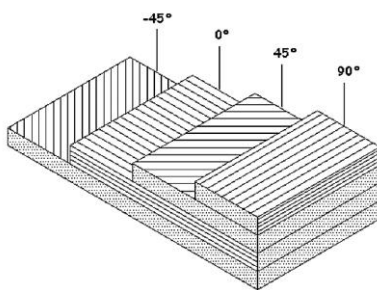


Figura 4.2 – Compósito laminado (Ferreira, 2006).

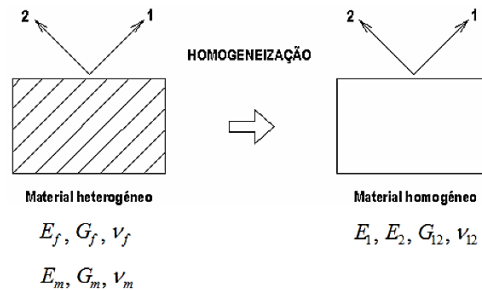


Figura 4.3 – Homogeneização de uma lâmina (Ferreira, 2006).

O material homogéneo equivalente é geralmente assumido como ortotrópico. Para descrever as propriedades mecânicas de uma lâmina ortotrópica no seu plano (plano 1-2 na figura 4.4) são necessárias quatro propriedades de rigidez elástica também designadas por constantes de engenharia. Essas propriedades mecânicas são o módulo de Young na direção das fibras de reforço ( $E_1$ ), o módulo de Young transversal à fibra de reforço ( $E_2$ ), o módulo de corte no plano ( $G_{12}$ ) e o coeficiente de Poisson no plano ( $\nu_{12}$ ).

A figura mostra o sistema de coordenadas (1-2-3) para uma lâmina, onde (1) é a direção das fibras e (2) e (3) são as direções transversais às das fibras. Conhecendo as propriedades no plano de cada lâmina, pode determinar-se a rigidez do laminado correspondente.

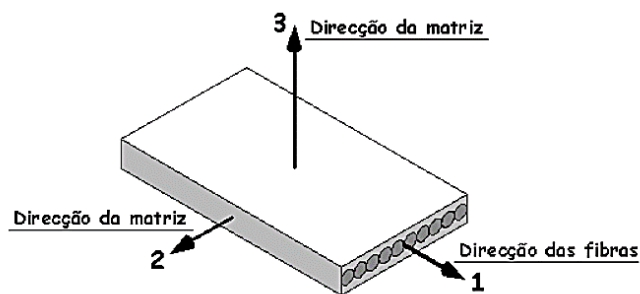


Figura 4.4 – Sistema de coordenadas da lâmina (Ferreira, 2006).

### Dano em Compósitos

Quando se considera a resistência ao dano as características dos compósitos e dos metais são significativamente diferentes. Os metais podem considerar-se isotrópicos enquanto os compósitos são geralmente anisotrópicos. A resistência e a rigidez no plano são usualmente altas e variáveis com a orientação da fibra de reforço. As propriedades que não beneficiam do reforço das fibras, são comparativamente baixas em resistência e rigidez, como é o caso da resistência à tração através da espessura. Os metais têm razoável ductilidade e tenacidade e quando atingem um certo nível de carga,

podem ainda alongar ou comprimir consideravelmente sem falha. A ductilidade e a tenacidade têm dois importantes benefícios, proporcionam o alívio da carga local distribuindo o excesso para o material adjacente ou para a restante estrutura e garantem também uma maior capacidade de absorção de energia. Como resultado, quando uma estrutura metálica sofre um carregamento de impacto, poderá deformar-se sem atingir a rotura. Contrariamente, os compósitos são relativamente frágeis. A fragilidade reflete-se na sua fraca capacidade para suportar concentração de tensões e resistir ao dano provocado por impacto.

Na maioria dos impactos a baixa velocidade, o dano é confinado à matriz provocando reduzido dano na fibra. Assim, a resistência à tração no plano do laminado pode não ser muito degradada. Porém, mesmo com níveis de impacto que deixem pequenas ou nenhuma indicações de dano na superfície, o dano na matriz pode ser significativo e a sua capacidade para estabilizar as fibras em compressão pode ser seriamente reduzida (Ferreira, 2006).

O dano em compósitos laminados devido ao impacto, para além da delaminação, inclui também a fissuração da matriz, descolagem fibra-matriz e quebra das fibras.

Podem considerar-se dois aspetos no dano em compósitos laminados: o dano local e o dano global. O dano local consiste fundamentalmente na indentação de contacto provocada pela ponta do impactor no compósito e está essencialmente associado à geometria, forma e propriedades do material do impactor. O dano global surge principalmente sob a forma de delaminação que se estende a partir da área de contacto.

### **Dano nos Compósitos Laminados Devido ao Impacto**

Dos vários tipos de dano que os compósitos laminados podem sofrer, o resultante do impacto é um dos mais prejudiciais. Estes materiais dissipam a energia do impacto pela combinação do dano da matriz, rotura das fibras e descolagem fibra-matriz (Reis e Freitas, 1997). Nos impactos de alta velocidade, como os balísticos, o dano é claramente visível por inspeção visual, por outro lado nos impactos de baixa velocidade o dano interno é difícil de detetar mas pode reduzir consideravelmente as capacidades do laminado para suportar cargas.

Uma placa de material compósito laminado quando sujeita a um impacto, apresentará uma distribuição de tensões ao longo da espessura que vão da compressão na face de contacto com o impactor, até a tração na face oposta como resultado da flexão a que fica sujeita. A amplitude destas tensões será tanto maior quanto maior for a espessura da placa, variando também com o empilhamento do laminado. Portanto, para além do dano localizado na indentação provocada pela colisão da ponta do impactor é de esperar, em simultâneo, danos por tração, compressão e corte no laminado.

## Mecanismos de Falha

### Deformação da matriz

A deformação plástica da matriz em materiais compósitos é raramente abordada quando se consideram os processos de falha. É, no entanto, uma característica importante, responsável pela rigidez e resistência ao impacto nos compósitos. Os compósitos de matriz termoplástica estão cada vez mais a conquistar a confiança dos investigadores e projetistas pela sua excelente resistência ao impacto, devido à sua ampla deformação plástica.

### Descolagem fibra-matriz

A maior parte das investigações na análise da falha dos compósitos tem-se concentrado no papel da matriz e das fibras e nos mecanismos de rotura destes materiais. A maioria dos sistemas compósitos, as características de deformação e modos de falha são fortemente influenciados pelo desempenho das interfaces, em particular no que respeita à descolagem das fibras ou deslizamento relativo fibra-matriz. As propriedades interfaciais são de grande importância prática no projeto de materiais compósitos resistentes ao dano, têm sido desenvolvidas técnicas de teste adequadas para a medição da resistência interfacial. É o caso do teste do arrancamento da fibra que se mostra na figura 4.5 e onde o valor da carga aplicada ao provete de material compósito é medido com uma célula de carga, enquanto o deslocamento pode ser determinado por extensometria (Mackin *et al.*, 1992).

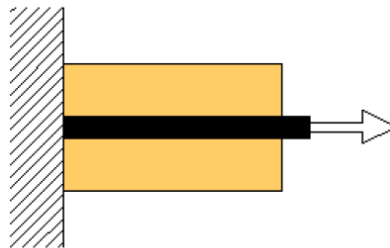


Figura 4.5 – Teste de arrancamento da fibra.

### Fissuração da matriz

A fissuração da matriz é outro tipo de dano significativo e um modo comum de falha em materiais compósitos. É geralmente localizada e difícil de detetar. Com o aumento da carga, a densidade das fissuras aumenta e parece estabilizar num único valor para um dado laminado. Apesar da fissuração da matriz não conduzir a reduções significativas nas capacidades mecânicas, pode, no entanto, atuar como precursor da delaminação, esta sim um modo pernicioso de dano. No caso do carregamento de impacto atuar sobre uma amostra flexível, a fissuração da matriz começa normalmente na superfície oposta à da aplicação da carga e propaga-se através da espessura do laminado.

## Delaminação

A delaminação que corresponde ao descolamento de camadas adjacentes do laminado, é um modo de dano difícil de quantificar e o mais importante modo de dano em placas compósitas sujeitas ao impacto. O crescimento da delaminação sob a ação de uma carga monotónica ou cíclica pode resultar numa redução drástica da resistência e rigidez do laminado.

Na figura 4.6 mostram-se estes dois últimos mecanismos de rotura, a fissuração da matriz e a delaminação, quando os materiais são sujeitos a impactos.

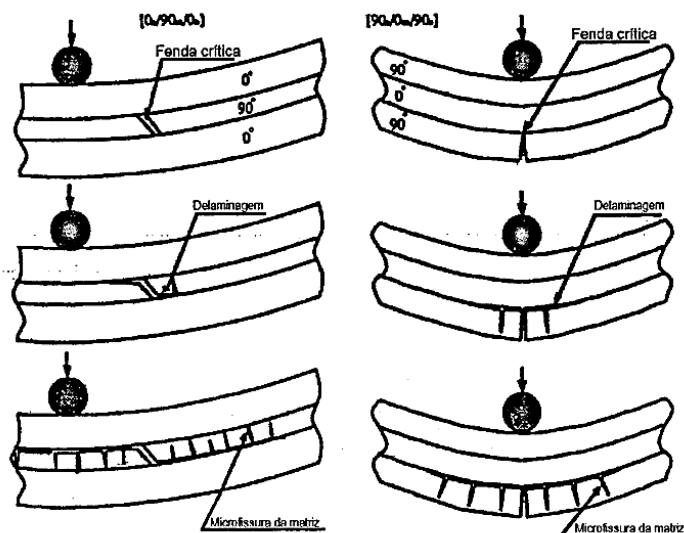


Figura 4.6 – Mecanismos de rotura (Justo,1996)

## 4.4 Seleção dos Materiais para os painéis balísticos

Os materiais compósitos utilizados são constituídos nas primeiras camadas por uma fibra de aramida, Kevlar®. Escolheu-se esta fibra pois é caracterizada pela excelente resistência química e mecânica, ótima relação resistência/peso, alta tenacidade, boa resistência ao impacto e à fadiga e ainda boa capacidade de amortecimento de vibrações.

Como camadas posteriores no material compósito utilizaram-se fibras de carbono com o intuito de conferir rigidez ao compósito.

Entre estas camadas foi utilizada fibra de vidro com a função de aumentar a ductilidade e obter uma melhor impregnação das fibras pela resina, o que reduz a ocorrência de delaminações.

O material metálico selecionado foi uma liga de alumínio, foi escolhida esta liga devido à sua baixa densidade, uma vez que se pretende minimizar o peso da blindagem, e ainda pela sua ductilidade e capacidade de absorção de energia.

## 4.5 Produção dos Materiais Compósitos

Os materiais compósitos utilizados neste trabalho foram produzidos no INEGI. Seguidamente vai ser exposto todo o processo de produção, desde os materiais e equipamentos utilizados bem como toda a sequência de produção.

A produção destes materiais contemplou quatro etapas:

- Preparação (corte dos materiais; preparação da resina, etc);
- Moldação manual;
- Cura;
- Acabamento.

Materiais utilizados: fibra de Kevlar®; fibra de vidro; fibra de carbono; resina de poliuretano; endurecedor; *pealply*; bomba de vácuo; cera desmoldante; prensa de pratos quentes; saco de vácuo; mangueiras de vácuo; fita adesiva; fita de papel; tesoura para cortar o Kevlar®.

Procedimentos utilizados:

1. Corte das fibras

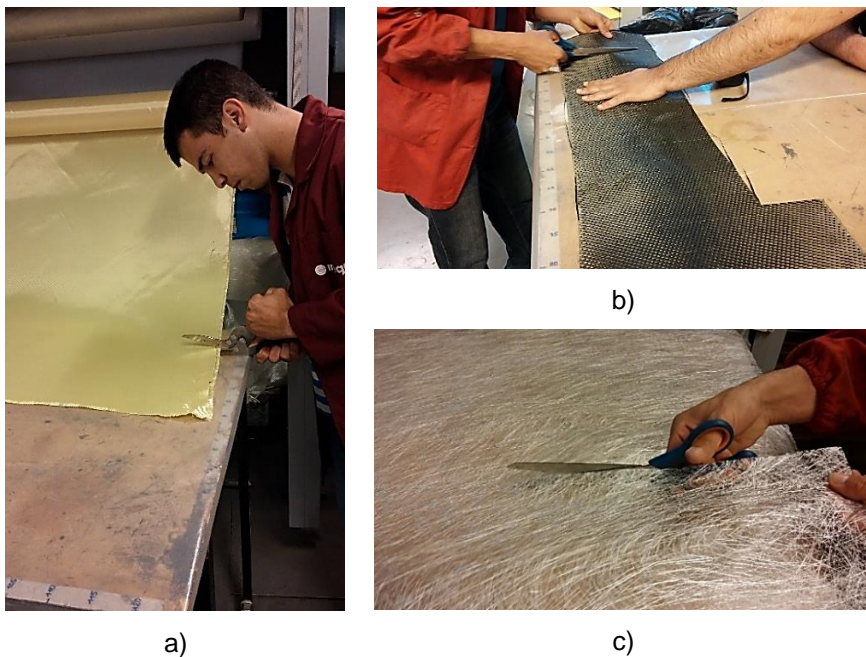


Figura 4.7 – Corte das fibras: a) Corte da fibra de Kevlar; b) Corte da fibra de carbono; c) Corte da fibra de vidro

2. Aplicação da cera desmoldante (aplica-se em toda a chapa, deixa-se secar durante 30 minutos e limpa-se com um pano seco). Depois volta-se a aplicar mais uma ou duas camadas e limpa-se com um pano seco para retirar a cera.

3. Preparação do saco de vácuo com fita adesiva e montagem do circuito de vácuo com as mangueiras.

4. Preparação da resina e do endurecedor.

5. Misturar 500g de resina epóxi a 250g de endurecedor (a resina tem um “*pot-life*” entre 30 a 50 minutos). A preparação da resina é o último passo antes de se iniciar a moldação manual.

6. Depois de efetuado o corte dos materiais e da mistura da resina com o endurecedor procedeu-se à deposição das camadas de material pincelando cada uma delas com a mistura anteriormente referida.

6.1. Primeiro efetuou-se a deposição de 4 camadas de Carbono

6.2. Depois da deposição das camadas de carbono colocaram-se 24 camadas de Kevlar® e entre cada uma delas colocou-se uma camada de fibra de vidro



a)



b)

Figura 4.8 – a) Colocação das camadas de carbono e resina; b) Colocação das camadas de Kevlar, fibra de vidro e resina.

7. No final da deposição de todas as camadas colocou-se um *pealply*, com a função de absorver resina e para não aderir ao plástico do saco utilizado para fazer o vácuo, posteriormente procedeu-se à vedação do painel compósito com um saco plástico por forma a fazer vácuo. Após a vedação do painel introduziu-se o tubo da máquina para fazer vácuo ao painel.

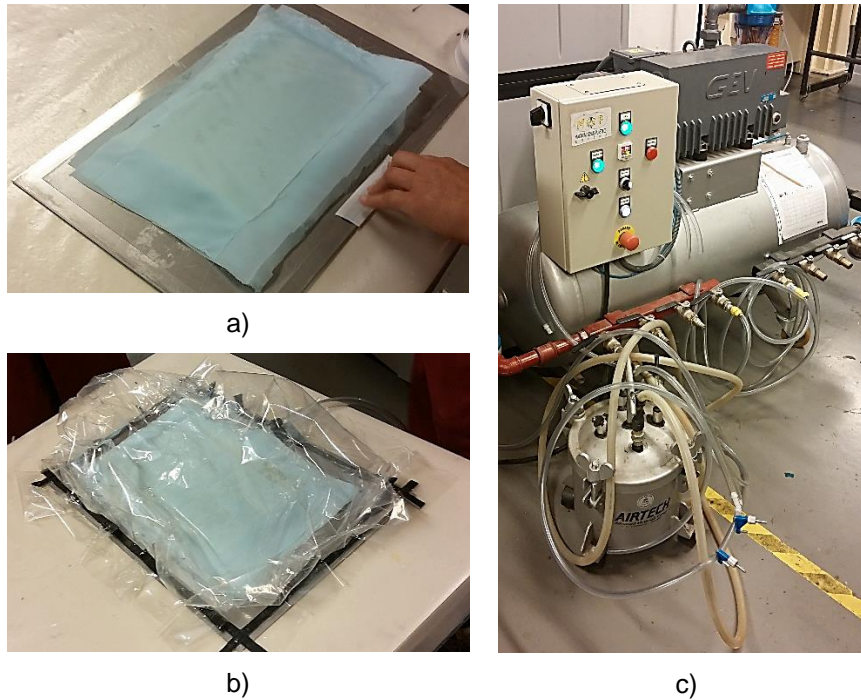


Figura 4.9 – Fase final da produção: a) Aplicação do peelply; b) Colocação do saco e da mangueira para a realização do vácuo; c) Bomba de vácuo.

8. Finalizando o vácuo ao painel colocou-se um peso encima do painel com o objetivo da compressão do painel aumentar (também se pode utilizar uma prensa para fazer uma melhor compactação).



Figura 4.10 – Colocação de peso no painel para aumentar a compressão.

9. Após o procedimento anterior, deixou-se o painel em vácuo durante cerca de 2 a 3 horas para a resina curar. Após este período de cura da resina o painel foi colocado num forno a 80°C para realizar a pós-cura. Finalizado este processo foi retirado o saco de vácuo, o peelply e o painel é separado da placa metálica para o molde.

#### 4.6 Identificação dos materiais do Projétil de 9mm

Os projéteis podem ser constituídos por uma grande diversidade de materiais. Estes podem ser constituídos apenas por um material ou também por um revestimento de uma liga metálica que envolve o núcleo do projétil. Uma vez que nas simulações numéricas será realizada apenas o estudo do impacto do projétil de 9mm houve a necessidade de se identificar quais os materiais presentes no projétil, bem como a espessura que cada um compõe o projétil.

Para efetuar esse estudo pediu-se auxílio à Polícia Judiciária que contém os equipamentos necessários para identificação dos materiais e da respetiva espessura.

A análise da liga metálica da blindagem do projétil foi efetuada por MEV/EDX (microscopia eletrónica de varrimento com espectrometria por dispersão de energias de raios-X).

