



**Universidade de  
Aveiro**  
Ano2009

Departamento de Engenharia Mecânica

**Maria Ana Mendes  
Reis Machado Grilo**

**Efeito de parâmetros da ameaça em alvos metálicos**



**Universidade de  
Aveiro**

**Ano2009**

Departamento de Engenharia Mecânica

**Maria Ana Mendes  
Reis Machado Grilo**

## **Efeito de parâmetros da ameaça em alvos metálicos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

*"The important thing is not to stop questioning.*

*Curiosity has its own reason for existing."*

Albert Einstein 1879-1955  
Prémio Nobel da Física 1921

## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Alfredo B. Morais**  
Professor Associado do Departamento de Engenharia da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Renato Manuel Natal Jorge**  
Professor Associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Prof. Doutor Joaquim Alexandre Mendes de Pinho da Cruz**  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Robertt Ângelo Fontes Valente**  
Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias**  
Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Ao Professor Doutor Filipe Teixeira-Dias, professor e orientador, com quem tive o prazer de trabalhar, que desde a primeira disciplina leccionada, me cativou e despertou o desejo de aprender sempre cada vez mais. Pelo seu esforço e dedicação incansável e pelo apoio e amizade nas horas menos boas.

À minha querida mãe, ao meu querido pai e ao meu querido irmão é graças a eles que sou o que sou, um muito obrigada por fazerem parte da minha vida.

Ao Luís e aos meus amigos por toda a paciência, confiança e carinho que me transmitiram.

Ao Mr. Ken George, que não me conhecendo, me ajudou em tudo o que pôde e o que não pôde, o que sabia e o que não sabia, sempre de uma forma rápida e extremamente eficaz. Com ele aprendi muito.

À Filipa, ao seu avô e mãe, pela disponibilidade imediata na fase final deste trabalho.

## palavras-chave

Armadura, desempenho balístico, capacidade de absorção, impacto ortogonal e oblíquo, alvo, projectil, simulação numérica, método dos elementos finitos.

## resumo

Cada vez mais se torna necessário desenvolver sistemas de protecção contra diversos tipos de ameaças, sejam estas aéreas, terrestres, militares ou civis. A missão dos cientistas é criar e desenvolver sistemas de defesa que sejam eficazes na protecção contra ameaças de diversos tipos, sob várias condições, que sejam confortáveis e cada vez mais leves. Estes investigadores têm que considerar factores como o material, as suas propriedades mecânicas, a sua densidade e composição, os métodos de produção entre muitos outros factores.

Neste trabalho procura-se explorar a desempenho balístico de sistemas metálicos para protecção pessoal (armaduras), de edifícios e veículos blindados civis ou militares, analisando a capacidade de absorção de energia do alvo quando sujeito a um impacto balístico.

Desenvolve-se um estudo numérico detalhado de alvos que diferem na sua espessura e que estão sujeitos a impacto balístico ortogonal e oblíquo, recorrendo à simulação numérica pelo método dos elementos finitos usando o LS-DYNA<sup>TM</sup>. Apresenta-se a caracterização mecânica dos materiais utilizados neste trabalho, como o Cobre, o Chumbo e o aço Weldox, materiais do projectil, e a liga de alumínio 5083-H116, material do alvo. No que diz respeito à capacidade de absorção de energia, os resultados obtidos mostram que quanto maior a área deformada pelo projectil, maior a capacidade de absorção de energia do alvo. O valor máximo de absorção de energia ocorre para um ângulo de impacto de 65°, para o alvo com 20 mm de espessura. Apartir deste ângulo de impacto, a absorção de energia por parte do alvo decresce significativamente, uma vez que não existe perfuração total do alvo. Daí poder concluir-se que o alvo apresenta maior capacidade de absorção de energia desde o momento em que exista perfuração total do alvo. Propõe-se ainda uma curva de desempenho para alvos em liga de Alumínio 5083-H116, em que se define a energia absorvida pelo alvo em função do ângulo de impacto.

**keywords**

Armour, ballistic performance, energy absorption, orthogonal and oblique impact, target, projectile, numerical simulation, finite element method.

**abstract**

The development of armour and protection systems against land, air, military or civil threats is each day more important. The purpose of many scientists and researchers is to create and develop protection systems that can be effective against threats of various types, with respect to increasing mobility of the system as well as safety performance. Researchers have to consider several factors, such as the materials involved, their mechanical properties, density and composition, production methods, *etc.*

The ballistic performance of armour systems, either for personal, infrastructure or vehicle protection, is studied in this work, investigating the energy absorption capability of the target subjected to ballistic impacts.

Initially, a numerical study was performed on targets that differ in their thickness with either orthogonal or oblique impacts, using finite element analysis and the commercial package LS-DYNA<sup>TM</sup>. The constitutive behaviour of materials such as Lead, Copper or Wieldox steel (projectile) and Aluminum alloy 5083-H116 (target) is studied. Obtained results show that the energy absorption capability increases with the increase of the volume of plastically deformed target material. The highest peak of energy absorption occurs when the impact angle is 65° and the thickness of the target is 20 mm. The energy absorption decreases significantly for impact angles above 65°, because there is no full penetration of the target. Additionally, the target absorbs the highest amount of energy when full penetration occurs. In this work, an analytical ballistic performance model is proposed to describe the dependence between energy absorption capability and the impact angle for Aluminum alloy 5083-H116 targets.