Neste caso foi utilizado o MEV da marca Zeiss, modelo EVO 50.

Por seu lado, a espessura foi determinada por após aplanamento (tanto quanto possível) do material e medição em 10 pontos, num micrómetro Lorentzen & Wettre, modelo 051 (normalmente é usado para medir espessura de papel e cartolinas).

Após a utilização destes dois equipamentos, um para a análise da liga metálica o outro para determinação da espessura, concluiu-se que o projétil de 9 mm é constituído por um núcleo de chumbo e revestido por uma liga metálica constituída por zinco (5%) e cobre (95%).

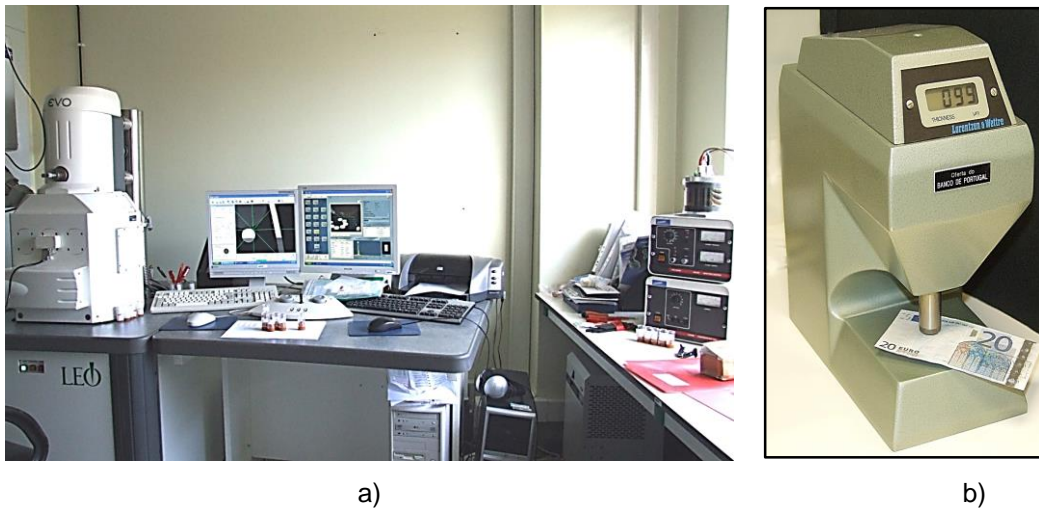


Figura 4.11 – Equipamentos utilizados: a) SEM; b) Micrómetro Lorentzen & Wettre.

## 5 Ensaio Balísticos

Neste capítulo serão apresentados todos os procedimentos efetuados para realizar os ensaios balísticos, desde o plano de ensaios realizados, os requisitos que os painéis devem apresentar, as medidas de segurança adotadas, a preparação das infraestruturas e finalmente a exposição dos resultados dos ensaios realizados.

Antes de serem apresentados os procedimentos anteriormente referidos, bem como o resultado dos ensaios importa referir que esta componente experimental foi realizada em conjunto com o Aspirante-Aluno de Infantaria Ferreira no âmbito do seu Trabalho de Investigação Aplicada (TIA) “Proteção Balística do Soldado de Infantaria “. No seu trabalho fez o levantamento dos requisitos que os painéis devem apresentar bem como das normas e procedimentos a seguir no decorrer dos ensaios.

### 5.1 Plano de Ensaio Balísticos

Antes da realização dos ensaios balísticos foi elaborado um plano dos ensaios a realizar, prevendo o uso de dez painéis compósitos e quatro de alumínio. Para a realização deste plano partiu-se sempre do pressuposto que haveria sempre penetração total, ou seja, a situação extrema de insucesso de proteção balística.

O plano dos ensaios balísticos inicialmente proposto teve que ser alterado no decorrer dos ensaios, pois não se verificou a condição mais extrema de insucesso de proteção balística, ou seja a penetração total em todos os painéis. Para a maximização de resultados, na tabela 5.1 está exposto o plano de ensaios balísticos alterado.

Tabela 5.1 – Plano de ensaios balísticos alterado.

Ensaio	Nº de Impactos	Tipo e Número de Painéis	Distância do Tiro (metros)
<b>Ameaça: Pistola Walther</b>			
1	1	1 Painel Compósito	10
2	1	1 Painel Compósito	10
3	3	1 Painel Compósito	10
4	1	2 Painéis Compósitos	10
5	4	2 Painéis Compósitos	10
6	1	1 Painel de Alumínio	10
7	1	1 Painel Compósito e 1 Painel de Alumínio	10
<b>Ameaça: Espingarda Automática G3</b>			
8	1	1 Painel de Alumínio e 1 Painel Compósito	50
9	1	2 Painéis Compósitos	50
10	1	2 Painéis Compósitos e 1 Painel de Alumínio	50
11	1	2 Painéis Compósitos e 2 Painéis de Alumínio	100

## 5.2 Requisitos dos Painéis Balísticos

Quando se pretende testar o comportamento dos materiais a impactos balísticos, não importa apenas o facto de estes materiais conseguirem reter o projétil, impedindo que este não atravesse completamente os mesmos materiais.

Os materiais terão que preencher outros requisitos, tendo em conta que uma futura aplicação poderá ser para proteção individual, foram propostos alguns requisitos que estes terão de apresentar.

Os requisitos dos ensaios balísticos foram propostos pelo Aspirante de Infantaria Ferreira, pois no âmbito do seu TIA, fez o levantamento dos requisitos do Soldado de Infantaria e dos requisitos dos coletes balísticos. Após ter feito este levantamento, conjugou os mais pertinentes para dar origem aos requisitos dos ensaios balísticos.

Os aspetos principais destes requisitos contemplam as seguintes características:

- Proteção contra a ameaça definida;
- Causar o mínimo de constrangimento nas funções desempenhadas pelo Soldado;
- Peso reduzido;
- Apresentar a resistência balística definida pela Norma seguida.

Considerando as características anteriormente mencionadas, os Requisitos de Coletes Balísticos (ReqColBal) selecionados foram os seguintes:

**ReqColBal1**- Providenciar o máximo de proteção balística contra munições de fragmentação. A proteção contra pequenas armas de fogo deve ser também maximizada, desde que não haja degradação do colete, originando a fragmentação do mesmo;

**ReqColBal4** – Maximizar a área de cobertura do tronco do soldado, sem constituir impedições para o mesmo poder realizar as suas tarefas em combate e utilizar as armas coletivas da subunidade onde está inserido;

**ReqColBal6** – Ter o mínimo de peso; respeitando os critérios de proteção;

**ReqColBal10** – Causar o mínimo de interferência na realização das tarefas de combate;

**ReqColBal29** – Os coletes de proteção balística devem ter um peso inferior a 4 kg/m<sup>2</sup> e providenciar uma proteção de nível IIIA (NIJ), ou ter um peso inferior a 5 kg/m<sup>2</sup> e uma proteção de nível III (NIJ).

**ReqColBal30** – Deve-se prever a adição de placas rígidas, quer frontais, quer traseiras nos coletes, a fim de proteger os órgãos vitais. Desta forma os coletes devem atingir a proteção nível IV (NIJ), com um peso máximo de 25 kg/m<sup>2</sup>;

**ReqColBal31** – As placas rígidas devem ser facilmente colocadas e removíveis, de modo a que o soldado consiga colocar e retirar a placa frontal sem ajuda;

Conjugando os requisitos anteriores obtém-se os Requisitos dos Ensaio Balísticos.

O ReqColBal1 dá origem ao **ReqEnsBal1**, providenciar proteção balística contra o tipo de ameaça utilizado.

O ReqColBal10 e RecColBal31 dão origem ao **RecEnsBal2**, os painéis serem de fácil colocação e remoção, causando o mínimo de constrangimento ao combatente nas suas tarefas de combate.

O RecColBal4, RecColBal6 e RecColBal29, dão origem ao **RecEnsBal3**, providenciar proteção nível II (NIJ), maximizando a área de cobertura do tronco do Soldado, com peso inferior a 4 kg/m<sup>2</sup>. O facto de se ter escolhido o nível de proteção II (NIJ) em vez do nível de proteção IIIA (NIJ), deve-se à ameaça

ser um projétil de 9mm, com um peso de +/- 8g e a sua velocidade inicial ser de +/- 400 m/s, ou seja, estas características dizem respeito ao nível de proteção II (NIJ).

O RecColBal4, RecColBal6 e RecColBal30 dão origem ao **RecEnsBal4**, providenciar proteção de nível III (NIJ), maximizando a área de cobertura do tronco do soldado, prevendo a adição de placas rígidas, a fim de proteger os órgãos vitais, com um peso inferior a 25 kg/m<sup>2</sup>. O facto de se ter escolhido o nível de proteção III (NIJ), deve-se à ameaça escolhida ser um projétil de 7,62mm, com um peso de 9,45g e a sua velocidade inicial ser de 837 m/s, o que quer dizer, que estas características dizem respeito ao nível de proteção III (NIJ).

No caso dos **RecEnsBal3** e do **RecEnsBal4** foram escolhidos o peso de proteção máximo do nível de proteção acima, uma vez que os ensaios balísticos realizados serem de carácter exploratório, com o intuito de saber quais os materiais passíveis de serem utilizados na proteção balística.

Na figura 5.1, está representado o diagrama da evolução dos **ReqColBal** para os **RecEnsBal** elaborado pelo Aspirante de Infantaria Ferreira.

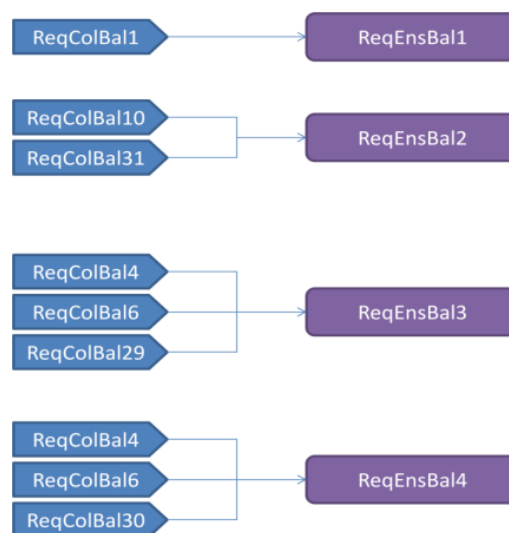


Figura 5.1 – Requisitos dos ensaios balísticos.

### 5.3 Medidas de Segurança Implementadas

Na realização de qualquer sessão de tiro é necessário ter sempre em consideração as normas de segurança. A segurança em infraestruturas de tiro classifica-se em dois tipos: a segurança interior e exterior. A primeira, é o conjunto de medidas destinadas à execução de fogos reais sem perigo para o pessoal e animais, instalações e bens de qualquer outra natureza no interior da infraestrutura de tiro, a segunda aplica-se as mesmas medidas da primeira com a diferença de ser no exterior da infraestrutura de tiro.

Inicialmente começou-se por determinar a zona perigosa, ou seja, o espaço tridimensional a partir da posição de tiro que pode ser atingido pelos projéteis ou fragmentos provenientes da arma. Além da determinação da zona perigosa, determinou-se também uma zona de interdição, isto é, a Carreira de Tiro estava interdita, exceto aos envolvidos nos ensaios.

Antes da execução dos ensaios, são necessárias as seguintes medidas de segurança em Carreira de Tiro: a presença do Oficial ou Sargento de Tiro; a Carreira de Tiro deve estar completamente desimpedida; a bandeira da Carreira de Tiro deve estar içada; acionar um sinal sonoro antes de iniciar o tiro, e haver uma equipa de saúde no local.

Durante a execução de todos os ensaios balísticos apenas o atirador e os responsáveis pelos ensaios balísticos se encontravam junto do abrigo de proteção



Figura 5.2 – Abrigo de proteção.

A zona de interdição manteve-se ao longo de toda a sessão de tiro, no entanto a zona perigosa variou, inicialmente foi estabelecida até a linha dos 50 metros, ou seja 40 metros atrás da linha da arma. Quando o tiro foi executado a 50 metros e a 100 metros, os restantes participantes dos ensaios estavam atrás da linha dos 100 metros.

Foram ainda tomadas outras medidas de segurança: a disponibilização de supressores de ruídos para todos os participantes nos ensaios de proteção balística; o atirador e os responsáveis pela condução dos ensaios balísticos estavam com colete e capacete proteção balística vestidos, bem como óculos de proteção, uma vez que estiveram sempre perto da arma.

#### **5.4 Preparação das Infraestruturas e Instalação dos Ensaios**

Os ensaios balísticos realizados neste trabalho foram realizados na Carreira de Tiro nº1 da Escola das Armas, localizada em Mafra.

Para a fixação dos materiais foi utilizado um suporte existente em Mafra, onde já tinham sido testados outros materiais anteriormente, no entanto este suporte permite fixar apenas painéis com a dimensão de 0.5x0.5 metros. Na figura seguinte é possível visualizar o suporte de fixação.

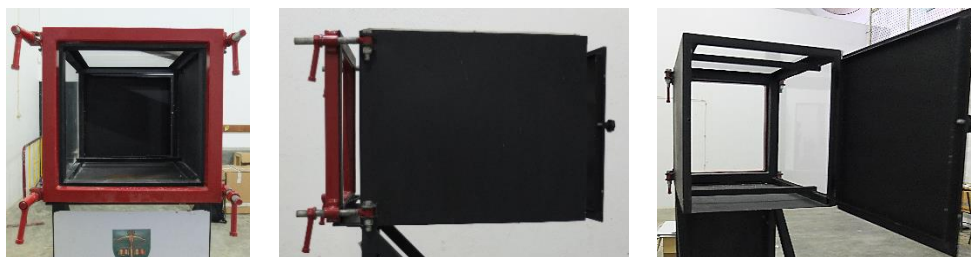


Figura 5.3 – Suporte de fixação dos painéis.

Uma vez que as dimensões de fixação de painéis são um pouco elevadas, e tendo em conta o custo dos materiais utilizados, houve a necessidade de construir um adaptador metálico para que fosse possível serem testados painéis com uma menor dimensão e assim rentabilizar o custo face ao número de ensaios realizados. O adaptador metálico foi produzido nas Oficinas Gerais de Material de Engenharia (OGME). Este foi produzido a partir de uma porta de aço blindado de uma viatura inoperacional e consiste numa chapa de dimensões 0.5x0.5 metros que permite a sua fixação no suporte. No centro deste, foi realizado um corte quadrangular e quatro furos para introdução de parafusos que permitem a fixação dos painéis de dimensão mais reduzida entre o adaptador metálico e uma moldura também produzida a partir de aço blindado, como mostra a figura 5.4.



Figura 5.4 – Adaptador metálico para fixação dos painéis.

Todas as munições e painéis balísticos, quer compósitos, quer os de alumínio estavam junto do abrigo de proteção, onde se encontravam os responsáveis pelos testes balísticos.

Na linha dos 50 metros preparou-se também o reparo para colocar a Espingarda Automática G3. Após estes procedimentos, foi preparada a Carreira de Tiro, mais especificamente foram aplicadas as medidas de segurança anteriormente referidas.

Como todos os procedimentos de preparação das infraestruturas e da instalação de ensaios executados foram realizados para os 10 metros, iniciaram-se os ensaios balísticos a esta distância. Quando se passou para a linha de 50 metros, houve a necessidade de transportar o abrigo de proteção para junto do reparo da arma, sendo executado o mesmo procedimento para o tiro a 100 metros.

## 5.5 Resultados dos Ensaio

Antes de apresentar os resultados, importa referir que os ensaios balísticos têm como objetivo determinar as características de resistência a ameaças balísticas de um certo painel ou equipamento. Os testes balísticos podem ser realizados de acordo com duas orientações:

**Ameaça:** é definida uma ameaça específica e os equipamentos têm que apresentar características satisfatórias apenas para a arma e projétil pré-definidos.

**Proteção:** é definido um nível de proteção e os equipamentos têm que apresentar características satisfatórias para todas as energias e densidades de energia inferiores às especificadas pelo nível de proteção.

Para o caso dos ensaios balísticos executados as ameaças foram:

- A Pistola Walther P38 mm m/961 utilizando um projétil de 9 mm, com um peso de +/- 8g e a sua velocidade inicial ser de +/- 400 m/s.
- A Espingarda Automática G3 utilizando um projétil de 7,62 mm, com um peso de 9,45g e a sua velocidade inicial ser de 837 m/s.

Como referido anteriormente, antes de executar um ensaio balístico, é necessário definir a sua categoria, a classe e o objetivo. Os ensaios balísticos foram executados a painéis compósitos e de alumínio, desse modo são considerados hard armour, é também necessário definir a zona de impacto e o número de impactos por painel. Tendo em conta que as duas ameaças utilizadas foram a Pistola Walther e a Espingarda Automática G3 a classe dos projéteis foram A1 e A5 de cada arma respetivamente.

O objetivo destes ensaios é verificar os Requisitos do Ensaio Balísticos levantados bem como as perfurações provocadas pelos projéteis nos materiais e ainda as deformações nos materiais.

### Ensaio Balístico Nº1

O Ensaio Balístico Nº1 foi realizado a um painel balístico compósito (painel 0101), o lado de entrada do projétil era fibra de Kevlar® e o lado de saída do projétil era fibra de carbono, este painel apresentava um peso de 16,13 kg/m<sup>2</sup>. Para este ensaio foi realizado um impacto, este não foi válido devido ao facto de não estar a 30 mm do ponto de fixação. No entanto a penetração foi completa, pois o projétil atravessou completamente o alvo.

Na tabela 5.2 e figura 5.5 são apresentados os resultados do ensaio.

Tabela 5.2 – Resultados do ensaio balístico nº 1.

Ensaio	Tipo e Número de painel	ReqEnsBal				Tipo de Falha
		1	2	3	4	
1	1 Painel Compósito	X	S	X	X	Perfuração completa

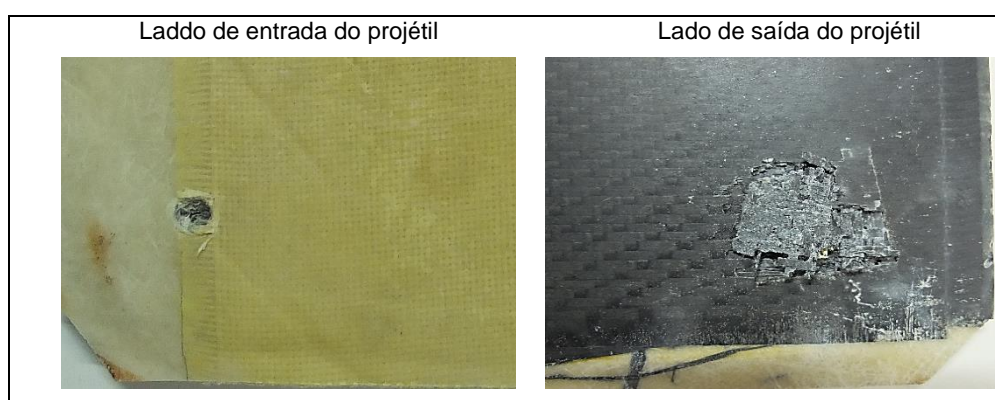


Figura 5.5 – Danos provocados pelo projétil.

### Ensaio Balístico Nº2

O Ensaio Balístico Nº2 foi realizado a um painel balístico compósito (painel 0201), o lado de entrada do projétil era fibra de Kevlar® e o lado de saída do projétil era fibra de carbono, este painel apresentava um peso de 16,63 kg/m<sup>2</sup>. Para este ensaio foi realizado um impacto em que a penetração foi completa. Como objetivos do ensaio além de se pretender verificar os ReqEnsBal levantados, também se queria confirmar se apenas um painel compósito utilizado como blindagem é suficiente ou não para reter o projétil, já que o ensaio anterior foi não válido devido à proximidade do impacto à moldura de fixação.

Na tabela 5.3 e na figura 5.6 são apresentados os resultados do ensaio.

Tabela 5.3 – Resultados do ensaio balístico nº2.

Ensaio	Tipo e Número de painel	ReqEnsBal				Tipo de Falha
		1	2	3	4	
2	1 Painel Compósito	X	S	X	X	Perfuração completa



Figura 5.6 – Danos provocados pelo projétil.

### Ensaio Balístico Nº3

À semelhança dos Ensaios Balísticos Nº1 e Nº2, o Ensaio Balístico Nº3 foi também utilizado apenas um painel balístico compósito (painel 0301), o lado de entrada do projétil era Fibra de Kevlar® e o lado de saída do projétil era Fibra de Carbono, este painel apresentava um peso de 16,00 kg/m<sup>2</sup>. Para este ensaio foram realizados três impactos em que a penetração foi completa nos três, pois os projéteis atravessaram completamente o alvo. No entanto, o terceiro impacto não é válido pois encontra-se a 16 mm do impacto nº1 e era necessário estar pelo menos a 30 mm. O objetivo deste ensaio era verificar as deformações causadas pelos três impactos no lado de saída dos projéteis, bem como responder aos ReqEnsBal. No que diz respeito à deformação, é possível verificar nas figuras que houve uma perda de material muito superior do que nos ensaios anteriores, no entanto seria ideal se os impactos tivessem sido num padrão de triângulo e terem respeitado a distância de 30mm uns dos outros.

Na tabela 5.4 e na figura 5.7 são apresentados os resultados do ensaio.

Tabela 5.4 – Resultados do ensaio balístico nº3.

Ensaio	Tipo e Número de painel	ReqEnsBal				Tipo de Falha
		1	2	3	4	
3	1 Painel Compósito	X	S	X	X	Perfuração completa

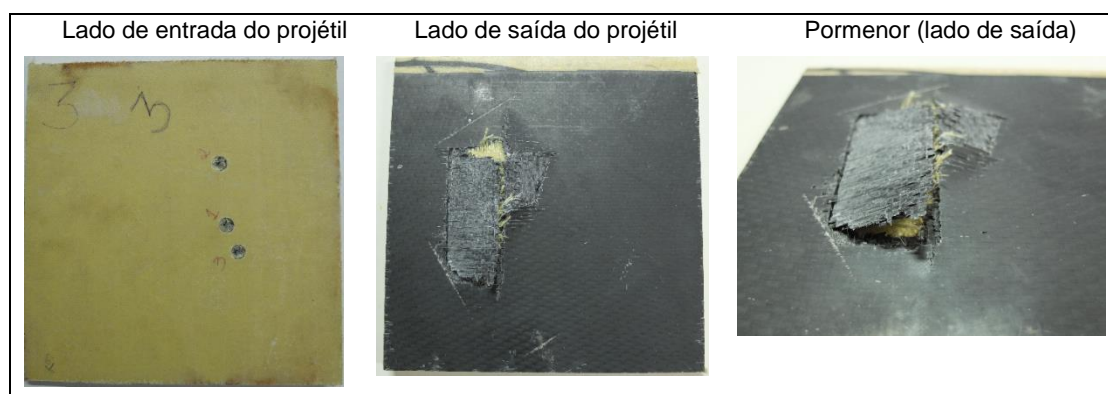


Figura 5.7 – Danos provocados pelo projétil.

#### Ensaio Balístico Nº 4

O Ensaio Balístico Nº4 foi realizado a dois painéis compósitos (painel 0401 e painel 0501) colocados em série, o lado de entrada do projétil era fibra de Kevlar® e o lado de saída do projétil era fibra de carbono, estes painéis apresentavam um peso total de 31,25 kg/m<sup>2</sup>. Para este ensaio foi realizado um impacto em que o primeiro painel (painel 0401) sofreu uma perfuração parcial, apresentando apenas pequenas fissuras no lado de saída do projétil, o segundo painel (painel 0501) não foi perfurado, nem apresentou dano em nenhum dos lados.

Na tabela 5.5 e figura 5.8 (apenas o painel 0401) são apresentados os resultados do ensaio.

Tabela 5.5 – Resultados do ensaio balístico nº4.

Ensaio	Tipo e Número de painel	ReqEnsBal				Tipo de Falha
		1	2	3	4	
4	2 Painéis Compósitos	S	S	X	X	Perfuração parcial do painel 0401

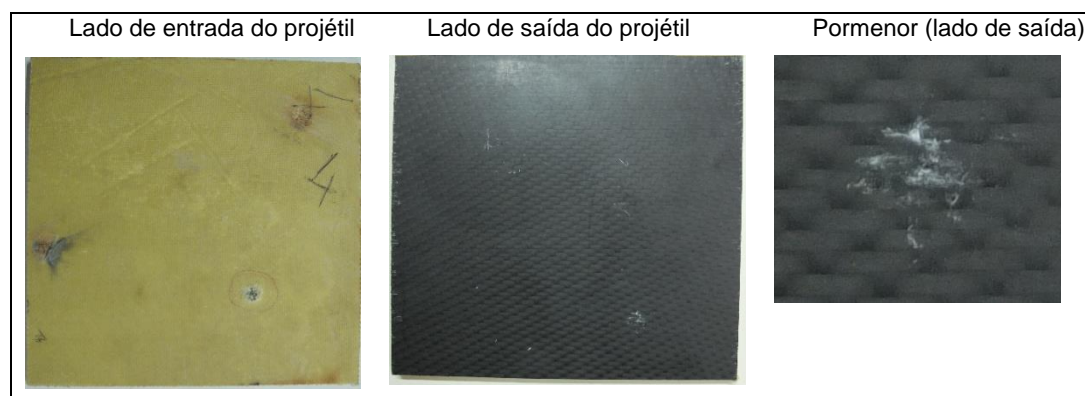


Figura 5.8 – Danos provocados pelo projétil no painel 0401.

#### Ensaio Balístico Nº5

O Ensaio Balístico Nº5 foi realizado a dois painéis compósitos (painel 0601 e painel 0501) colocados em série, o lado de entrada do projétil era fibra de Kevlar® e o lado de saída do projétil era fibra de carbono, estes painéis apresentavam um peso total de 33,25 kg/m<sup>2</sup>. Para este ensaio foram realizados primeiramente três impactos, após estes, verificou-se que um dos impactos colidiu com a moldura de fixação. Assim sendo fez-se mais um disparo para haver outro impacto, no entanto também este não foi válido porque encontrava-se a 14 mm do 1º impacto, ou seja, a menos de 30 mm. O primeiro painel (painel 0601) sofreu penetração parcial em todos os impactos, apresentando apenas pequenas fissuras no lado oposto à entrada do projétil. O segundo painel (painel 0501) não foi perfurado, nem apresentou danos em nenhum dos lados. Como o painel 0501 não apresentou qualquer tipo de dano no ensaio balístico nº4, utilizou-se pela segunda vez com o objetivo de maximizar o número de ensaios balísticos. O objetivo deste ensaio era responder aos ReqEnsBal, bem como saber o comportamento de dois painéis compósitos juntos no caso de serem efetuados mais impactos.

Na tabela 5.6 e figura 5.9 (apenas o painel 0601) são apresentados os resultados do ensaio.

Tabela 5.6 – Resultados do ensaio balístico nº5.

Ensaio	Tipo e Número de painel	ReqEnsBal				Tipo de Falha
		1	2	3	4	
5	2 Painéis Compósitos	S	S	X	X	Perfuração parcial do painel 0601

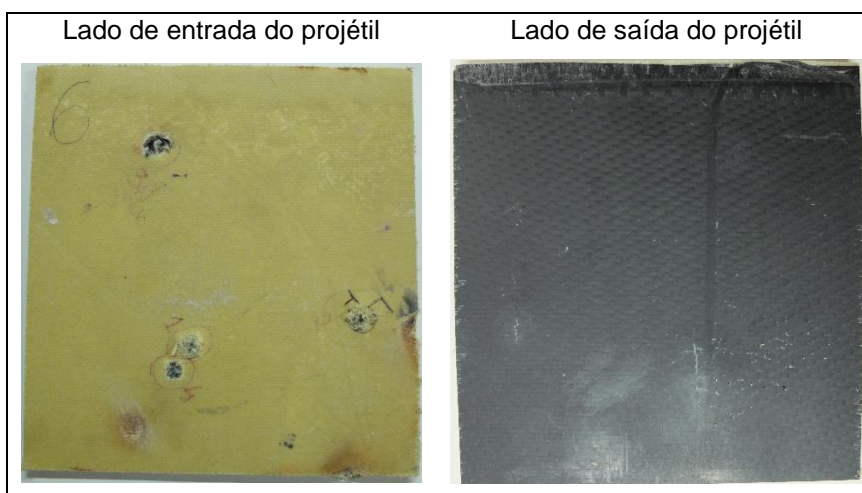


Figura 5.9 – Danos provocados pelos projéteis no painel 0601.

### Ensaio Balístico Nº6

O Ensaio Balístico Nº6 foi realizado a um painel de alumínio (painel 0102), este painel apresentava um peso de 11,83 kg/m<sup>2</sup>. Para este ensaio foi realizado um impacto, o qual resultou de uma perfuração total. O objetivo deste ensaio era responder aos ReqEnsBal.

Na tabela 5.7 e na figura 5.10 estão representados os resultados do ensaio.

Tabela 5.7 – Resultados do ensaio balístico nº5

Ensaio	Tipo e Número de painel	ReqEnsBal				Tipo de Falha
		1	2	3	4	
6	1 Painel de Alumínio	X	S	X	X	Perfuração completa

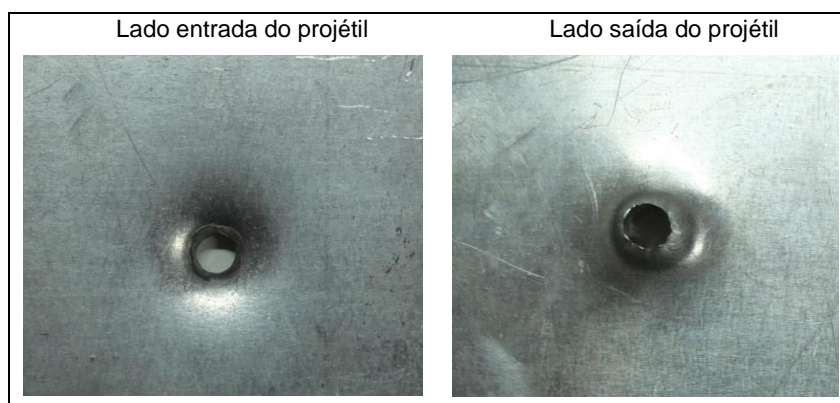


Figura 5.10 – Danos provocados pelo projétil.

### Ensaio Balístico N°7

O Ensaio Balístico N°7 foi realizado a dois painéis colocados em série, o primeiro era um painel compósito (painel 0701) e o segundo era um painel de alumínio (0202). O lado de entrada do projétil era Fibra de Kevlar® e o lado de saída do projétil era alumínio, estes painéis apresentavam um peso total de 27,83 kg/m<sup>2</sup>. Para este ensaio foi realizado um impacto, o primeiro painel (painel 0701) sofreu uma perfuração parcial, apresentando apenas pequenas fissuras no lado de saída do projétil.

O segundo painel (painel 0202) não foi perfurado, no entanto apresentou uma ligeira deformação como é possível verificar na imagem. O objetivo deste ensaio era responder aos ReqEnsBal, bem como avaliar o comportamento de materiais com características mecânicas diferentes.

Na tabela 5.8 e na figura 5.11 estão representados os resultados do ensaio.

Tabela 5.8 – Resultados do ensaio balístico n°7.

Ensaio	Tipo e Número de painel	ReqEnsBal				Tipo de Falha
		1	2	3	4	
7	1 Painel Compósito e 1 Painel de Alumínio	S	S	X	X	Perfuração parcial do painel 0701



Figura 5.11 – Danos provocados pelo projétil.

### Ensaio Balístico N°8

O Ensaio Balístico N°8 foi realizado a dois painéis colocados em série, o primeiro era um painel compósito (painel 0701) e o segundo era um painel de alumínio (0202). O lado de entrada do projétil era fibra de Kevlar® e o lado de saída do projétil era alumínio, estes painéis apresentavam um peso total de 27,83 kg/m<sup>2</sup>. Neste ensaio e nos próximos foi utilizada uma ameaça superior à utilizada nos ensaios anteriores, ou seja foi utilizada a Espingarda Automática G3, o objetivo deste ensaio e dos seguintes para além de responder os ReqEnsBal, foram realizados com o intuito de perceber como os materiais se iriam comportar com esta ameaça de energia superior, bem como aferir se a utilização do reparo para esta arma garantia uma boa precisão do impacto dos projéteis no alvo, uma vez que o tiro foi realizado a 50 metros e os alvos tinham dimensões reduzidas. Como o recurso de materiais disponíveis eram reduzidos, foram utilizados alguns painéis anteriormente já testados. Neste ensaio foram utilizados os mesmos materiais do Ensaio Balístico N°7 para haver uma maximização do número de resultados. Em ambos os painéis houve perfuração completa. Na tabela 5.9 e figura 5.12 estão representados os resultados do ensaio.

Tabela 5.9 – Resultados do ensaio balístico nº8

Ensaio	Tipo e Número de painel	ReqEnsBal				Tipo de Falha
		1	2	3	4	
8	1 Painel Compósito e 1 Painel de Alumínio	X	S	X	X	Perfuração completa

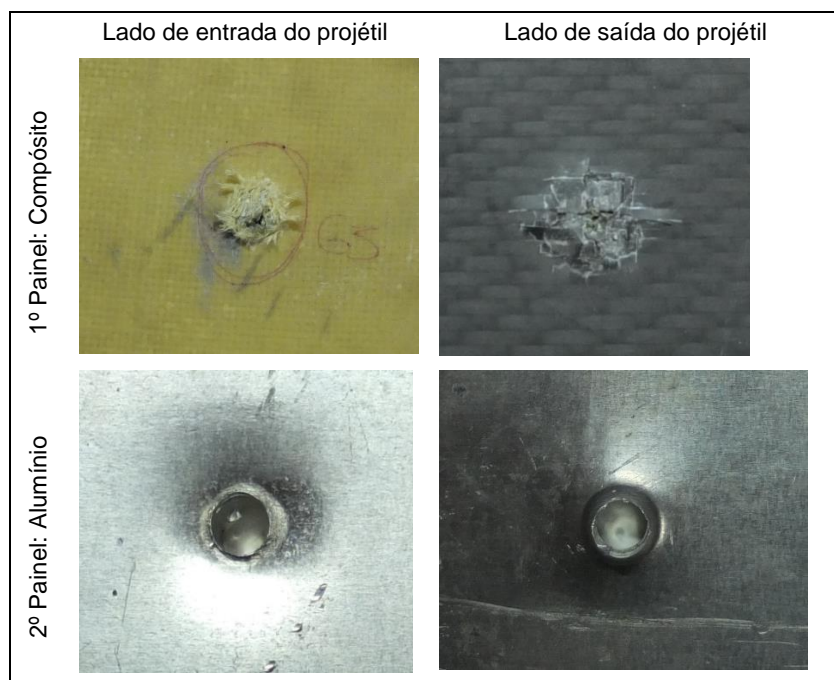


Figura 5.12 – Danos provocados pelo projétil.

### Ensaio Balístico Nº9

O Ensaio Balístico Nº9 foi realizado a dois painéis compósitos (painel 0501 e painel 0801) em série o lado de entrada do projétil era fibra de Kevlar® e o lado de saída do projétil era fibra de carbono, estes painéis apresentavam um peso total de 29,63 kg/m<sup>2</sup>. Em ambos os painéis houve perfuração completa. Na tabela 5.10 e na figura 5.13 estão representados os resultados do ensaio.

Tabela 5.10 – Resultados do ensaio balístico nº9.