# Conteúdos

<b>I. Enquadramento e Objectivos .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Guia de Leitura .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Introdução.....</b>	<b>5</b>
2.1 Enquadramento e objectivos do trabalho .....	6
2.2 A balística .....	6
2.3 Arma de Fogo .....	8
2.4 Componentes de uma munição .....	9
2.4.1 Projétil .....	9
2.4.1.1 Fenómenos de perfuração de um alvo .....	13
2.4.1.2 Análise de processos de perfuração .....	14
2.4.2 Invólucro .....	14
2.4.3 Propelante .....	15
2.4.4 Fulminante .....	16
2.5 Mecanismos de disparo .....	17
2.6 Estado da Arte .....	19
<b>II. Caracterização Mecânica dos Materiais .....</b>	<b>23</b>
<b>3. O Alvo e o Projétil.....</b>	<b>25</b>
3.1 O Projétil .....	25
3.2 O Alvo .....	28
3.2.1 Propriedades e aplicações .....	28
3.2.2 Designação e nomenclatura das ligas e seus tratamentos .....	28
3.3 Liga de Alumínio 5083-H116 .....	29



<b>4. Métodos e Procedimentos .....</b>	<b>31</b>
4.1 Métodos dos Elementos Finitos .....	31
4.2 Programa de simulação numérica .....	32
4.3 Desenvolvimento do modelo.....	33
<b>III. Modelação Numérica .....</b>	<b>37</b>
<b>5. Modelação Numérica.....</b>	<b>39</b>
5.1 Modelos Constitutivos .....	40
5.2 Contactos e Condições de fronteira.....	41
5.3 Modelo de elementos finitos do alvo.....	43
5.4 Modelo de elementos finitos do projectil .....	45
<b>6. Resultados e Discussão .....</b>	<b>47</b>
6.1 Capacidade de absorção de energia- Projétil Rígido .....	48
6.1.1 Influência da espessura do alvo .....	48
6.1.1.1 Modelo Constitutivos da liga de Alumínio 5083-H116 .....	56
6.1.2 Influência do ângulo de impacto .....	61
6.2 Capacidade de absorção de energia- Projétil Deformável .....	64
<b>IV. Considerações Finais .....</b>	<b>69</b>
<b>7. Discussão e Conclusões Finais .....</b>	<b>71</b>
<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>73</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>77</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>79</b>

# Parte I

## Enquadramento e Objectivos

# Capítulo 1

## Guia de Leitura

Esta dissertação é composta por sete capítulos. Abaixo são descritos resumidamente os conteúdos de cada capítulo, de forma a fornecer ao leitor um guia de leitura prático.

### **Capítulos 2 - Enquadramento e Objectivos**

Nesta primeira parte apresentam-se assuntos desenvolvidos e tratados durante o desenvolvimento da dissertação. Uma breve descrição de conceitos como arma de fogo, munição, o mecanismo de disparo de um projectil e processos de perfuração. Inclui-se uma revisão bibliográfica referente a trabalhos de investigação efectuados que se enquadram neste projecto.

Os capítulos seguintes são destinados à caracterização dos materiais tanto do projectil como do alvo na modelação numérica da performance balística, bem como o desenvolvimento de todo este processo de simulação numérica.

### **Capítulos 3 – Alvo e Projectil**

Neste capítulo descreve-se um pouco da história do desenvolvimento da munição utilizada nas simulações numéricas no âmbito deste trabalho. A munição estudada é a 7.62x51 mm NATO. Neste capítulo caracteriza-se ainda, de forma genérica, o material usado para os alvos, a liga de Alumínio 5083-H116.

## **Capítulos 4 – Métodos e Procedimentos**

Neste capítulo apresentam-se os princípios básicos do Método dos Elementos Finitos (MEF). Descreve-se ainda, de forma sucinta, o programa de simulação numérica utilizado ao longo deste trabalho, o LS-Dyna<sup>TM</sup>, algumas das suas características principais e para que tipo de trabalho se recorre à sua utilização. O desenvolvimento das simulações numéricas também está inserido nesta secção.

## **Capítulos 5 – Métodos e Procedimentos**

Neste capítulo realizam-se simulações numéricas em LS-Dyna<sup>TM</sup>. As simulações são realizadas de acordo com especificações pré-definidas, isto é, realizam-se simulações para diferentes espessuras de alvos e fazendo variar o ângulo de impacto do projectil, conforme descrito no capítulo anterior, definem-se modelos de materiais, condições de fronteira e outras condições para a obtenção de resultados numéricos.

Os capítulos finais deste trabalho consistem, unicamente, nas conclusões e discussões gerais de todo o desenvolvimento.

## **Capítulos 6 – Resultados e discussões**

Neste capítulo do trabalho são confrontados e discutidos os resultados obtidos através das simulações numéricas para os diferentes ângulos de impacto e espessuras do alvo, considerando o alvo como uma estrutura deformável, e o projectil rígido ou deformável. São analisados os parâmetros de absorção de energia por parte do alvo durante o impacto.

## **Capítulos 7 – Discussão e conclusões finais**

Neste capítulo apresentam-se as conclusões gerais e discutem-se os resultados obtidos ao longo deste trabalho.

# Capítulo 2

## Introdução

Neste primeiro capítulo descrevem-se assuntos desenvolvidos e estudados durante a dissertação. Uma breve descrição de conceitos como arma de fogo, munição, *etc.* Referem-se ainda características básicas dos materiais utilizados neste estudo. Inclui-se também uma revisão bibliográfica referente a trabalhos de investigação já efectuados e que se enquadram neste projecto.

---

### 2.1 Enquadramento e objectivos do trabalho

Cada vez se torna mais necessário desenvolver sistemas de protecção contra diversos tipos de ameaças, sejam estas aéreas, terrestres, civis ou outras. A missão de inúmeros cientistas é criar e desenvolver sistemas de defesa que sejam eficazes na protecção contra ameaças de diversos tipos e sob várias condições, que sejam confortáveis e cada vez mais leves. Nos seus trabalhos, estes investigadores têm que considerar factores como o material, as suas propriedades mecânicas, a sua densidade e composição química e os métodos de produção, entre outros. Ainda assim devem medir o desempenho, recorrendo a classificações normalizadas do nível da ameaça, analisar trajectórias de impacto, marcas de explosão, profundidade de penetração (DoP – *Depth*

of *Penetration*), estados de tensão dos alvos, deformações equivalentes após impacto, capacidade de absorção de energia, etc.

O presente trabalho enquadra-se no estudo alargado da capacidade de defesa de sistemas de protecção (SP) metálicos, aplicáveis a veículos e infra-estruturas de defesa. De uma forma genérica pretende-se estudar e avaliar o comportamento de um alvo de uma liga metálica, quando sujeita a um impacto balístico. De uma forma mais detalhada, os objectivos do trabalho que aqui se apresenta são:

- Estudar do efeito do impacto ortogonal e oblíquo em alvos monolíticos metálicos nas tensões residuais ulteriores, recorrendo a simulações numéricas, baseadas no Método dos Elementos Finitos;
- Analisar o efeito do calibre do projectil, do ângulo de impacto e da velocidade de impacto nos padrões de tensões residuais;
- Estudar o efeito da espessura na capacidade de protecção dos alvos, sendo analisadas diferentes espessuras;
- Analisar a influência da espessura da espessura e do ângulo de impacto durante o impacto balístico. Este objectivo tem como finalidade determinar a capacidade de absorção de energia do alvo metálico estudado.
- Breve comparação da capacidade de absorção de energia por parte do alvo, quando se aplica um material diferente ao interior do projectil.

## 2.2 A balística

A balística é a ciência em que se estuda o movimento de corpos lançados ao ar livre, o que geralmente está relacionado com o disparo de projecteis por armas de fogo. No estudo do disparo de um projectil por uma arma de fogo, o seu movimento pode dividir-se em três partes distintas: (i) a balística interna, (ii) a balística externa e (iii) a balística terminal. De uma forma simples a balística interna diz respeito ao estudo dos fenómenos que ocorrem desde o momento do disparo até ao instante em que o projectil abandona a arma. Este estudo baseia-se então na temperatura, volume e pressão dos gases no interior da arma durante a explosão do material combustível, tal como no formato da arma e do projectil. A construção do interior do cano da arma é um aspecto decisivo neste campo. Grandes desenvolvimentos da balística interna foram realizados por Benjamin Robins [1].

A balística externa consiste no estudo de todos os fenómenos que ocorrem desde o instante em que o projectil abandona o cano da arma até ao instante em que atinge o alvo. Neste estudo, a aerodinâmica, que estuda a relação e interação entre o movimento do projectil e o ar que o envolve, é tida em consideração. Calibre, formato, massa, velocidade inicial e rotação são factores determinantes para a construção de um projectil com grande poder de destruição. Da simples análise física, recorrendo a análises energéticas, é possível determinar que a massa e a velocidade são dois dos factores mais relevantes no desenvolvimento de uma arma e de um projectil, sendo a energia cinética de um corpo em movimento dada por  $E_c = mv^2/2$ , a energia que irá ser transmitida ao alvo é igual à energia cinética, a maximização desta permitirá um melhor resultado do ponto de vista do ataque.

Um dos motivos de controvérsia do passado está relacionado com a trajectória dos projecteis. Antes de Galileu, acreditava-se que a trajectória descrita por um projectil era rectilínea, porém Galileu e Newton demonstraram que a trajectória de qualquer corpo sob acção da gravidade é parabólica. Os métodos utilizados para a medição da velocidade dos projecteis são variados e baseiam-se, por exemplo, na medição do momento, da distância percorrida entre dois pontos num determinado intervalo de tempo, etc. O primeiro método empregue quando se utiliza um pêndulo balístico, que consiste num sistema de suporte do alvo suspenso num pórtico. O projectil acerta no alvo provocando o movimento pendular de todo o sistema. O ângulo de movimento é medido e determina-se então o momento transferido pelo projectil para o corpo. Através da fórmula para a quantidade de movimento,  $Q = mv$ , determina-se, facilmente, o valor da velocidade.