Ensaio	Tipo e Número de painel	ReqEnsBal				Tipo de Falha
		1	2	3	4	
9	2 Painéis Compósitos	X	S	X	X	Perfuração completa

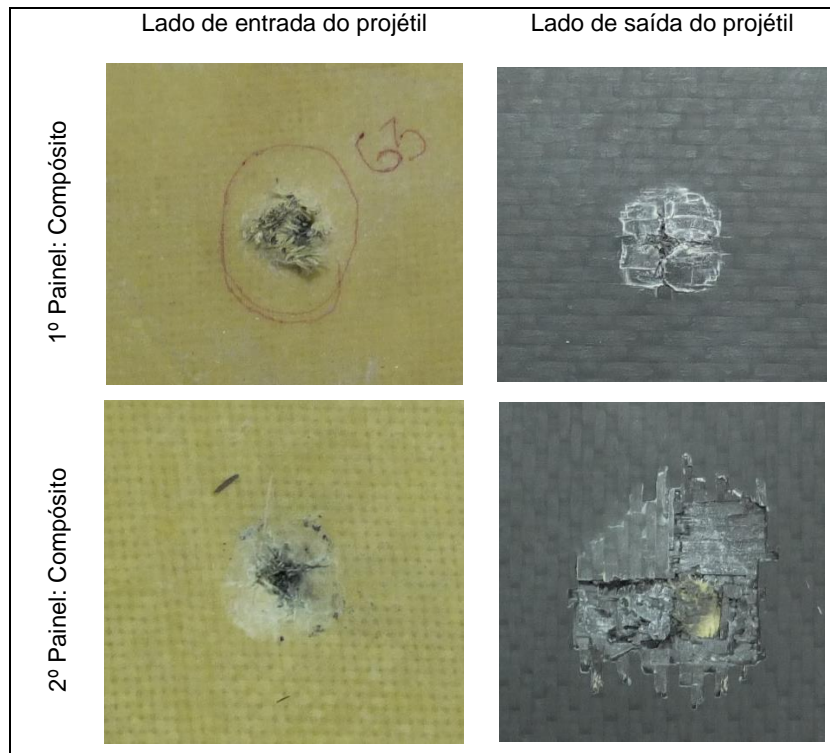


Figura 5.13 – Danos provocados pelo projétil no painel 0501 e no painel 0801.

### Ensaio Balístico Nº10

O Ensaio Balístico Nº10 foi realizado a três painéis colocados em série, o primeiro era um painel de alumínio (painel 0302), o segundo era um painel compósito (painel 0901) e o terceiro era também um painel compósito (painel 1001). Deste modo, o lado de entrada do projétil era alumínio e o lado de saída do projétil era fibra de carbono, estes painéis apresentavam um peso total de 44,09 kg/m<sup>2</sup>. Nos três painéis houve perfuração completa. O objetivo deste ensaio era responder aos ReqEnsBal, bem como observar os resultados obtidos com um painel de alumínio em primeiro lugar, pois ainda não tinha sido testado.

Na tabela 5.11 e figura 5.13 estão representados os resultados do ensaio.

Tabela 5.11 – Resultados do ensaio balístico nº10.

Ensaio	Tipo e Número de painel	ReqEnsBal				Tipo de Falha
		1	2	3	4	
10	2 Painéis Compósitos e 1 Painel de Alumínio	X	X	X	X	Perfuração completa

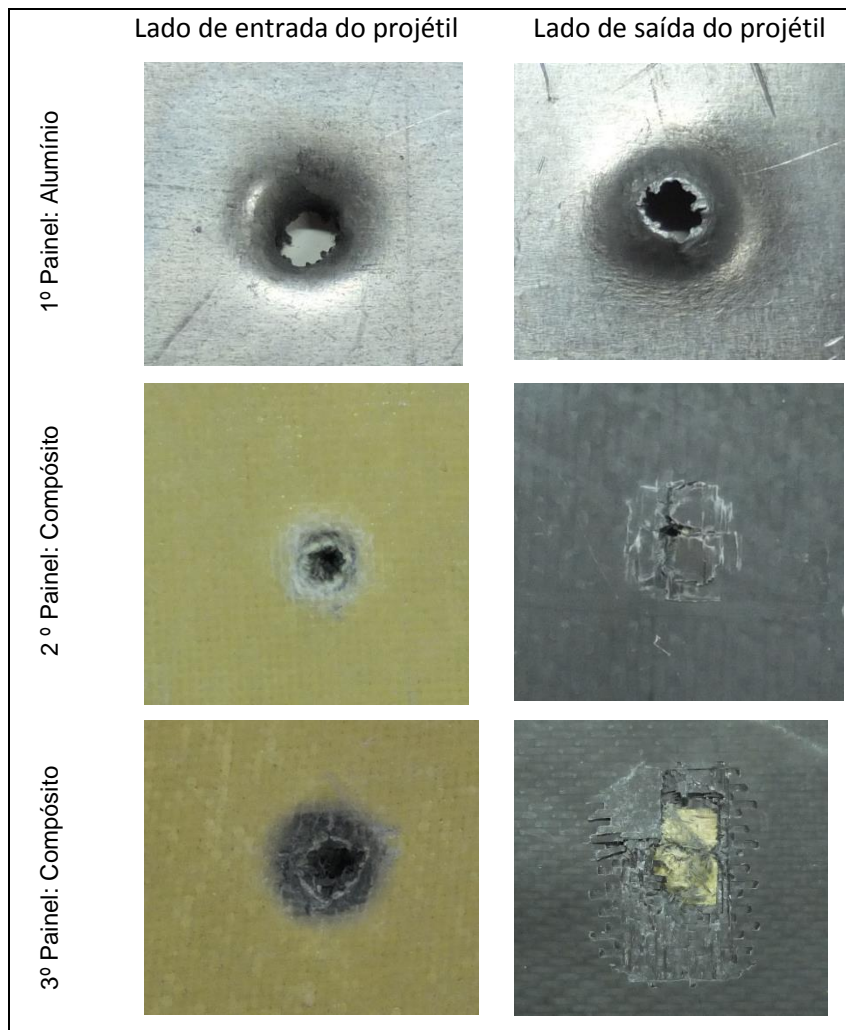


Figura 5.13 – Danos provocados pelo projétil nos painéis 0302, 0901 e 1001.

### Ensaio Balístico Nº11

O Ensaio Balístico Nº11 foi realizado a quatro painéis, o primeiro era um painel de alumínio (painel 0302), o segundo era um painel compósito (painel 0901), o terceiro era um painel de alumínio (painel 0401) e o quarto era de novo um painel compósito (painel 1001). Neste ensaio foram utilizados os mesmos painéis do Ensaio Balístico Nº10 com o acréscimo do painel de alumínio (0401). Neste caso, o lado de entrada do projétil era alumínio e o lado de saída do projétil era fibra de carbono, estes painéis apresentavam um peso total de 55,92 kg/m<sup>2</sup>. Neste ensaio a espingarda automática G3 estava a 100 metros do alvo.

Na tabela 5.12 estão representados os resultados do ensaio.

Tabela 5.12 – Resultados do ensaio balístico nº11.

Ensaio	Tipo e Número de painel	ReqEnsBal				Tipo de Falha
		1	2	3	4	
11	2 Painéis Compósitos e 2 Painéis de Alumínio	X	X	X	X	Perfuração completa

Na tabela seguinte está exposto um resumo dos resultados de todos os ensaios anteriormente enunciados. Se o leitor pretender visualizar os detalhes de cada ensaio, ou seja os detalhes de cada painel utilizado nos ensaios pode encontra-los no Apêndice D.

Tabela 5.14 – Resumo dos resultados obtidos de todos os ensaios realizados.

Ensaio	Nº de impactos	Tipo e Número de painel	ReqEnsBal				Tipo de Falha
			1	2	3	4	
<b>Ameaça: Projétil 9mm</b>							
1	1	1 Painel Compósito	X	S	X	X	Perfuração completa
2	1	1 Painel Compósito	X	S	X	X	Perfuração completa
3	3	1 Painel Compósito	X	S	X	X	Perfuração completa
4	1	2 Painéis Compósitos	S	S	X	X	Perfuração parcial do painel 0401
5	4	2 Painéis Compósitos	S	S	X	X	Perfuração parcial do painel 0601
6	1	1 Painel de Alumínio	X	S	X	X	Perfuração completa
7	1	1 Painel Compósito e 1 Painel de Alumínio	S	S	X	X	Perfuração parcial do painel 0701
<b>Ameaça: Projétil 7,62mm</b>							
8	1	1 Painel Compósito e 1 Painel de Alumínio	X	S	X	X	Perfuração completa
9	1	2 Painéis Compósitos	X	S	X	X	Perfuração completa
10	1	2 Painéis Compósitos e 1 Painel de Alumínio	X	X	X	X	Perfuração completa
11	1	2 Painéis Compósitos e 2 Painéis de Alumínio	X	X	X	X	Perfuração completa



## 6 Simulações Numéricas

Este capítulo tem como objetivo modelar os elementos balísticos que foram utilizados nos ensaios de tiro real, ou seja com estas simulações pretende-se modelar o projétil de 9mm e, os alvos, materiais compósitos e placas de alumínio através do método dos elementos finitos (MEF) no *software* Abaqus.

Neste capítulo será feita uma breve exposição sobre o MEF, a introdução à plataforma do software, a exposição das equações constitutivas para modelar os materiais envolvidos nesta análise e no final uma comparação entre os ensaios reais e os resultados das simulações.

Nos fenómenos de impactos balísticos existem muitos aspetos a ter em consideração, no entanto para efeitos de comparação o principal parâmetro que se pretende analisar é a perfuração total, parcial ou a não perfuração dos alvos.

### 6.1 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é um poderoso método matemático de análise e resolução, quase sempre aproximada, de problemas científicos e de engenharia.

As abordagens numéricas (isto é, aproximadas) a problemas de engenharia são necessárias (e muitas vezes as únicas possíveis), pois, na maioria das situações, os métodos analíticos não conseguem dar resposta satisfatória à resolução de problemas reais complexos.

A aplicação do MEF a problemas realistas de engenharia, frequentemente complexos, exige, muitas vezes, a disponibilidade de meios computacionais significativos. Deste modo percebe-se que o desenvolvimento do próprio método dos elementos finitos tenha vindo a acontecer de acordo com o aumento da disponibilidade tecnológica e da capacidade de cálculo destes mesmos meios digitais.

Como ferramenta auxiliar de projeto em problemas de engenharia, o método dos elementos finitos pode ser encarado de duas perspetivas completamente distintas: (i) o ponto de vista do utilizador, que recorre ao uso de um programa comercial de simulação numérica baseado no MEF para resolver problemas de engenharia e (ii) o ponto de vista do programador, que desenvolve o programa propriamente dito.

O MEF é essencialmente, uma metodologia estratificada. Pode ser aplicado à resolução de problemas unidimensionais, mas, mais frequentemente, pretende-se determinar a solução numa área ou volume tridimensional genérico. Em qualquer um destes casos, deve representar-se o domínio do sistema a analisar ou uma simplificação viável. Numa primeira fase, e dependendo do tipo do problema a resolver, esse domínio que se pretende estudar é dividido num número finito de segmentos, áreas ou volumes mais pequenos, designados por elementos finitos. Esta tarefa designa-se por discretização (Teixeira-Dias *et al*, 2010).

Na figura 6.1 mostra-se uma representação esquemática do processo de discretização de um domínio de elementos finitos.

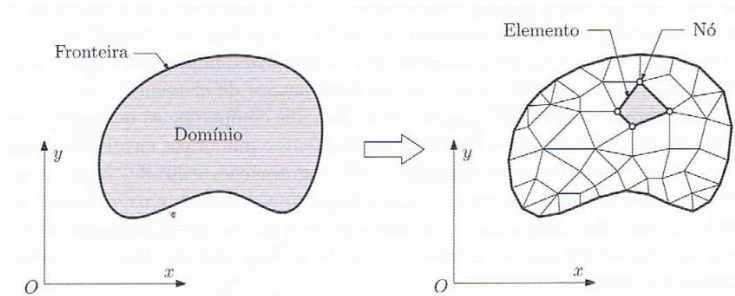


Figura 6.1 – Discretização de um domínio de elementos finitos (Teixeira-Dias *et al*, 2010).

Para resolver problemas unidimensionais (ou constituídos por componentes unidimensionais) recorre-se a elementos finitos em forma de segmentos. No caso de problemas bidimensionais, os elementos são frequentemente quadriláteros ou triângulos. Em análises tridimensionais estes são geralmente hexaedros, tetraedros ou pentaedros.

A primeira variável a determinar numa análise pelo MEF é, frequentemente, o campo de deslocamentos de um número finito de pontos do sistema. Estes pontos designam-se por nós da malha de elementos finitos. Os nós encontram-se normalmente nos vértices dos elementos.

Porém, dependendo do tipo de formulação de elemento finito utilizada, podem existir nós a meio das suas arestas, nas suas faces ou ainda no seu interior.

Assim, através da análise numérica efetuada com o MEF calculam-se, numa primeira fase, os deslocamentos nos nós para um carregamento particular aplicado ao domínio a analisar, subsequentemente o deslocamento de cada ponto do elemento finito pode ser determinado por interpolação dos valores dos deslocamentos dos nós desse mesmo elemento, isto é, por interpolação dos deslocamentos nodais.

Deste modo, torna-se possível substituir o problema de determinar o deslocamento de um número infinito de pontos de um domínio contínuo pelo cálculo dos deslocamentos de um número finito de pontos – os nós da malha de elementos finitos. O deslocamento de qualquer outro ponto pode assim ser definido em função dos deslocamentos dos nós do elemento a que o ponto pertence.

Quando se utiliza um programa de simulação pelo MEF, de um modo genérico, é necessário passar por três estágios distintos: a fase de pré-processamento, a fase de análise e a fase de pós-processamento (Teixeira-Dias *et al*, 2010).

## 6.2 Software Abaqus

O software Abaqus foi desenvolvido por Hibbit, Karrison e Sorensoen, Inc. Foi o primeiro programa de elementos finitos a introduzir uma ferramenta que permitia aos utilizadores adicionar elementos e materiais aos modelos.

Abaqus é um conjunto de programas de engenharia baseado no MEF, que tem a capacidade de resolver desde problemas relativamente simples de análises lineares até simulações não lineares.

O Abaqus/Cae é a plataforma gráfica interativa do Abaqus, Nesta plataforma são definidas as propriedades do material, a sua geometria, as condições de carregamento, regiões de fronteira, a colocação do modelo para análise e a visualização dos resultados.

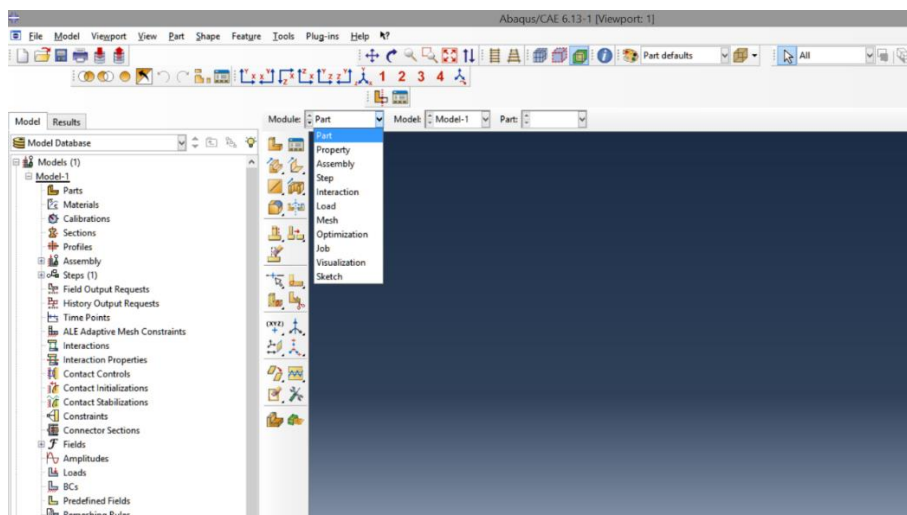


Figura 6.2 – Plataforma gráfica interativa do Abaqus.

Na figura 6.2 pode-se visualizar a plataforma Abaqus/Cae onde se realizam todas as etapas das simulações. Todas as etapas da simulação vão ser descritas pormenorizadamente, no entanto vai ser realizada uma exposição sucinta de cada um dos principais comandos da plataforma.

Inicialmente cria-se a geometria que se pretende dos materiais no comando *part*, posteriormente atribuem-se as propriedades dos materiais selecionados no comando *property*.

Após ter a geometria dos materiais e atribuição do respetivo do material, no comando *assembly*, “juntam-se” os intervenientes da simulação: projétil e alvo.

No comando *interaction* são definidas as interações entre o projétil e o alvo, no comando *load* são definidos os carregamentos, condições de fronteira e também a velocidade do projétil. No comando *mesh* é definida a malha de cada *part* criada.

Finalmente após estar tudo realizado, no comando *job* submete-se a simulação para o programa analisar, caso este não identifique erros graves na simulação os resultados da mesma podem ser visualizados com o comando *visualisation*.

### 6.3 Considerações Iniciais

Antes de apresentar os passos pormenorizados das simulações efetuadas, importa reter alguns aspetos importantes. As simulações realizadas neste trabalho realizaram-se apenas com o projétil de 9mm, pois foi onde se obteve a maior diversidade de resultados em termos de perfuração, os ensaios selecionados para serem reproduzidos no *software* foram os seguintes:

- Ensaio N<sup>o</sup> 4 – Alvo: Material Compósito;
- Ensaio N<sup>o</sup>5 – Alvo: 2 painéis compósitos;
- Ensaio N<sup>o</sup>6 – Alvo: Alumínio;
- Ensaio N<sup>o</sup>7 – Alvo: Compósito + Alumínio.

## Propriedades dos Materiais

Em relação aos materiais do projétil, munição de 9mm *parabellum*, segundo o estudo realizado pela Polícia Judiciária e que foi descrito no Capítulo 4, os materiais são:

- Revestimento: espessura (650 micron), 95% Cobre e 5% Zinco;
- Núcleo: Chumbo.

Em relação aos alvos (alumínio e compósitos), o alumínio utilizado foi a liga 6061-T6, enquanto os materiais compósitos são constituídos por uma matriz epoxídica e por fibras de Kevlar®, carbono e vidro.

Uma das grandes dificuldades deste trabalho foi encontrar na literatura as propriedades dos materiais envolvidos tendo em consideração os modelos constitutivos dos materiais presentes no *software*.

Para os materiais metálicos o modelo de Johnson-Cook está implementado no Abaqus, tanto o modelo para a plasticidade como para a fratura. Logo a pesquisa foi realizada no sentido de encontrar os materiais caracterizados segundo as necessidades desse modelo.

Para o revestimento do projétil considerou-se todo de cobre uma vez que apresenta uma percentagem muito elevada.

Estas propriedades foram retiradas de outras simulações já efetuadas em que na constituição dos projéteis estavam presentes os referidos materiais.