O trabalho que aqui se apresenta consiste no estudo do impacto balístico, daí ser necessária uma definição um pouco mais detalhada no que diz respeito à balística terminal. A balística terminal é a ciência que estuda todos os fenómenos que ocorrem quando um projectil atinge um alvo. Durante muitos anos o estudo da balística terminal baseou-se em mitos ou suposições sem base científica. Porém, nas últimas décadas, esta abordagem foi ultrapassada através, por exemplo, do desenvolvimento de equipamentos sofisticados de registo de imagem a alta-velocidade e do estroboscópio (dispositivo óptico que permite estudar e registar o movimento contínuo ou periódico de elevada velocidade de um corpo).

O estudo da balística terminal envolve ainda alguns conceitos empíricos. Porém, estudos teóricos são realizados também para maximizar a penetração, permitir ou não a fragmentação do projectil ao atingir o alvo, a utilização ou não de instrumentos explosivos nos extremos do projectil, dentre outros, com o objectivo de aumentar desta forma a sua capacidade de destruição.

## 2.3 Arma de fogo

O termo “arma” refere-se a todo o objecto que possui a característica de aumentar a capacidade de defesa ou de ataque. Determinados objectos são produzidos com este fim, sendo denominados por “armas próprias”. Outros como, por exemplo, a foice e o machado, podem ser utilizados como armas, e são designados por “armas impróprias”.

As “armas próprias” classificam-se em manuais e de arremesso. As armas manuais funcionam como uma espécie de prolongamento do braço, como a espada, punhal e a maioria as “armas brancas”, construídas em torno de uma lâmina metálica. Já as armas de arremesso são as que produzem efeitos à distância de quem as utiliza. É neste grupo que se inserem as armas de fogo. Na imagem da figura 2.1 mostra-se o instante em que o projectil abandona o cano de uma arma de fogo.



Figura 2.1- Disparo de um projectil por uma arma de fogo.

A arma de fogo é constituída por três partes essenciais: (i) a culatra, que permite ao utilizador apoiar e/ou segurar a arma; (ii) os mecanismos de disparo e extracção, constituídos por um gatilho, um percussor e um extractor e (iii) o cano, cilindro oco de maior ou menor comprimento dependendo da arma. O cano da arma possui um corpo e dois orifícios ou bocas. O orifício anterior, livre, é também designado boca-de-fogo e é o extremo da arma por onde sai o projectil no momento do disparo. A superfície interna do cano pode ser lisa ou estriada. As estrias, caso existam, conferem ao projectil um movimento de rotação que estabiliza a sua trajectória, induzindo uma maior força de



penetração no momento do impacto com o alvo. Na figura 2.2 mostra-se uma representação esquemática dos componentes de uma arma de fogo (para o caso uma arma automática MG 42 com munições de calibre 7.62 [2]).

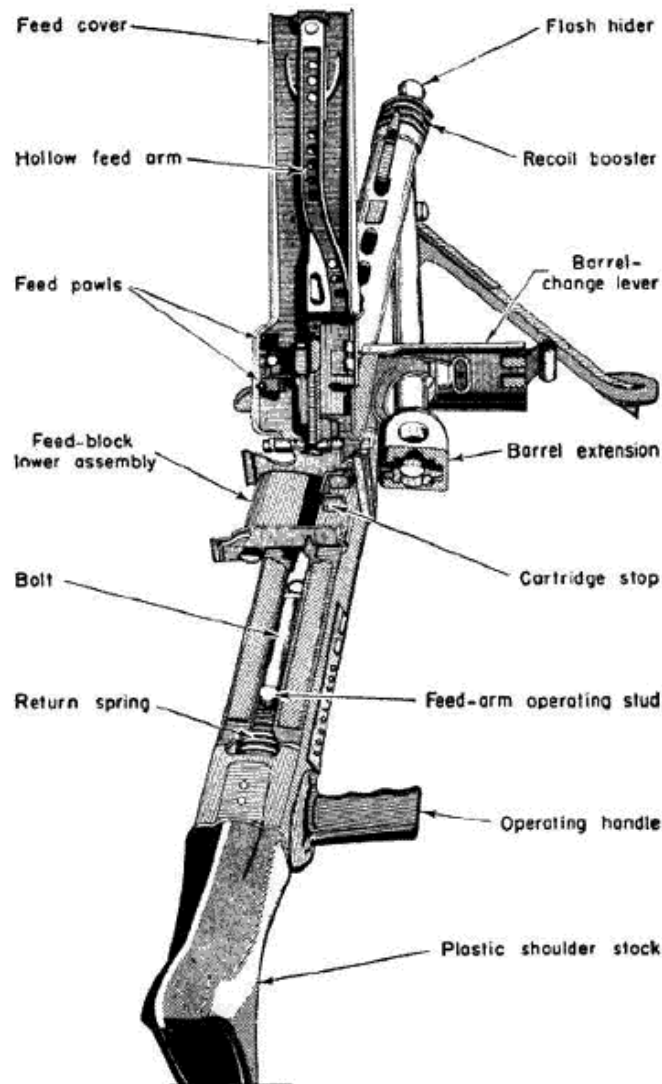


Figura 2.2- Representação esquemática das componentes de uma arma de fogo, especificamente da metralhadora MG 42 de munições de calibre 7.62 [22].

## 2.4 Componentes de uma munição

Antes de entender como funcionam as armas, é necessário compreender como funciona a munição. Na figura 2.3 estão representadas as principais componentes genéricas que constituem uma munição. Neste trabalho, não será feita uma análise dos vários tipos de

munição. Apresenta-se sim um esquema genérico das componentes que estão presentes na maioria das munições actuais.

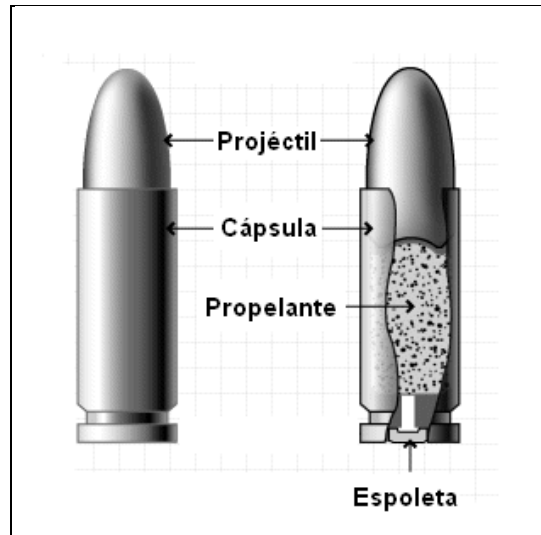


Figura 2.3- Esquema geral de composição interna de uma munição.

A munição é constituída por quatro componentes principais: (i) o fulminante ou espoleta, (ii) a cápsula ou estojo, (iii) a pólvora ou propelante e, naturalmente, (iv) o projétil.

### 2.4.1 Projétil

Os primeiros projéteis eram construídos em pedra mas, com o avanço da tecnologia de fundição, passaram a ser construídos em metais comuns como, por exemplo, o ferro, permitindo que os projéteis adquirissem uma forma (geometria) e massa mais precisas e uniformes. No entanto, apesar dos projéteis de ferro terem a utilidade pretendida, eram relativamente leves, perdendo velocidade e, por conseguinte, energia cinética, muito mais rapidamente do que projéteis mais pesados. Um projétil leve pode ter uma velocidade de saída do cano da arma mais elevada, mas a energia total transmitida ao alvo é significativamente inferior. Baixas velocidades podem ser compensadas com o aumento de massa do projétil, daí ter-se chegado à conclusão de que os projéteis deveriam, idealmente, ser construídos em chumbo, uma vez que este material tem um ponto de fusão baixo, quando comparando com o do ferro, e uma densidade consideravelmente elevada.

De entre os projectéis construídos em chumbo, os mais comuns são os de ponta ogival. Este tipo de projectéis não possui facilidade de expansão nem boa capacidade de penetração, sendo os que transmitem menos impacto contra o alvo. Dessa forma, são considerados os menos adequados, por exemplo, às forças policiais. Um outro tipo de projectil de chumbo é o projectil de canto-vivo, muito mais eficaz do que o ogival. Estas munições são utilizadas, por exemplo, na prática de tiro ao alvo e, apesar de possuírem pouca velocidade, podem provocar ferimentos significativos devido ao seu formato. Um terceiro tipo de projectil comum é o semi-canto-vivo, que une as qualidades de penetração ao corte do projectil de tipo canto-vivo, sendo os mais eficazes de entre os projectéis de chumbo endurecido. Na figura 2.4 ilustram-se estes tipos de projectéis.

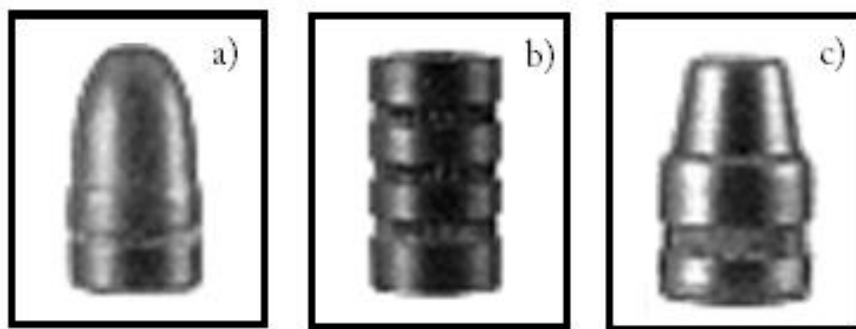


Figura 2.4- (a) Projectil de chumbo de ponta ogival; (b) Projectil de chumbo de canto-vivo e (c) Projectil de chumbo de semi-canto-vivo.

Elmer Keith, afirmava que as munições ideais para revólveres eram as de chumbo e de desenho semi-canto-vivo, que o próprio desenvolveu. Este autor assegurava que os revólveres não necessitavam de munições encamisadas, mas sim de chumbo endurecido, mais tradicionais e económicas [1].