Para os materiais compósitos o modelo que se encontra implementado para modelar a sua resposta ao dano no Abaqus é o Dano de Hashin pelo que, tal como efetuado no caso dos materiais dos projéteis também se fez a pesquisa dos valores que esse modelo solicita.

## 6.4 Modelos Constitutivos

Seguidamente vai ser exposta uma explicação dos modelos constitutivos: Johnson Cook e Dano de Hashin.

### 6.4.1 Modelo de Johnson-Cook

Johnson e Cook propuseram um modelo constitutivo para os metais, que considera a influência das velocidades de deformação como a variação da temperatura.

A tensão de cedência em função da deformação, da taxa de deformação e da temperatura é dada pela seguinte expressão:

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = (A + B\varepsilon^n) \left( 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left( \left( 1 - \frac{T - T_{referência}}{T_{fusão} - T_{referência}} \right)^m \right) \quad (6.1)$$

Na equação 6.1,  $A$  representa a tensão limite de elasticidade;  $B$  constante do material;  $\dot{\varepsilon}$  velocidade de deformação equivalente;  $\dot{\varepsilon}_0$  velocidade de deformação equivalente de referência, normalmente 1 m/s;  $T_{referência}$  temperatura de referência;  $T_{fusão}$  temperatura de fusão do material.

A equação é dividida em três vertentes a primeira contabiliza os efeitos da extensão, a segunda e terceira contabiliza os efeitos da velocidade de deformação e temperatura.

### Leis de fratura do material

Para simular a fratura do material existem duas hipóteses dignas de serem consideradas e que o programa permite utilizar, a primeira, contabiliza apenas a extensão plástica equivalente à rotura, a segunda de Johnson-Cook que permite calcular a extensão de rotura em função da velocidade de deformação e variação de temperatura.

### Fractura por tensões de corte

O modelo de fratura é baseado no parâmetro de dano  $w$ , se este exceder o valor 1 a fratura ocorre e o elemento é removido da malha.

$$w = \sum \left( \frac{\Delta \varepsilon^{pl}}{\varepsilon_f^{pl}} \right) \quad (6.2)$$

Na equação 6.2,  $\Delta \varepsilon^{pl}$  representa o incremento da extensão plástica equivalente,  $\varepsilon_f^{pl}$  extensão plástica equivalente à fratura. Sendo a soma efectuada a cada incremento na análise.

A extensão plástica equivalente é uma das variáveis calculadas durante o processo.

Existem duas formas de introduzir a extensão plástica equivalente à fratura. A primeira é a introdução do parâmetro manualmente, a outra é o método do cálculo da extensão à fratura por Johnson-Cook, que também contabiliza os parâmetros da velocidade de deformação e temperatura, sendo representada por:

$$\varepsilon_f^{pl} = \left[ d_1 + d_2 \exp \left( d_3 \frac{p}{q} \right) \right] \left[ 1 + d_4 \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}} \right) \right] \left[ 1 + d_5 \left( \frac{T - T_{referência}}{T_{fusão} - T_{referência}} \right) \right] \quad (6.3)$$

A extensão plástica equivalente de fratura  $\varepsilon_f^{pl}$ , é dependente de uma adimensionalização da velocidade de deformação plástica equivalente,  $\left( \frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}} \right)$ , da adimensionalização do tensor desviador (P/q) (onde P é o estado hidrostático de pressões e q é a tensão segundo Mises) e da adimensionalização da componente de temperatura.

As variáveis  $d_1, d_2, d_3, d_4$  e  $d_5$  são os parâmetros de falha medidos abaixo da temperatura de transição.

### 6.4.2 Dano de Hashin

Para a modelação dos materiais compósitos foi utilizado o modelo de dano de Hashin que se encontra implementado no *software* Abaqus. Quando o critério de falha de Hashin é satisfeito num dado ponto do material, presume-se que os danos iniciam-se nesse mesmo ponto do compósito laminado.

Para se utilizar o critério de falha de Hashin para as deformações no plano  $x_1 - x_2$  com o eixo  $x_1$  na direcção da fibra, as seguintes expressões são definidas:

$$F_f^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^T}\right)^2 + \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{S^L}\right)^2 - 1 \quad (6.4)$$

$$F_f^c = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^C}\right)^2 - 1 \quad (6.5)$$

$$F_m^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^T}\right)^2 + \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{S^L}\right)^2 - 1 \quad (6.6)$$

$$F_m^c = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{2S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^C} + \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{S^L}\right)^2 - 1 \quad (6.7)$$

Onde,  $\hat{\sigma}$  é o tensor efetivo das tensões do laminado. A falha nas fibras irá iniciar-se em tensão ou compressão, quando  $F_f^t$  ou  $F_f^c$  se tornarem positivos, respectivamente. Do mesmo modo a falha na matriz irá iniciar-se em tensão ou compressão quando  $F_m^t$ ,  $F_m^c$  se tornarem positivos, respectivamente. Além disso  $X^T$  e  $X^C$  representam os limites de resistência longitudinais de tração e compressão do laminado e  $Y^T$ ,  $Y^C$  representam os limites de resistência transversais de tração e compressão do laminado.

As variáveis  $S^L$  e  $S^T$  representam o limite de resistência ao corte longitudinal e transversal.

Quando qualquer um dos parâmetros  $F_f^t$ ,  $F_f^c$ ,  $F_m^t$ ,  $F_m^c$  se torna positivo num ponto do material, as variáveis de dano

$$d_f = \begin{cases} F_f^t & \text{se } \hat{\sigma}_{11} \geq 0 \\ F_f^c & \text{se } \hat{\sigma}_{11} < 0 \end{cases} \quad (6.8)$$

$$d_m = \begin{cases} F_m^t & \text{se } \hat{\sigma}_{22} \geq 0 \\ F_m^c & \text{se } \hat{\sigma}_{22} < 0 \end{cases} \quad (6.9)$$

são definidas nesse mesmo ponto, e a relação constitutiva é modificada como se segue.

$$\sigma = C^d : \varepsilon \quad (6.10)$$

$$\hat{\sigma} = M\sigma \quad (6.11)$$

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-d_f)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-d_m)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_s)} \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

$$C^d = \begin{bmatrix} (1 - d_f)E_1 & (1 - d_f)(1 - d_m)v_{21}E_1 & 0 \\ (1 - d_f)(1 - d_m)v_{12}E_1 & (1 - d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - d_s)GD \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

$$d_s = 1 - (1 - F_f^t)(1 - F_f^c)(1 - F_m^t)(1 - F_m^c) \quad (6.14)$$

$$D = (1 - d_f)(1 - d_m)v_{12}v_{21} \quad (6.15)$$

Com as fibras alinhadas ao longo do eixo  $x_1$ ,  $E_1$  e  $E_2$  representam os módulos de Young nas direções da fibra e matriz, respetivamente,  $v_{12}$  e  $v_{21}$  os coeficientes de poisson,  $\hat{\sigma}$  o tensor efetivo das tensões,  $C_d$  a matriz das constantes elásticas degradadas, e  $M$  o operador de dano.

Como já foi referido no Capítulo 3, num impacto com velocidades elevadas envolvidas é também importante ter em conta as propriedades termodinâmicas do material e a resposta do mesmo à variação dessas propriedades. Assim, a utilização de uma equação de estado na descrição do modelo numérico torna-se uma ferramenta importante.

Para os elementos *Shell* a equação de estado pode ser desprezada devido à sua falta de volume, como é o caso dos materiais compósitos.

A equação de estado utilizada foi a de Mie-Gruneisen, que foi descrita no Capítulo 3.

## 6.5 Modelos Efetuados

Todo o modelo geométrico do processo de impacto foi concebido na própria interface do *software* de simulação do Abaqus.

No que toca aos materiais metálicos a sua modelação já se encontra generalizada. No entanto a modelação dos materiais compósitos é um processo algo complexo, por esse motivo optou-se por se realizar uma breve explicação sobre as hipóteses de modelação destes materiais no *software*, bem como a justificação da forma de modelação escolhida.

### Modelação dos Materiais Compósitos no Abaqus

Como já foi referido os materiais compósitos são uma mistura de pelo menos dois materiais, um deles é a matriz os outros são designados de “reforço” ou fibras.

Dependendo da finalidade da análise, podem ser utilizadas diferentes técnicas para modelar estes materiais:

**Modelação microscópica:** a matriz e o reforço são modelados separadamente;

**Modelação macroscópica:** o material compósito é modelado como um único material ortotrópico ou completamente anisotrópico;

**Modelação “mista”:** o material compósito é modelado por um número discreto de camadas, modeladas macroscopicamente, ou seja em cada camada a matriz e o reforço são modeladas como sendo um único material.

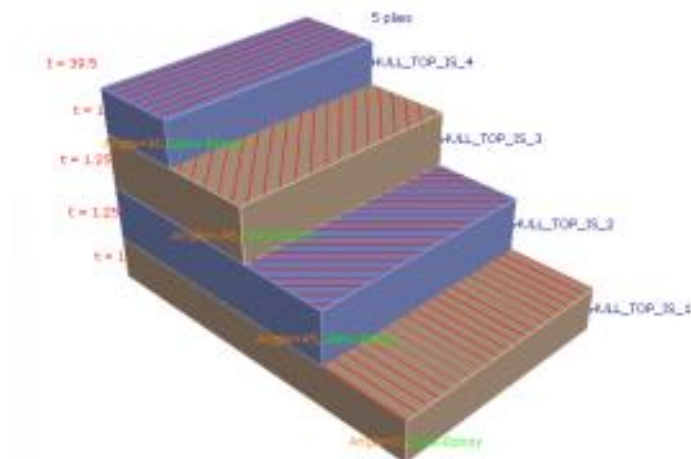


Figura 6.3 – Exemplo de uma modelação mista de compósitos laminados.

O *software* Abaqus tem implementado na sua plataforma a modelação mista.

Dentro deste tipo de modelação pode-se escolher dois tipos de abordagem no que toca ao tipo de elementos:

- Elementos *shell*;
- Elementos sólidos.

Este último tipo de elementos, elementos sólidos, só está disponível no Abaqus/Standard, ideal para obtenção de soluções estáticas e ensaios dinâmicos de baixa velocidade. Como os casos de estudo envolvem altas velocidades o uso deste tipo de elementos não foi sequer posto em consideração para este trabalho.

Dentro dos elementos Shell pode-se optar por duas opções como mostra a figura seguinte:

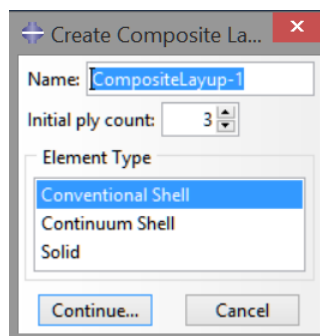


Figura 6.4 – Tipo de elementos para realizar a modelação

Podem-se optar por duas formas de análise: *conventional shell* ou por *continuum shell*. No *conventional shell* é discretizada apenas uma superfície shell de referência enquanto no *continuum shell* é discretizado um volume 3D, no entanto o comportamento cinemático do elemento é baseado na teoria *shell*.

As duas opções foram consideradas para efetuar esta análise por ambas apresentarem vantagens. A primeira opção tem como vantagem, caso o utilizador pretenda adicionar mais camadas/lâminas (*ply*)

no material como mostra na figura 6.5, o utilizador necessita apenas de adicionar o número de camadas que pretende no comando do *software composite layup* sem alterar a geometria do material compósito criado no comando *part*.

		Ply Name	Region	Material	Thickness	CSYS	Rotation Angle	Integration Points
1	✓	Ply-1				<Layup>		3
2	✓	Ply-2				<Layup>		3
3	✓	Ply-3				<Layup>		3

Figura 6.5 – Atribuição do número de lâminas e das suas características.

A segunda opção, *continuum shell*, tem a vantagem de ser criado um volume 3D do material e assim obter uma melhor visualização das deformações nas diferentes camadas, como é possível verificar na figura está representado o material compósito com 5 *ply*.

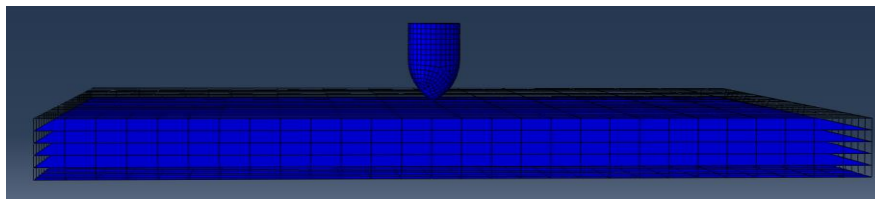


Figura 6.6 – Exemplo de modelação do material compósito *continuum shell*.

No entanto esta opção apresenta uma grande desvantagem em relação à primeira, pois neste caso quando se pretende adicionar mais camadas ao material terá que se alterar a geometria do material compósito, ou seja, é necessário realizar um número igual de partições ao material conforme o número de camadas que se definem no comando do *composite layup*. Este processo é muito moroso pois o número de camadas dos materiais utilizados são elevadas e a espessura de cada camada é muito reduzida o que dificulta ainda mais a realização deste processo. Outra grande desvantagem é devida ao tempo de simulação ser bastante elevado.

Uma vez que, como já foi referido, o objetivo destas simulações é apenas averiguar se existe perfuração dos materiais face ao impacto dos projéteis optou-se pela primeira opção: *convetional shell*.

Seguidamente vai ser exposta toda a modelação pormenorizada, através dos comandos referidos quando se fez a apresentação da plataforma Abaqus/Cae no início deste capítulo.

## Part

Neste comando foram realizadas as geometrias do alvo, com uma dimensão de 200x200mm e do projétil 650 micron de espessura para o revestimento e o restante para o núcleo.

Para obter a geometria do projétil de 9mm, separou-se o projétil do invólucro tirou-se uma fotografia ao mesmo e através do auxílio do *software SolidWorks* efetuou-se o ajuste da fotografia ao calibre do projétil e finalmente obteve-se a sua geometria de modo a ser introduzida no Abaqus.

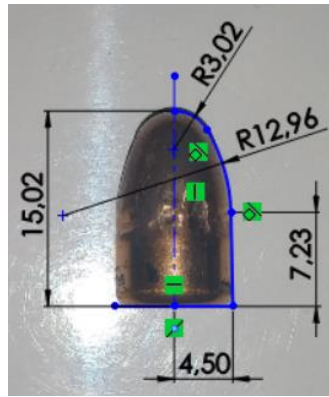


Figura 6.7 – Geometria do projétil de 9mm.

No projétil o revestimento teve que ser criado separadamente do núcleo, para assim poder atribuir diferentes materiais.

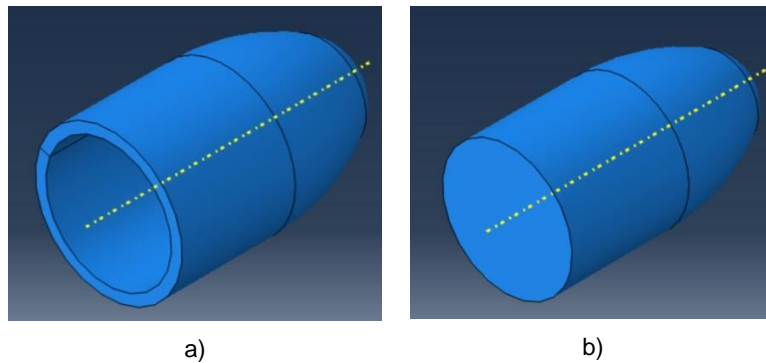


Figura 6.8 – Projétil 9mm: a) Revestimento; b) Núcleo.

No decorrer das simulações, para os ensaios que se pretendem simular, houve sucessivos problemas de instabilidade numérica associados ao projétil e o programa quando era submetido para análise abortava sucessivamente, obtiveram-se apenas resultados para o caso em que o alvo é constituído apenas por alumínio. Para obter resultados de todas as simulações optou-se por escolher o projétil como um corpo rígido sem nenhum material associado, apenas com massa e com velocidade inicial. No final fez-se uma análise de sensibilidade à velocidade residual no caso em que se obteve resultados das duas formas, de modo a averiguar se os resultados são semelhantes.

Em relação aos alvos, a liga de alumínio foi modelada como sendo um sólido 3D, os materiais compósitos como elementos *shell*.

### Property

No comando property é onde se pode caracterizar o problema ao nível dos materiais<sup>6</sup> e das suas características. Para o efeito foi criado o material a associar ao alvo com caracterização ao nível do comportamento dinâmico.

<sup>6</sup> No Apêndice E encontram-se as propriedades utilizadas para os respetivos materiais.

Mais ainda, este é o local onde se definiu uma *section* (sólida, homogênea) relativa ao material descrito com o objetivo de a associar ao alvo. Desta forma o *software* reconhece que uma determinada geometria está associada ao material de forma a fazer o cálculo corretamente.

### Assembly

Após a criação das geometrias isoladas e da sua caracterização ao nível mecânico, é necessário juntar aquilo que foi modelado num espaço conjunto onde possam interagir. Desta forma, foram criadas *instances* (cada uma referente a uma geometria) e posicionadas no respetivo lugar. Como a reprodução dos ensaios envolve um número de materiais diferentes uns dos outros, as *instances* criadas variaram conforme a reprodução do ensaio reproduzido. A distância entre a superfície do projétil e a superfície do alvo foi reduzida a apenas 5mm com o objetivo de poupar tempo de cálculo uma vez que o que se passa entre o início da simulação e o instante do impacto é irrelevante ao nível de resultados.

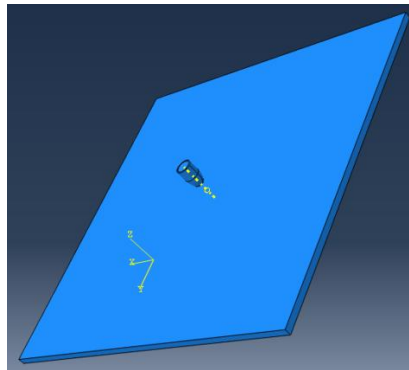


Figura 6.9 – Assembly: projétil e alvo (alumínio).

### Step

A criação de *steps* deve-se à necessidade do Abaqus precisar de uma sequência de ações a desempenhar. Num impacto balístico desta natureza, como o movimento é contínuo, é necessária a criação de apenas um *step* (explícito) que coordena a interação entre o projétil e o alvo.