Até ao momento foram referidos apenas os projectéis de chumbo. No entanto, existem outros tipos de projectéis, como os designados por projectéis encamisados, formados por um núcleo, revestido por uma capa externa designada por camisa, normalmente fabricada em ligas metálicas como o cobre, o níquel, o zinco, o estanho ou o aço. O núcleo é constituído geralmente de chumbo, conferindo assim a massa necessária a um bom desempenho balístico. Existem ainda projectéis semi-encamisados, em que a camisa não cobre a totalidade do projectil, deixando a ponta de chumbo exposta. Estes podem ser de ponta oca ou de ponta macia, possuindo assim maior expansão e maior penetração, respectivamente. Finalmente, referem-se ainda os projectéis expansivos, que se destinam à defesa pessoal, e que ao atingir o alvo são capazes de aumentar o seu diâmetro, produzindo assim uma maior destruição. Na figura 2.5 mostram-se alguns destes tipos de projectéis.

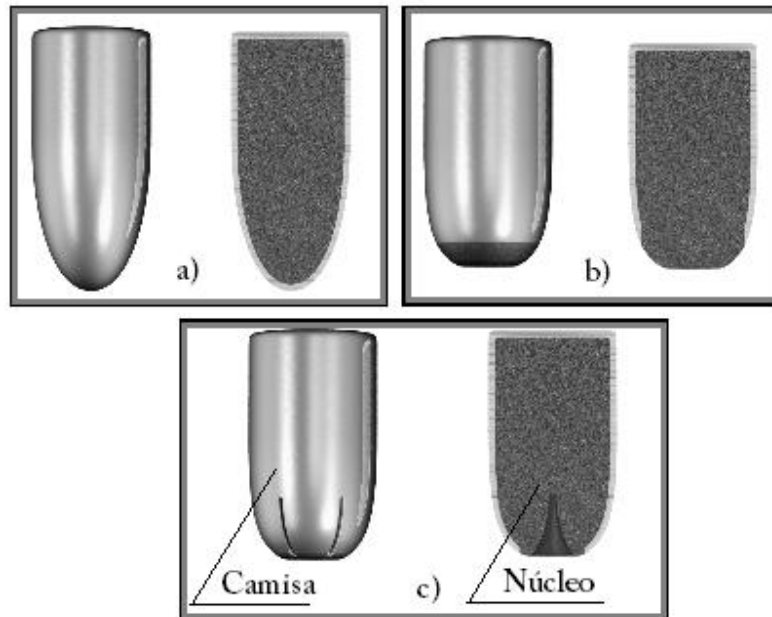


Figura 2.5- (a) Projéteis encamisados; (b) Projéteis semi-encamisados e (c) Projéteis expansivos.

A nomenclatura utilizada para definir os calibres das munições carece ainda de definição uniformizada e mais concreta. O calibre real de uma munição é o diâmetro interno do cano da arma e, conseqüentemente, o maior diâmetro do projétil. Adicionalmente, existe ainda o calibre designado pelos fornecedores e fabricantes de munições, designado por calibre nominal.

O motivo da não-uniformização na designação de calibres está associado à existência de nomenclaturas comerciais criadas em regiões diferentes, por fabricantes diferentes e com sistemas métricos distintos. Nem todos os países usam o mesmo sistema métrico para definir unidades. Os países da Europa continental usam o sistema métrico, em que o diâmetro do projétil e o comprimento do invólucro, é expresso em milímetros (e.g. a munição 7.62x51mm tem 7.62 mm de calibre e 51 mm de comprimento de invólucro). O sistema Britânico recorre às décimas e centésimas de polegada, sendo por vezes comum haver referência a uma característica da munição ou do fabricante, por exemplo .357 Magnum ou .50 Browning. Por fim, o sistema Norte-Americano, que foi o que mais sofreu alteração é hoje em dia o menos utilizado mundialmente. As munições dos EUA eram identificadas por uma sequência de três números, separadas por "-", que indicavam respectivamente o calibre (em décimos de polegada), o peso da carga, em gramas, e o peso do projétil, em gramas.

### 2.4.1.1- Fenómenos de perfuração de um alvo

Depois do disparo existe uma grande probabilidade de o projectil atingir o alvo, intencional ou não-intencionalmente. Uma grande variedade de modos de ruptura pode levar à perfuração. De acordo com Zukas *et al.* (1982) [3], os diferentes modos de penetração dependem de variáveis como, por exemplo, as propriedades dos materiais envolvidos, a velocidade de impacto, a geometria da ponta do projectil, a geometria do alvo, as condições de apoio, *etc.* Apesar de existir sempre um modo de perfuração dominante, o alvo pode romper devido a uma combinação de diversos modos. A cedência por obstrução (*plugging*) ocorre quando o projectil empurra uma porção de material do alvo, de diâmetro aproximadamente igual ao do projectil. Este tipo de ruptura é o mais frequente quando se utilizam projecteis com pontas achatadas. A forma da rolha (do inglês *plug*) depende do estado triaxial de tensão, se ocorrer um estado de tensão de corte puro na periferia do projectil é ejectada uma rolha de material do alvo. Os fenómenos de formação de pétalas (*petaling*) ocorrem quando a tensão de cedência é excedida na parte do alvo oposta ao impacto do projectil e se desenvolve uma fractura em forma de estrela em volta do projectil. As secções formadas são então empurradas para trás pelo movimento do projectil, formando pétalas. A figura 2.6, representa esquematicamente os modos mais comuns de ruptura de um alvo num impacto balístico.

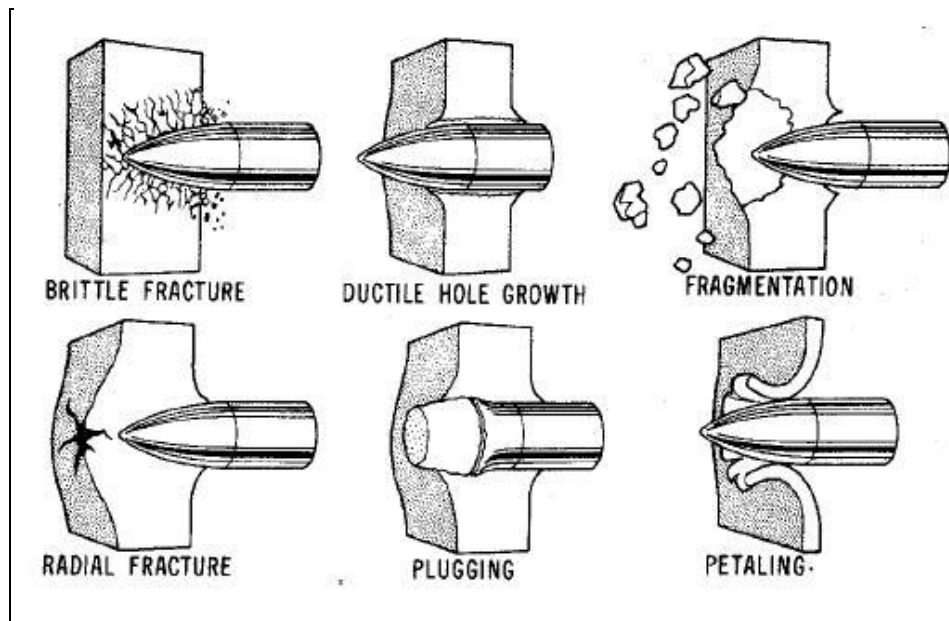


Figura 2.6 – Representação esquemática dos diferentes modos de perfuração num impacto balístico.

### 2.4.1.2- Análise de processos de perfuração

Existem diversos métodos de análise de perfuração que geralmente recaem em três categorias. Uma primeira abordagem poderá ser empírica ou experimental, em que se obtém e correlaciona uma grande quantidade de dados, que podem ser relacionados através da formulação de equações algébricas. Este é um procedimento válido na resolução de um problema específico, torna-se assim, arrojado extrapolar informação para diferentes materiais, geometrias ou velocidades. Porém, se não for conhecido o comportamento do material ou os mecanismos de impacto dos projecteis, esta aproximação fornece informações incoerentes. A segunda abordagem baseia-se na utilização e desenvolvimento de modelos analíticos de simulação, recorrendo a suposições relativamente simples, como o projectil ser rígido, de não existir endurecimento ou efeitos térmicos no alvo, etc. A terceira abordagem possível baseia-se na utilização de métodos numéricos e de simulação numérica. Refira-se a este propósito que os erros associados à medição de propriedades dos materiais são, frequentemente, superiores aos erros inerentes à utilização de métodos numéricos. Apesar de, por vezes, os resultados não serem quantitativamente correctos, a abordagem numérica fornece respostas fiáveis sendo, por isso, um método muito robusto para a realização, por exemplo, de estudos paramétricos.

Qualquer um dos três procedimentos referidos possui vantagens e desvantagens, visto que apenas um deles não proporciona toda a informação necessária à análise de um fenómeno balístico, a combinação dos três métodos é, frequentemente, a melhor opção. Uma aplicação bem sucedida depende, acima de tudo, de uma compreensão exacta dos princípios básicos como, leis de conservação de energia, a influência da inércia e a compreensão comportamento do material.

## 2.4.2 Invólucro

O componente da munição que contém o projectil, o propelante e a espoleta designa-se por invólucro. Apesar de no passado ser dispensado o seu uso em armas de fogo, por não ser essencial ao disparo, hoje em dia trata-se de um componente indispensável ao funcionamento das armas modernas. O invólucro possibilita que todos os componentes necessários ao disparo fiquem unidos numa peça única, facilitando o manejo da arma e reduzindo o intervalo de tempo entre disparos consecutivos. O invólucro moderno tem também outras funções como, por exemplo, formar um ambiente selado de gás resistente ao disparo durante a ignição.

No tempo em que as armas não eram sistemas tecnologicamente desenvolvidos, os cartuchos começaram a evoluir como uma alternativa ao processo de segurar uma garrafa de pólvora para carregar cada disparo. Num cartucho rudimentar, a carga era colocada dentro do cano da arma através de um tubo de papel ou linho fino de seguida o projectil era colocado por cima da carga dentro do tubo sendo posteriormente disparado.