No *step initial*, que é predefinido, foi imposta a velocidade de 400 m/s. A velocidade inicial do projétil tem que ser aqui definida por ser necessário impor uma velocidade inicial e não uma velocidade constante ao longo do ensaio. Assim consegue-se que durante a interação com o alvo, o projétil diminua a velocidade devido às perdas de energia e não adultere os resultados.

### Load

Neste comando foram definidas as condições de fronteira do alvo, para os materiais compósitos e metálicos (alumínio), estes foram totalmente encastrados nas suas extremidades, não permitindo qualquer deslocamento ou rotação dos mesmos em qualquer direção.

### Interaction

Na simulação de um impacto balístico, uma das coisas mais importantes para garantir resultados confiáveis e que representem rigorosamente a realidade é a interação entre o projétil e o alvo. Devido

às elevadas velocidades e à rápida distorção dos elementos, é necessário escolher um contacto que descreva bem o que se passa ao nível dos nós dos elementos.

Foi então criado um *general contact* (explicit) no qual se caracteriza qual a superfície que cede energia e qual a que recebe. Foi utilizada uma formulação do tipo *hard contact*. Assim fica garantido que a interação ocorre e que o fenómeno físico é bem descrito.

## **Mesh**

Devido à formulação das geometrias aquando da sua criação é necessário definir uma malha de elementos finitos tanto para o projétil como para o alvo.

Com o projétil deformável, para o núcleo foram utilizados elementos C3D8R, com uma malha de 5454 elementos, no revestimento foram utilizados elementos do tipo C3D10M, com uma malha de 2292 elementos. Na situação em que o projétil foi considerado rígido foram utilizados elementos R3D4 com uma malha de 1798 elementos.

Para os alvos, no material compósito foram utilizados elementos S4R com uma malha de 10000 elementos enquanto para o alumínio foram utilizados elementos C3D8R com uma malha de 20000 elementos.

## **Aproximações realizadas**

Como referido anteriormente, o MEF é uma ferramenta de análise e resolução de problemas em que na maioria das vezes são realizadas aproximações.

Nestas simulações foram realizadas as seguintes aproximações:

- Os efeitos de atrito não foram considerados;
- O projétil foi considerado rígido pelo motivos de instabilidade numérica referidos anteriormente neste Capítulo;
- A delaminação nos materiais compósitos não foi considerada por não estar disponível no software. É necessário ser o utilizador implementar uma sub-rotina.
- Os materiais compósitos não foram caracterizados por uma EOS pois foram modelados como elementos Shell;
- Não foram consideradas as camadas de fibra de vidro por não se terem encontrado propriedades das mesmas na literatura;
- Para o material compósito Kevlar/Epoxi foram consideradas as mesmas energias de dissipação do material Carbono/Epoxi por não se terem encontrado valores na literatura correspondentes a este material.

## **Visualização e Análise dos Resultados**

Nas figuras que se seguem estão representadas algumas imagens das simulações efetuadas relativamente aos ensaios referidos anteriormente.

Em cada uma das figuras, na primeira coluna está representado um step intermédio da simulação, que corresponde a uma penetração parcial do projétil no alvo. Na segunda coluna está representado o step final de cada uma das simulações.

Nas figuras é também possível visualizar o lado de entrada e saída do projétil em pormenor referente aos steps anteriormente referidos.

Na figura 6.3 encontra-se o projétil e o alvo composto apenas por um painel de alumínio. Nesta simulação o projétil foi considerado deformável, ou seja, é constituído pelo núcleo de chumbo e o revestimento de cobre. No entanto como já foi referido no início deste Capítulo esta foi a única simulação onde se obteve resultados em que se atribuiu materiais ao projétil, pois nos outros casos o programa abortava sucessivamente devido a instabilidades numéricas.

Para colmatar estes problemas e obter-se resultados para os ensaios que se pretendem simular, optou-se por se considerar o projétil rígido nos restantes ensaios, a única diferença é que este projétil não tem qualquer material associado, tendo apenas a mesma velocidade inicial e a mesma massa do projétil deformável.

Deste modo para averiguar se os resultados são similares nestas duas situações optou-se por reproduzir a simulação da figura 6.3, mas considerando o projétil rígido como mostra na figura 6.4.

Pelas figuras é possível observar que houve mais deformação do alvo com o projétil deformável, no entanto o resultado das simulações foi o mesmo: penetração total.

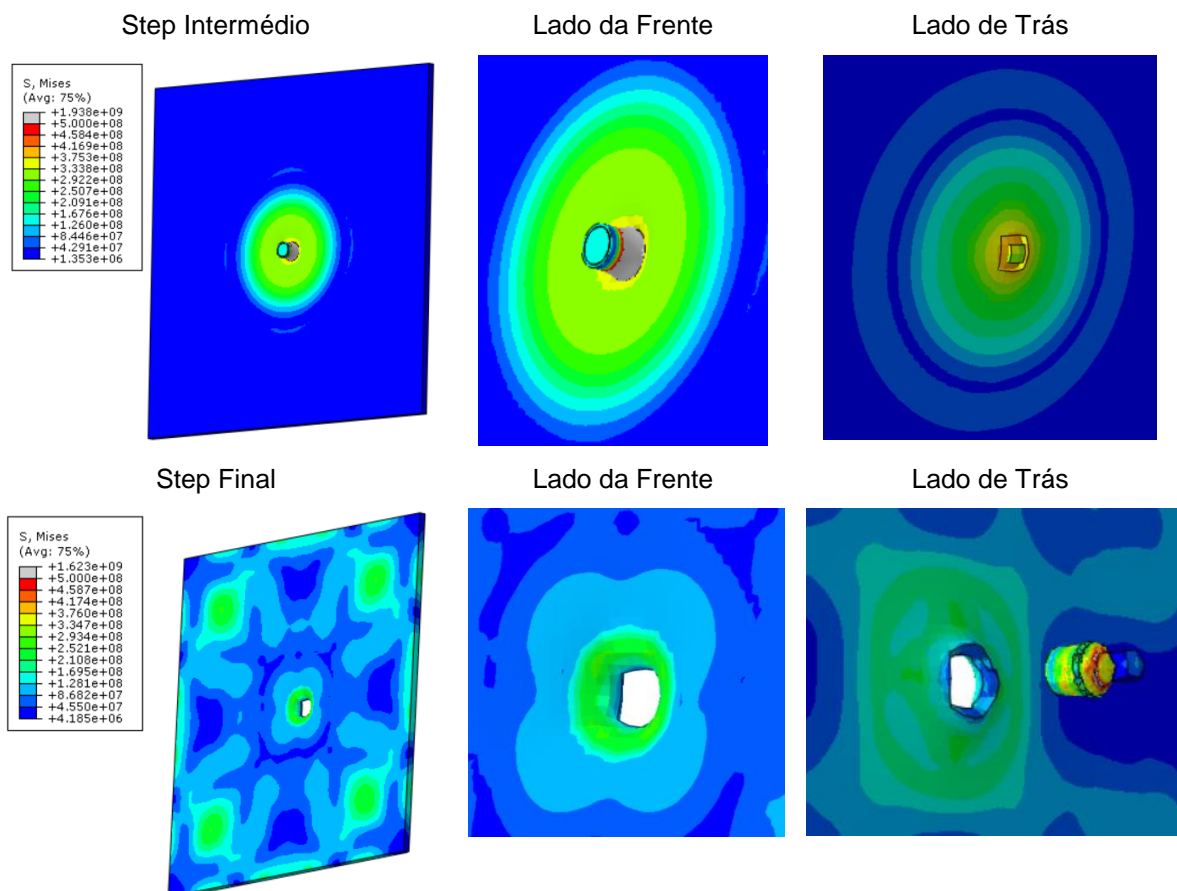


Figura 6.3 – Imagens relativas à simulação do projétil deformável com o alvo de alumínio.

Realizou-se ainda uma análise de sensibilidade à velocidade residual do projétil para estas duas situações, tendo-se verificado uma diferença por volta de 50m/s, com o projétil rígido a assumir uma velocidade residual superior com o valor de 293 m/s. Podendo desta forma concluir-se que com o projétil rígido o resultado é mais conservador, ou seja mais crítico do que considerando o projétil deformável.

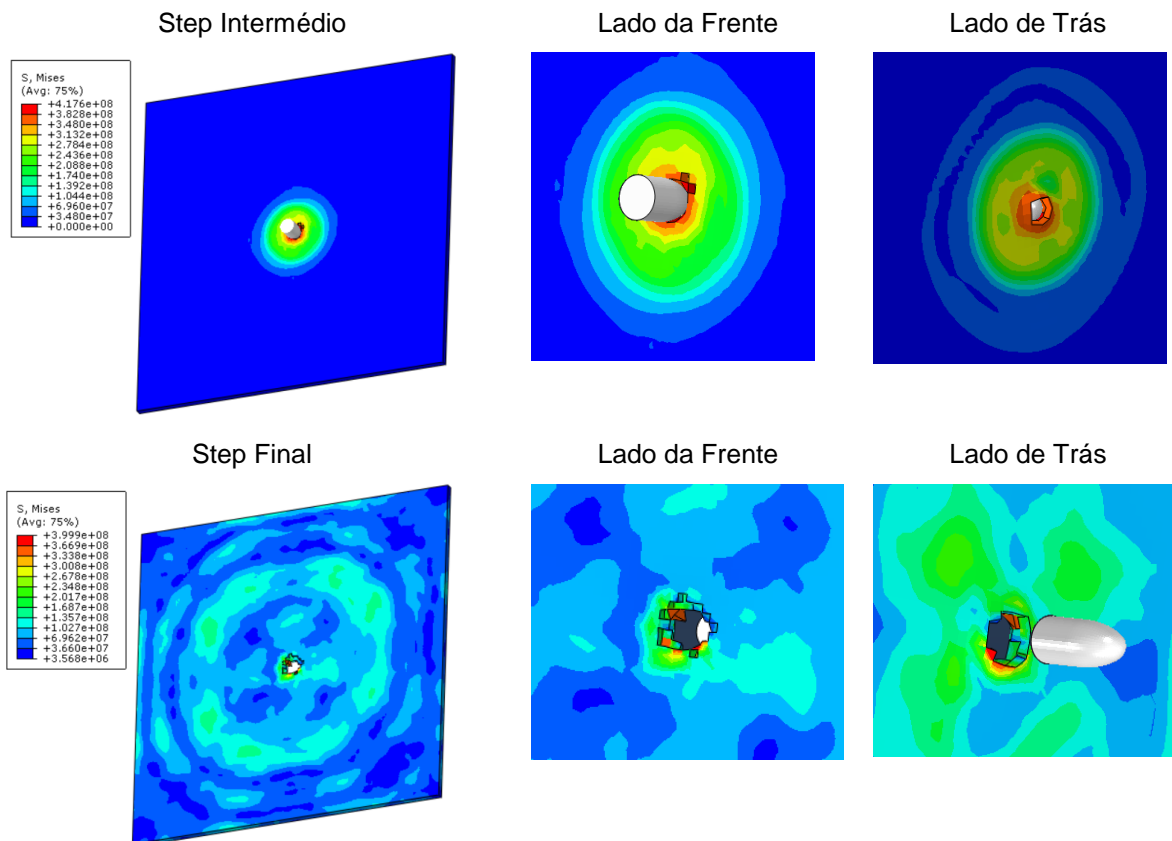


Figura 6.4 – Imagens relativas à simulação do projétil rígido com o alvo de alumínio.

Nas situações em que se consideraram materiais compósitos como alvos, estes foram modelados como elementos shell tendo como desvantagem o facto da visualização das deformações ser reduzida e também terem sido utilizadas algumas aproximações pela dificuldade de encontrar as propriedades destes materiais na literatura para introduzir no *software*.

Como referido anteriormente, as fibras de vidro não foram consideradas nas simulações. Foram apenas consideradas 24 camadas de fibras de Kevlar e 4 camadas de fibras de carbono revestidas por resina epoxídica.

Na figura 6.5 encontra-se o projétil rígido e 1 painel compósito como alvo, nesta simulação tal como na componente experimental obteve-se o mesmo resultado: perfuração total.

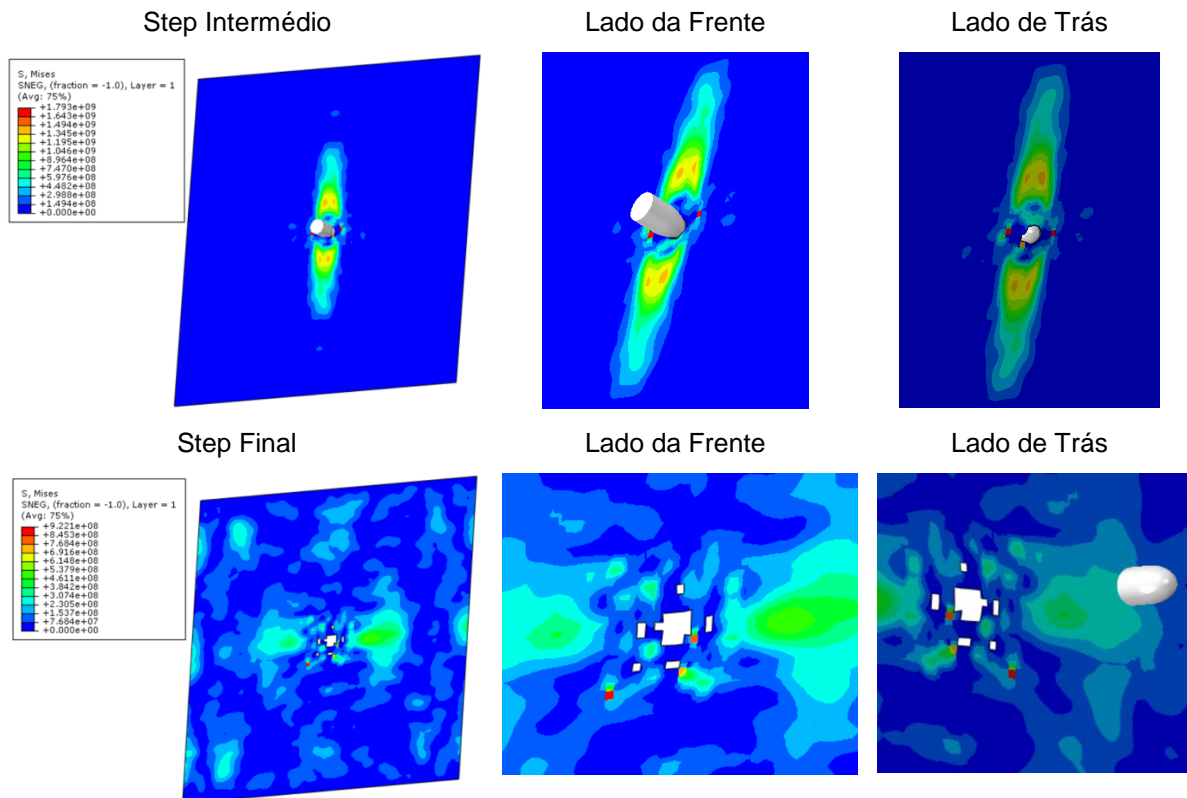
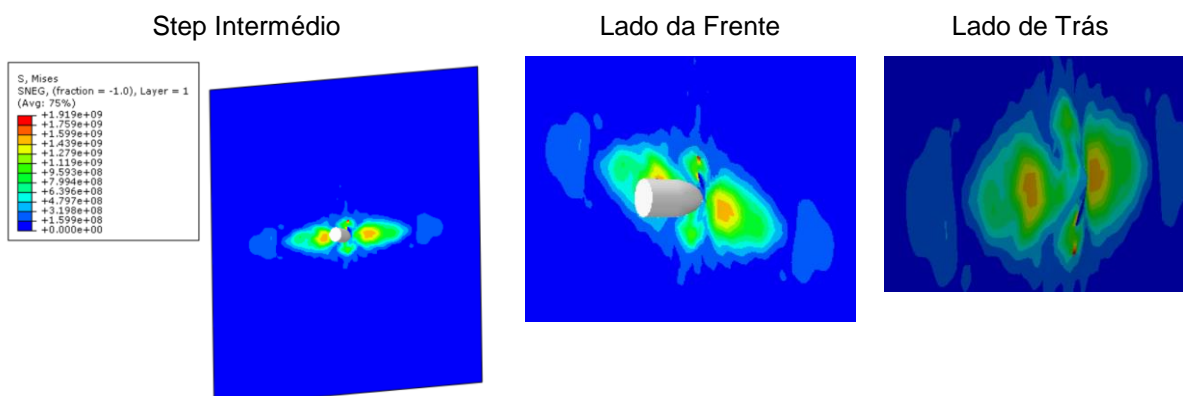


Figura 6.5 – Imagens relativas à simulação do projétil rígido com o alvo a ser apenas um composto.

Na figura 6.6 encontra-se o projétil e 2 materiais compósitos. Para esta simulação foi utilizado o mesmo modelo geométrico do material composto da figura anterior, tendo sido apenas adicionado o dobro das camadas de Kevlar e de carbono no comando *composite layup*, já descrito no início deste capítulo quando se efetuou a justificação da escolha de modelação dos materiais compósitos.

Em comparação com a componente experimental obteve-se o mesmo resultado, o projétil não perfurou totalmente o alvo, tendo apenas provocado a eliminação de alguns elementos da malha como é possível verificar no step final na imagem da figura 6.6 que mostra o lado de trás do material composto.



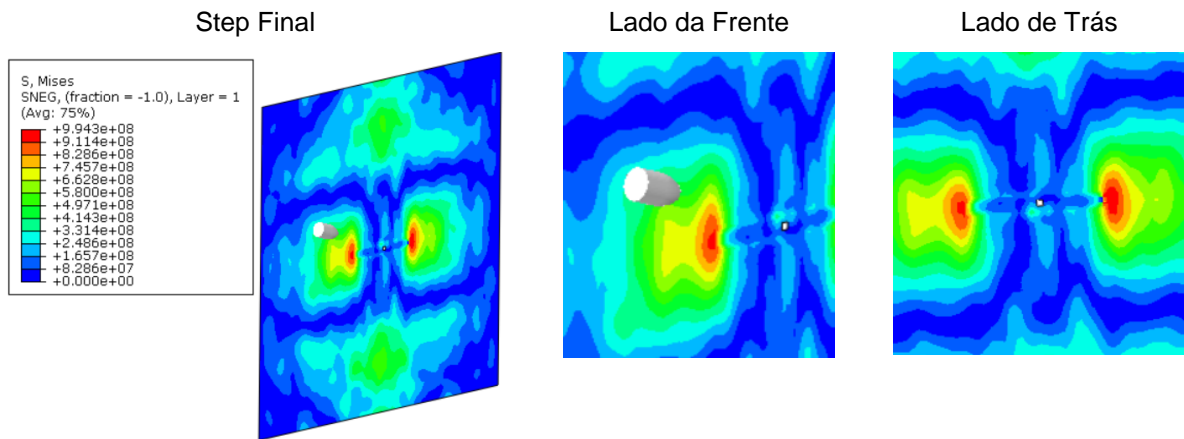


Figura 6.6 – Imagens relativas à simulação do projétil rígido com o alvo constituído por dois compósitos.

Na figura 6.7 encontram-se o projétil, o painel compósito como primeira camada e o alumínio como camada traseira. Através da observação da figura é possível verificar que o projétil perfura parcialmente os dois materiais.

Em comparação com a parte experimental o resultado foi idêntico, uma vez que o projétil não atravessou completamente os alvos, no entanto foram eliminados alguns elementos da malha no alumínio, facto que não se verificou experimentalmente tendo este sido apenas deformado.

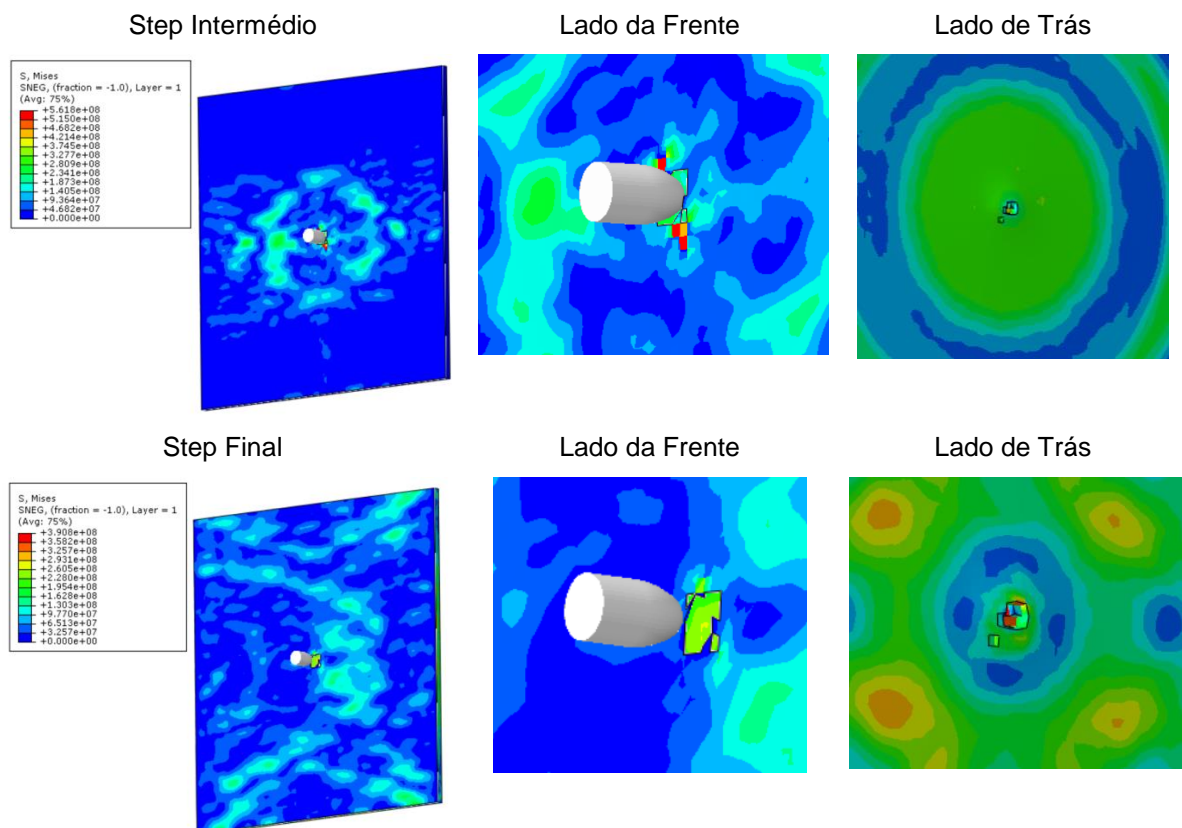


Figura 6.7 – Imagens relativas à simulação do projétil rígido com o alvo constituído por um compósito e alumínio.

## 7 Conclusões e Trabalhos Futuros

A realização desta dissertação permitiu contribuir para o início do desenvolvimento, simulação e teste de materiais passíveis de serem utilizados pelo combatente em contexto operacional.

Esta dissertação permitiu explorar as potencialidades computacionais a nível numérico através da reprodução do projétil e dos alvos no *software* de elementos finitos.

As conclusões aqui mencionadas serão divididas em duas partes: conclusões da parte experimental; conclusões das simulações numéricas.

### 7.1 Conclusões da Parte Experimental

Com os resultados obtidos em que a ameaça foi a pistola Walther, verificou-se que após os três primeiros ensaios balísticos apenas um painel compósito não consegue oferecer proteção balística face a esta ameaça, sendo totalmente perfurado pelo projétil. No entanto quando se colocaram dois painéis compósitos como alvos obtiveram-se resultados positivos, quer no ensaio balístico nº4, quer no nº5, apenas o primeiro painel sofreu penetração parcial, apresentando pequenas fissuras no lado de saída do projétil. Os segundos painéis em ambos os ensaios não apresentaram nenhuma deformação. No entanto quando se trata de blindagens para proteção individual, o peso é uma característica fundamental, nestes casos o peso era de 31,25 kg/m<sup>2</sup> e de 33,25 kg/m<sup>2</sup>, o que segundo as normas seguidas são pesos elevados. O ensaio balístico nº7 foi realizado a dois painéis o primeiro era um painel compósito e o segundo de alumínio, no entanto o resultado foi semelhante aos ensaios referidos anteriormente, com o primeiro painel a sofrer uma penetração parcial e a apresentar pequenas fissuras no lado de saída do projétil e o segundo painel a apresentar uma pequena deformação do lado de entrada do projétil. Como tal, o conjunto dos dois painéis conseguiu providenciar proteção balística face à ameaça, e tem a vantagem de apresentar um peso inferior aos resultados anteriores, com 27,83 kg/m<sup>2</sup>, embora este peso ainda seja um pouco elevado em relação às exigências das normas. Nos restantes ensaios a ameaça passou a ser a Espingarda Automática G3, face a esta ameaça colocaram-se diferentes configurações de painel compósito e alumínio tanto a 50 como a 100 metros, os resultados foram todos ineficazes no que respeita a providenciar a proteção balística.

Como perspetivas de trabalhos futuros para o teste de materiais em situação de tiro real destacam-se os seguintes, (i) Realização de ensaios balísticos com a adição de placas cerâmicas; (ii) Combinação das placas cerâmicas, com os materiais compósitos e metálicos. Tendo em consideração diferentes espessuras destes materiais com o objetivo de averiguar qual a melhor configuração que oferece resistência balística e que possui o peso mais reduzido; (iii) Adição de gelatina balística, atualmente a mais utilizada é a Roma Plastilina N°1, com o objetivo de simular a densidade e viscosidade do tecido muscular humano para analisar o impacto do projétil sobre este; (iv) Adição de cronógrafos para medir a velocidade dos projéteis e desta forma aproximar a instalação de ensaios utilizada à estação prevista na AEP 2920, e (v) utilização de câmaras de alta velocidade para aferir as deformações dos materiais

## **7.2 Conclusões Simulações Numéricas**

Com a realização destas simulações conseguiu-se atingir o objetivo principal da sua realização que era obter resultados similares aos resultados experimentais em termos de perfuração ou não dos materiais, embora se tenham efetuado algumas aproximações, tanto ao nível dos modelos efetuados no que respeita às capacidades e funcionalidades disponíveis pelo software e também pelas propriedades dos materiais utilizadas, uma vez que não se efetuou a sua caracterização mecânica, mas sim a utilização de propriedades encontradas na literatura.

Como trabalhos futuros no âmbito das simulações numéricas tendo em conta as dificuldades encontradas na sua realização e os trabalhos futuros na parte experimental, destacam-se os seguintes: (i) Modelação dos materiais cerâmicos; (ii) Caracterização mecânica dos materiais; (iii) Verificar qual a melhor combinação de materiais que oferece resistência balística face à ameaça selecionada; (iv) Estudo das energias envolvidas no impacto; (v) Utilização de outro software com o objetivo de comparar potencialidades e vulnerabilidades dos mesmos.

## Bibliografia

Adams, B., *Simulation of ballistic impacts on armored civil vehicles*, Eindhoven University of Technology, 2006.

Anderson, C.E., *An Overview of the Theory of Hydrocodes*, International Journal of Impact Engineering, 5:33-59, 1987.

Ayax, Eric; *Caracterisations Expérimentales Et Modélisation Du Comportement D'Une Plaque Composite Tissée En Regime Balistique*, Thèse Doctorale, ENSAM, Bordeaux, 1993.

Arias, A.; Rodriguez-Martinez, J.A.; Rusinek, A., *Numerical simulations of impact behaviour of thin steel plates subjected to cylindrical, conical and hemispherical non-deformable projectiles*, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 75, pp. 1635 – 1956, 2007.

Berthelot J. M., *Matériaux Composites, Comportement mécanique et analyse des structures*, Masson, 1992.

Buitrago, B. L.; Santiuste, C.; Sanchez-Suez, S.; Barbero, E.; Navarro, C., *Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact*, Composite Structures, pp. 1 – 7, 2009.

Bürger, D.; Rocha de Faria, A.; de Almeida, S.F.M.; de Melo, F.C.L., Donadon, M.V.; *Ballistic impact simulation of an armour-piercing projectile on hybrid ceramic/fiber reinforced composite armours*, International Journal of Impact Engineering 43, 63-77, 2012.

Carlucci, D.E.; Jacobson, S.S., *Ballistics: theory and design of guns and ammunition*. CRC Press, 2010.

Dassault Systemes, *Simulation of the Ballistic Perforation of Aluminum Plates with Abaqus/Explicit*, 2012.

Delfosse, D.; Pageau, G.; Bennett, R.; Poursartip, A.; *Instrumented Impact Testing At High Velocities*, Journal of Composites Technology and Research, v. 15, no. 1, p. 38–45, 1993.

Ferreira, L. M. S., *Avaliação do Dano em Compósitos Laminados Devido a Impactos de Baixa Velocidade*, Dissertação para doutoramento em Engenharia Mecânica, Coimbra, 2006.

Hartink, E. A., *Enciclopédia de Rifles e Carabinas*, Lisboa: Centralivros, 2002.

Hub, J.; Jedlicka, L., *Some Aspects of Machine Gun Penetration of the Aluminum Sheet-Metal Plate Using Ansys Autodyn*, University of Defence, 2010.

Justo, J.M.C.d.F., *Estudo do comportamento ao impacto de alta velocidade de estruturas em materiais compósitos*, Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Porto, 2005.

Justo, J.M.C.d.F., *Estudo do comportamento ao impacto de alta velocidade de estruturas em materiais compósitos*, Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 1996.

Kneubuehl, B.P., *Ballistic Protection*, Switzerland, 2003.

Kumar, S.; Gupta, D. S.; Inderdeep, S.; Sharma, A., *Behavior of Kevlar/Epoxy Composite Plates under Ballistic Impact*, Journal of Reinforced and Composites, 2009.

Lama, J. G., *Metodologia de Análise Aplicada a Ensaio de Impacto com Alvos Metálicos*, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2013.

Lapczyk, I.; Hurtado, J. A., *Progressive damage modeling in fiber-reinforced materials*, Composites: Part A, Vol. 38 pp. 2333 – 2341, 2007.

Lee, J.K., *Analysis of Multi-Layered Materials Under High Velocity Impact Using CTH*, Air Force Institute of Technology, Ohio, 2008.

Macieira, C., *Elementos de Armamento - Manual do Aluno*, Lisboa: Serviços Gráficos da Academia Militar, 2008.

Mackin, T.J.; Warren, P.D.; Evans, A.G., *Effects of Fiber Roughness on Interface Sliding in Composites*, Acta Metall. Vol 40, pp 1251-1257, 1992.

Mansur, A., *Modeling of Mechanical Properties of Ceramic-Metal Composites for Armor Applications*, Institute for Mechanical and Aerospace Engineering, Ottawa, 2011.

Monteiro, P., *Avaliação do Desempenho de Blindagens na Proteção de Pessoas e Equipamentos*, Instituto Superior Técnico, 2007.

Nayak, N.; Banerjee, A.; Sivaraman, P., *Ballistic Impact Response of Ceramic-Faced Aramid Laminated Composites Against 7.62 mm Armour Piercing Projectiles*, Defence Science Journal 63, 2013.

Pereira, N., *Os Calibres das Armas Ligeiras de Infantaria – Potencialidades e adequabilidade dos calibres 7,62 NATO e 5,56 NATO às missões contemporâneas*, Academia Militar, 2010.

Pinto, J.M.G.T., *Avaliação do Comportamento Mecânico de Blindagens Balísticas*, Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

Santos, R., *Elementos de Armamento – Manual do Aluno*, Lisboa: Serviços Gráficos da Academia Militar, 2010.

Staab, G.H.; Gilat, A; *High strain rate response of angle-ply glass/epoxy laminate*, Journal of Composite Materials, v. 29, no. 10, p.1308-1320, 1995.

Segrelles, V., *História Universal das Armas em Mil Imagens*, Publicit Editora, 1979.

Sheikh, A.H.; Bull, P. H.; Kepler, J. A., *Behaviour of multiple composite plates subjected to ballistic impact*, Composites Science and Technology, Vol. 69, pp. 704 – 710, 2008.

Soden, P. D.; Hinton, M. J.; Kaddour, A. S. , *Lamina Properties, Lay-Up Configurations and Loading Conditions for a Range of Fibre-Reinforced Composite Laminates*, Composite Science and Technology, 1998.

STANAG 4569, *Protection Levels for Occupants of Armoured Vehicles*, The NATO Standardization Agency, 2011.

STANAG 29220, *Classification of Personal Armour 3rd Edition*, The NATO Standardization Agency, 2014.

Tasdemirci, A.; Tunusoglu, G.; Guden, M., *The effect of the interlayer on the ballistic performance of ceramic/composite armors: Experimental and numerical study*, International Journal of Impact Engineering 44, 1-9, 2012.

Teixeira-Dias, F.; Pinho-da-Cruz, J.; Fontes Valente, R. A.; Alves de Sousa, R.J., *Método dos Elementos Finitos. Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia*, ETEP, 2010.

Telo, A. J.; Álvares, M., *Armamento do Exército Português, Defesa e Relações Internacionais*, Vol I – Armanento Ligeiro, Pojecto de Investigação da Academia Militar, 2004.

Reis L.; Freitas M., *Damage Growth Analysis of Low Velocity Impacted Composite Panels*, Composite Structures, Elsevier; 38(1), 509-7, 1997.

Reis, Paulo N. B, *Resistência de Uniões Estruturais em Polipropileno Reforçado com Fibra de Vidro*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Eletromecânica, Universidade da Beira Interior, Covilhã, pp.5-20, 1997.

Vick, M. J.; Gramoll, K., *Finite element study on the optimization of an orthotropic composite toroidal shell*, Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME, vol. 134, 2010.

Wen, Y.; Cheng, X.; Wang, S.; Batra, R.C., *Analysis of behind the armor ballistic trauma*, Elsevier, 2015.

Zhang, D.; Sun, Y.; Chen L.; Zhang, S.; Pan, N., *Influence of fabric structure and thickness on the ballistic impact behavior of Ultrahigh molecular weight polyethylene composite laminate*, Materials & Design 54, 315-322, 2014.


Zukas, J. A. et al., *Impact Dynamics*, J. Wiley & Sons, 1982.

## Apêndices

### Apêndice A – Produtos existentes no mercado

Tabela A.1 – Produtos existentes no mercado.

	Descrição dos produtos		
<b>EnGarde Portugal body armor</b>	<b>Geral</b>	Todos os coletes são feitos de acordo com as normas NIJ.	
	<b>Nível de proteção</b>	IIIA a IV	
	<b>Material balístico</b>	DYNEEMA ® e placas cerâmicas	
	<b>Peso (Kg)</b>	1,9 - 10,3	
<b>PROHERAL, Bens e Tecnologias Militares, Lda.</b>	<b>Geral</b>	Comercialização, criação e desenvolvimento dos mais diversos tipos de produtos (capacetes, coletes e placas) de acordo com as normas NIJ.	
	<b>Nível de proteção</b>	IIIA - IV	
	<b>Material balístico</b>	Tecido aramida hermeticamente soldado e placas cerâmicas	
	<b>Peso (Kg)</b>	6,9 – 9,8	
<b>Norplex-Micarta - ShotBlocker</b>	<b>Geral</b>	Laminado com proteção balística	
	<b>Nível de proteção</b>	1 - 8 (UL-752) IIA – III (NIJ)	
	<b>Material balístico</b>	Resina fenólica e tecidos de vidro	
	<b>Dimensões (cm)</b>	121.92 x 243.84 x 0.61 - 3.35	
	<b>Peso (kg)</b>	41,7 - 223,17	
<b>Protecta</b>	<b>Geral</b>	Linha completa de produtos para blindagem de veículos e arquitetônica, coletes à prova de balas, painéis anti perfurantes e acessórios de acordo com as normas NIJ.	
	<b>Nível de proteção</b>	I - IIIA	

	<b>Material balístico</b>	Sobreposição de oito camadas de tecido de aramida e chapa de aço carbono unidas com a cola Protecta Extra Bond	
<b>Taurus Blindados</b>	<b>Geral</b>	Coletes de acordo com as normas NIJ	
	<b>Nível de proteção</b>	I - IV	
	<b>Material balístico</b>	Nível I: Goldflex – 228g/m <sup>2</sup> , Kevlar – 280g/m <sup>2</sup> , Spectra Shield LCR – 150g/m <sup>2</sup> , Twaron – 280g/M <sup>2</sup> e Polietileno Nível IV: Kevlar – 280g/m <sup>2</sup> , Twaron – 280g/m <sup>2</sup> e placas cerâmicas	

<b>Verseidag Ballistic Protection Oy</b>	<b>Geral</b>	Linha de produtos tendo em consideração as ameaças <i>standard</i> balísticas e os requisitos ergonômicos.	
	<b>Nível de proteção</b>	IIIA - IV (NIJ)	
	<b>Material balístico</b>	Tecidos balísticos e cerâmicas	
	<b>Peso (Kg)</b>	1,1 - 10,08	
<b>MARS Armor ®</b>	<b>Geral</b>	Fabricante de diversos elementos de proteção balística segundo a NIJ.	
	<b>Nível de proteção</b>	IIIA – IV	
	<b>Material balístico</b>	Tecidos balísticos, placas metálicas e cerâmicas	
<b>Bullet Proof ME</b>	<b>Geral</b>	Comercialização de uma linha completa de produtos de proteção balística	
	<b>Nível de proteção</b>	II – IV (NIJ)	
	<b>Material balístico</b>	Nível II: Painel de aramida (5.8 mm de espessura e um peso total de 1.5 kg) Nível IV: cerâmica (18mm) e aço balístico (12mm)	

## Apêndice B – Preparação das armas, equipamento proteção pessoal e dos materiais

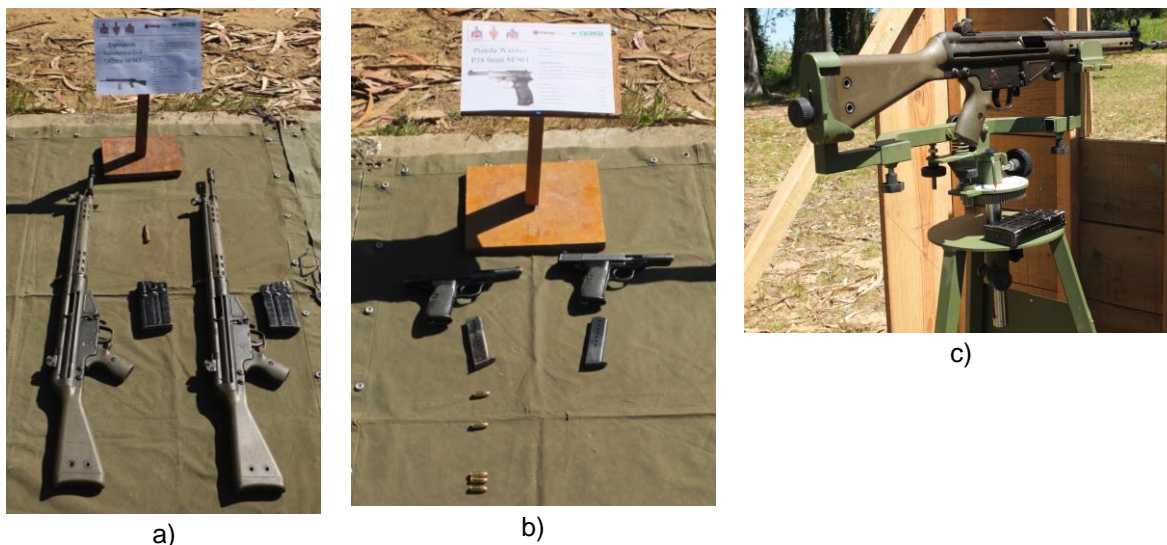


Figura C.1 – Preparação das armas: a) Espingarda automática G3, b) Pistola Walther, c) Reparo para a Espingarda Automática G3.



Figura C.2 – Preparação equipamento proteção e dos materiais.



## Apêndice C – Especificações das Armas e Detalhes dos Ensaio

Tabela D.2 – Especificações das ameaças utilizadas.

<b>Pistola Walther</b>	
Número da arma	010354
Comprimento do cano	125mm
Número de Estrias do cano	6 no sentido dextrorsum
Projétil	+/- 8g
Calibre	9 mm
Origem	Portugal
<b>Espingarda Automática G3</b>	
Número da arma	374165
Comprimento do cano	450 mm
Número de estrias do cano	4 no sentido dextrorsum
Projétil	Cartucho Normal 7.62 x 51mm M350
Calibre	7.62mm
Origem	Portugal

Tabela D.3 – Detalhes do Ensaio Balístico Nº1.

Data do ensaio Balístico	21/05/2015
Identificação do alvo	
Número de painéis	1
Tipo de painel	Compósito
Número de série do painel	0101
Descrição do padrão de tiro	1 Impacto
Dimensão (largura x altura)	200x200mm
Espessura	11mm
Massa	0,645Kg
Peso por m <sup>2</sup>	16,13Kg/m <sup>2</sup>
Composição do lado de entrada do projétil	Fibra de Kevlar®
Composição lado de saída do projétil	Fibra de Carbono
Objetivo do teste	Responder aos ReqEnsBal
Resultado do teste	Penetração total
Outros Comentários	Impacto não válido

Tabela D.4 – Detalhes do Ensaio Balístico N°2.

Data do ensaio Balístico	21/05/2015
Identificação do alvo	
Número de painéis	1
Tipo de painel	Compósito
Número de série do painel	0201
Descrição do padrão de tiro	1 Impacto
Dimensão (largura x altura)	200x200mm
Espessura	11mm
Massa	0.665Kg
Peso por m <sup>2</sup>	16.63Kg/m <sup>2</sup>
Composição do lado de entrada do projétil	Fibra de Kevlar®
Composição lado de saída do projétil	Fibra de Carbono
Objetivo do teste	Responder aos ReqEnsBal
Resultado do teste	Penetração total
Outros Comentários	Nada a referir

Tabela D.5 – Detalhes do Ensaio Balístico N°3.

Data do ensaio Balístico	21/05/2015
Identificação do alvo	
Número de painéis	1
Tipo de painel	Compósito
Número de série do painel	0301
Descrição do padrão de tiro	3 Impactos
Dimensão (largura x altura)	200x200mm
Espessura	11mm
Massa	0,640Kg
Peso por m <sup>2</sup>	16,00Kg/m <sup>2</sup>
Composição do lado de entrada do projétil	Fibra de Kevlar®
Composição lado de saída do projétil	Fibra de Carbono
Objetivo do teste	Responder aos ReqEnsBal
Resultado do teste	Penetração total
Outros Comentários	Terceiro impacto não válido

Tabela D.6 – Detalhes do Ensaio Balístico N°4.

Data do ensaio Balístico	21/05/2015
Identificação do alvo	
Número de painéis	2
Tipo de painel	Compósito
Número de série do painel	0401 e 0501
Descrição do padrão de tiro	1 Impacto
Dimensão (largura x altura) – Painel 0401	200x200mm
Dimensão (largura x altura) – Painel 0501	200x200mm
Espessura – Painel 0401	11mm
Espessura – Painel 0501	12mm
Espessura Total	23mm
Massa – Painel 0401	0,620Kg
Massa – Painel 0501	0,650Kg
Massa - Total	1,27Kg
Peso por m <sup>2</sup> - Painel 0401	15,50Kg/m <sup>2</sup>
Peso por m <sup>2</sup> - Painel 0501	16,25Kg/m <sup>2</sup>
Peso por m <sup>2</sup> - Total	31,25Kg/m <sup>2</sup>
Composição do lado de entrada do projétil	Fibra de Kevlar®
Composição lado de saída do projétil	Fibra de Carbono
Objetivo do teste	Responder aos ReqEnsBal
Resultado do teste	Painel 0401 perfuração parcial; Painel 0501 não perfurado
Outros Comentários	Nada a referir

Tabela D.7 – Detalhes do Ensaio Balístico N°5.

Data do ensaio Balístico	21/05/2015
Identificação do alvo	
Número de painéis	2
Tipo de painel	Compósito
Número de série do painel	0501 e 0601
Descrição do padrão de tiro	1 Impacto
Dimensão (largura x altura) – Painel 0401	200x200mm
Dimensão (largura x altura) – Painel 0501	200x200mm
Espessura – Painel 0401	12mm
Espessura – Painel 0501	11mm
Espessura Total	23mm
Massa – Painel 0401	0,650Kg
Massa – Painel 0501	0,680Kg

Massa - Total	1,33Kg
Peso por m <sup>2</sup> - Painel 0501	16,25Kg/m <sup>2</sup>
Peso por m <sup>2</sup> - Painel 0601	17,00Kg/m <sup>2</sup>
Peso por m <sup>2</sup> - Total	33,25Kg/m <sup>2</sup>
Composição do lado de entrada do projétil	Fibra de Kevlar®
Composição lado de saída do projétil	Fibra de Carbono
Objetivo do teste	Responder aos ReqEnsBal
Resultado do teste	Painel 0501 perfuração parcial; Painel 0601 não perfurado
Outros Comentários	Quarto impacto não válido

Tabela D.8 – Detalhes do Ensaio Balístico N°6

Data do ensaio Balístico	21/05/2015
Identificação do alvo	
Número de painéis	1
Tipo de painel	Alumínio
Número de série do painel	0102
Descrição do padrão de tiro	1 Impacto
Dimensão (largura x altura)	172x172mm
Espessura	4mm
Massa	0,335Kg
Peso por m <sup>2</sup>	11,83Kg/m <sup>2</sup>
Composição do lado de entrada do projétil	Alumínio
Composição lado de saída do projétil	Alumínio
Objetivo do teste	Responder aos ReqEnsBal
Resultado do teste	Penetração total
Outros Comentários	Nada a referir

Tabela D.9 – Detalhes do Ensaio Balístico N°7.

Data do ensaio Balístico	21/05/2015
Identificação do alvo	
Número de painéis	2
Tipo de painel	Compósito e Alumínio
Número de série do painel	0701 e 0202
Descrição do padrão de tiro	1 Impacto
Dimensão (largura x altura) – Painel 0701	200x200mm
Dimensão (largura x altura) – Painel 0202	172x172mm
Espessura – Painel 0701	12mm
Espessura – Painel 0202	4mm

Espessura Total	16mm
Massa – Painel 0701	0,640Kg
Massa – Painel 0202	0,335Kg
Massa - Total	0,975Kg
Peso por m <sup>2</sup> - Painel 0701	16,00Kg/m <sup>2</sup>
Peso por m <sup>2</sup> - Painel 0202	17,00Kg/m <sup>2</sup>
Peso por m <sup>2</sup> - Total	27,83Kg/m <sup>2</sup>
Composição do lado de entrada do projétil	Fibra de Kevlar®
Composição lado de saída do projétil	Alumínio
Objetivo do teste	Responder aos ReqEnsBal
Resultado do teste	Painel 0701 perfuração parcial; Painel 0202 não perfurado
Outros Comentários	Nada a referir

No ensaio nº8 foram utilizados os mesmos materiais do Ensaio Balístico N°7

Tabela D.10 – Detalhes do Ensaio Balístico N°8.

Objetivo do teste	Responder aos ReqEnsBal
Resultado do teste	Penetração total
Outros Comentários	Nada a referir

Tabela D.11 – Detalhes do Ensaio Balístico N°9.

Data do ensaio Balístico	21/05/2015
Identificação do alvo	
Número de painéis	2
Tipo de painel	Compósito
Número de série do painel	0501 e 0801
Descrição do padrão de tiro	1 Impacto
Dimensão (largura x altura) – Painel 0501	200x200mm
Dimensão (largura x altura) – Painel 0801	200x200mm
Espessura – Painel 0501	12mm
Espessura – Painel 0801	11mm
Espessura – Total	23mm
Massa – Painel 0501	0,650Kg
Massa – Painel 0801	0,535Kg
Massa - Total	1,185Kg
Peso por m <sup>2</sup> - Painel 0501	16,25Kg/m <sup>2</sup>
Peso por m <sup>2</sup> - Painel 0801	13,38Kg/m <sup>2</sup>
Peso por m <sup>2</sup> - Total	29,63Kg/m <sup>2</sup>

Composição do lado de entrada do projétil	Fibra de Kevlar®
Composição lado de saída do projétil	Fibra de Carbono
Objetivo do teste	Responder aos ReqEnsBal
Resultado do teste	Penetração total
Outros Comentários	Nada a referir

Tabela D.12 – Detalhes do Ensaio Balístico N°10.

Data do ensaio Balístico	21/05/2015
Identificação do alvo	
Número de painéis	3
Tipo de painel	Compósito
Número de série do painel	0302, 0901 e 1001
Descrição do padrão de tiro	1 Impacto
Dimensão (largura x altura) – Painel 0901	200x200mm
Dimensão (largura x altura) – Painel 1001	200x200mm
Dimensão (largura x altura) – Painel 0302	172x172mm
Espessura – Painel 0501	12mm
Espessura – Painel 0801	11mm
Espessura – Painel 0302	4mm
Espessura – Total	28mm
Massa – Painel 0501	0,650Kg
Massa – Painel 0801	0,680Kg
Massa – Painel 0302	0,335Kg
Massa - Total	1,33Kg
Peso por m <sup>2</sup> - Painel 0901	16,25Kg/m <sup>2</sup>
Peso por m <sup>2</sup> - Painel 1001	13,38Kg/m <sup>2</sup>
Peso por m <sup>2</sup> - Painel 0302	11,83Kg/m <sup>2</sup>
Peso por m <sup>2</sup> - Total	44,09Kg/m <sup>2</sup>
Composição do lado de entrada do projétil	Fibra de Kevlar®
Composição lado de saída do projétil	Fibra de Carbono
Objetivo do teste	Responder aos ReqEnsBal
Resultado do teste	Penetração total
Outros Comentários	Nada a referir

Tabela D.13 – Detalhes do Ensaio Balístico Nº11.

Data do ensaio Balístico	21/05/2015
Identificação do alvo	
Número de painéis	4
Tipo de painel	Compósito
Número de série do painel	0302, 0901, 0402, 1001
Descrição do padrão de tiro	1 Impacto
Dimensão (largura x altura) – Painel 0901	200x200mm
Dimensão (largura x altura) – Painel 1001	200x200mm
Dimensão (largura x altura) – Painel 0302	172x172mm
Dimensão (largura x altura) – Painel 0402	172x172mm
Espessura – Painel 0901	12mm
Espessura – Painel 1001	11mm
Espessura – Painel 0302	4mm
Espessura – Painel 0402	4mm
Espessura – Total	32mm
Massa – Painel 0501	0,645Kg
Massa – Painel 0801	0,645Kg
Massa – Painel 0302	0,335Kg
Massa - Total	1,96Kg
Peso por m <sup>2</sup> - Painel 0901	16,13Kg/m <sup>2</sup>
Peso por m <sup>2</sup> - Painel 1001	16,13Kg/m <sup>2</sup>
Peso por m <sup>2</sup> - Painel 0302	11,83Kg/m <sup>2</sup>
Peso por m <sup>2</sup> - Painel 0402	11,83Kg/m <sup>2</sup>
Peso por m <sup>2</sup> - Total	55,92Kg/m <sup>2</sup>
Composição do lado de entrada do projétil	Fibra de Kevlar®
Composição lado de saída do projétil	Fibra de Carbono
Objetivo do teste	Responder aos ReqEnsBal
Resultado do teste	Penetração total
Outros Comentários	Impacto não válido



## Apêndice D – Propriedades dos materiais

Propriedades utilizadas no projétil (não rígido):

Tabela E.1 – Propriedades utilizadas no revestimento e núcleo do projétil. Fontes: (Burger et. al.,2012) e (Wen et. al.,2015).

Johnson-Cook				Johnson-Cook	
Variável	Cobre	Variável	Cobre	Variável	Chumbo
A	440 MPa	D1	0.3	A	140 MPa
B	150 MPa	D2	0.28	B	176 MPa
C	0.025	D3	-3.03	C	0.035
n	0.31	D4	0.014	n	0.685
m	1.09	D5	1.12	m	1.68
Tm	1356 K			Tm	600K
Tr	297 K			Tr	293K
				D1	3

Na tabela E.2 estão os parâmetros utilizados na EOS de Mie-Gruneisen para o projétil e para o alvo de alumínio, bem como a densidade de cada um dos materiais e o módulo de corte

Tabela E.2 – Parâmetros da EOS utilizados; módulo de corte e densidade de cada um dos materiais. Fontes: (Hub e Jedlicka, 2010) e (Dassault Systèmes, 2012).

		Chumbo	Cobre	Alumínio	Unidades
Densidade $\rho$		11340	8800	2703	Kg/m <sup>3</sup>
EOS	A $\Gamma$	2006	3958	5240	m/s
	B $\Gamma$	1.429	1.497	1.4	
	$\Gamma$	2.74	2	1.97	
Módulo de Corte (G)		8600	46400	26000	MPa

Propriedades utilizadas nos alvos: material compósito (fibra de Kevlar e carbono) e alumínio.

Tabela E.3 – Propriedades do Kevlar/epóxi utilizadas. Fonte: (Vick e Gramoll, 2010).

Parâmetro	$\rho$	$E_1$	$E_2$	$\nu_{12}$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$	$X^T$	$X^C$	$Y^T$	$Y^C$	$S^L$	$S^T$	$G^C$
	1400	76	5.5	0.34	2.3	2.3	1.4	1400	235	12	53	34	34	220
Unidades	Kg/m <sup>3</sup>	GPa	GPa	-	GPa	GPa	GPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	J/m <sup>3</sup>

Tabela E.4 – Propriedades do carbono/epóxi utilizadas. Fonte: (Soden et al., 1998).

Parâmetro	$\rho$	$E_1$	$E_2$	$\nu_{12}$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$	$X^T$	$X^C$	$Y^T$	$Y^C$	$S^L$	$S^T$	$G^C$
		1580	126	11	0.28	6.6	6.6	3.93	1950	1480	48	200	79	79
Unidades	Kg/m <sup>3</sup>	GPa	GPa	–	GPa	GPa	GPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	J/m <sup>3</sup>

Tabela E.5 – Propriedades utilizadas no alumínio. Fonte: (Dassault Systèmes, 2012).

Johnson-Cook			
Variável	Alumínio	Variável	Alumínio
A	262 MPa	D1	-0.77
B	162.1 MPa	D2	1.45
C	0.002	D3	0.47
n	0.2783	D4	0
m	1.34	D5	1.6
Tm	925 K		
Tr	293.2 K		