Actualmente, um cartucho é suficientemente flexível para se expandir quando sujeito a uma pressão numa área confinada, e ainda resistente o suficiente para se manter intacto após o momento do disparo, em que se atinge a pressão máxima. O diâmetro do cartucho tem que ser ligeiramente inferior ao diâmetro da câmara onde a munição é alojada e o seu comprimento tem que coincidir com as dimensões do espaço onde esta vai ser inserida. No que diz respeito ao material dos invólucros de munições, a maioria são construídos em metais não-ferrosos, principalmente o latão (liga de cobre e zinco). Porém, estes também podem ser construídos em diversos tipos de materiais como plásticos (munição de treino e de espingardas), *etc.*

O invólucro pode ser classificado quanto: (i) ao corpo, o do tipo garrafa foi criado com o fim de armazenar uma grande quantidade de pólvora, sem ser excessivamente longo ou ter um diâmetro demasiado grande. Normalmente, são utilizados em cartuchos de fuzis, que geram grande quantidade de energia; (ii) à base, a sua forma determina o ponto de apoio do cartucho na câmara e (iii) iniciação, determina como a mistura detonante é exposta no interior do invólucro. Na figura 2.7 estão representados os diversos tipos de invólucros de munições comuns.



Figura 2.7- Representação de invólucros classificados quanto ao tipo de (a) corpo, (b) base e (c) tipo de iniciação.

### 2.4.3 Propelante

Os propelantes, são o produto evolucionário de um princípio básico na tecnologia da arma, isto é, “*a energia deve ser armazenada para ser usada posteriormente*”, ou seja, a energia pode ser armazenada em forma química muito tempo antes da sua libertação. Isto implica um material que seja razoavelmente estável, compacto e transportável.

O primeiro propelante a ser descoberto foi a pólvora negra, que era constituída por uma mistura simples de carvão vegetal, enxofre e nitrato de potássio. Esta descoberta só chegou à Europa no século XIII, embora seja bastante provável que os Chineses (possíveis descobridores do “pó preto”) tenham lançado projecteis recorrendo a “pó preto” cerca de duzentos ou trezentos anos antes. Actualmente, o propelante utilizado nas munições de armas de defesa é a pólvora química, também designada por pólvora sem fumo. Desenvolvida no final do século passado, substituiu com grande eficiência a pólvora negra, que hoje é usada apenas em velhas armas de caça e réplicas para tiro desportivo. A pólvora química produz uma quantidade reduzida de fumos e uma quantidade significativamente menor de resíduos do que a pólvora negra. Adicionalmente, é capaz de gerar pressões significativamente superiores, mesmo recorrendo a pequenas quantidades. Existem dois tipos de pólvora sem fumo que são utilizados actualmente em armas de defesa: (i) a pólvora de base simples, fabricada à base de nitrocelulose, gera menos calor durante a queima, aumentando a durabilidade da arma e (ii) a pólvora de base dupla, fabricada com nitrocelulose e nitroglicerina, possuindo maior poder energético.

A queima do propelante no interior do invólucro, apesar de mais lenta do que a velocidade de uma explosão, gera pressão suficiente para causar danos na arma, tal não ocorre, pois o projectil se afasta e avança pelo cano, consumindo grande parte da energia produzida.

### 2.4.4 Fulminante ou Espoleta

Os fulminantes são dispositivos, que inflamam ou explodem para providenciar a fonte de calor necessária para inflamar a carga de projecção. Todos os fulminantes modernos de armas de pequeno calibre (*small arms*) são inflamados quimicamente. Sendo assim, os fulminantes são responsáveis por accionar a chama inicial, estabelecer a pressão para a carga principal e permitir o confinamento do gás no interior do invólucro.

Durante muitas décadas, o fulminante de mercúrio foi o mais utilizado. Apesar do aparecimento de outros fulminantes, que continham clorato de potássio, os de mercúrio eram preferíveis devido ao facto de não oxidarem a arma. Mas mais tarde, com a adopção de invólucros de bronze, constatou-se que resíduos de mercúrio em contacto com o bronze tornavam os cartuxos mais frágeis. Tais cartuxos correspondiam às expectativas no primeiro disparo, mas não podiam ser recarregados com segurança, uma



vez que poderiam falhar em disparos subsequentes, libertando gases quentes. Na figura 2.8 mostram-se alguns exemplos de fulminantes de munições de pequeno calibre.



Figura 2.8- Exemplo de fulminantes.

## 2.5 Mecanismo de disparo

A arma de fogo é, na sua essência, uma máquina térmica. A sua utilização não depende de uma força física, excepto a força relacionada com o pressionar do gatilho e, como não poderia deixar de ser, baseia-se em princípios termodinâmicos.

A munição é uma componente de dimensões significativas contudo, apenas o projectil é que é expelido pela arma após o disparo. A força com que este é projectado para o exterior do cano depende da combustão do propelante. Esta combustão gera gases, os quais, com o aumento da temperatura interna (podendo chegar aos 2500° C) aumentam o volume e a pressão no interior da arma, fazendo com que o projectil seja "propulsionado" violentamente. Antes da combustão da pólvora, é necessária uma "chama iniciadora", proveniente do fulminante. Este contém uma pequena quantidade de material explosivo sensível ao choque mecânico. A cápsula, geralmente constituída por latão 70:30 (70% de Cobre + 30% de Zinco), é o componente que contém o projectil – na extremidade frontal –, a pólvora – no interior – e o fulminante – na base, como se mostrou anteriormente (ver figura 2.3).

Na figura 2.9 representam-se, de forma esquemática, os diversos estágios envolvidos num disparo de arma de fogo.

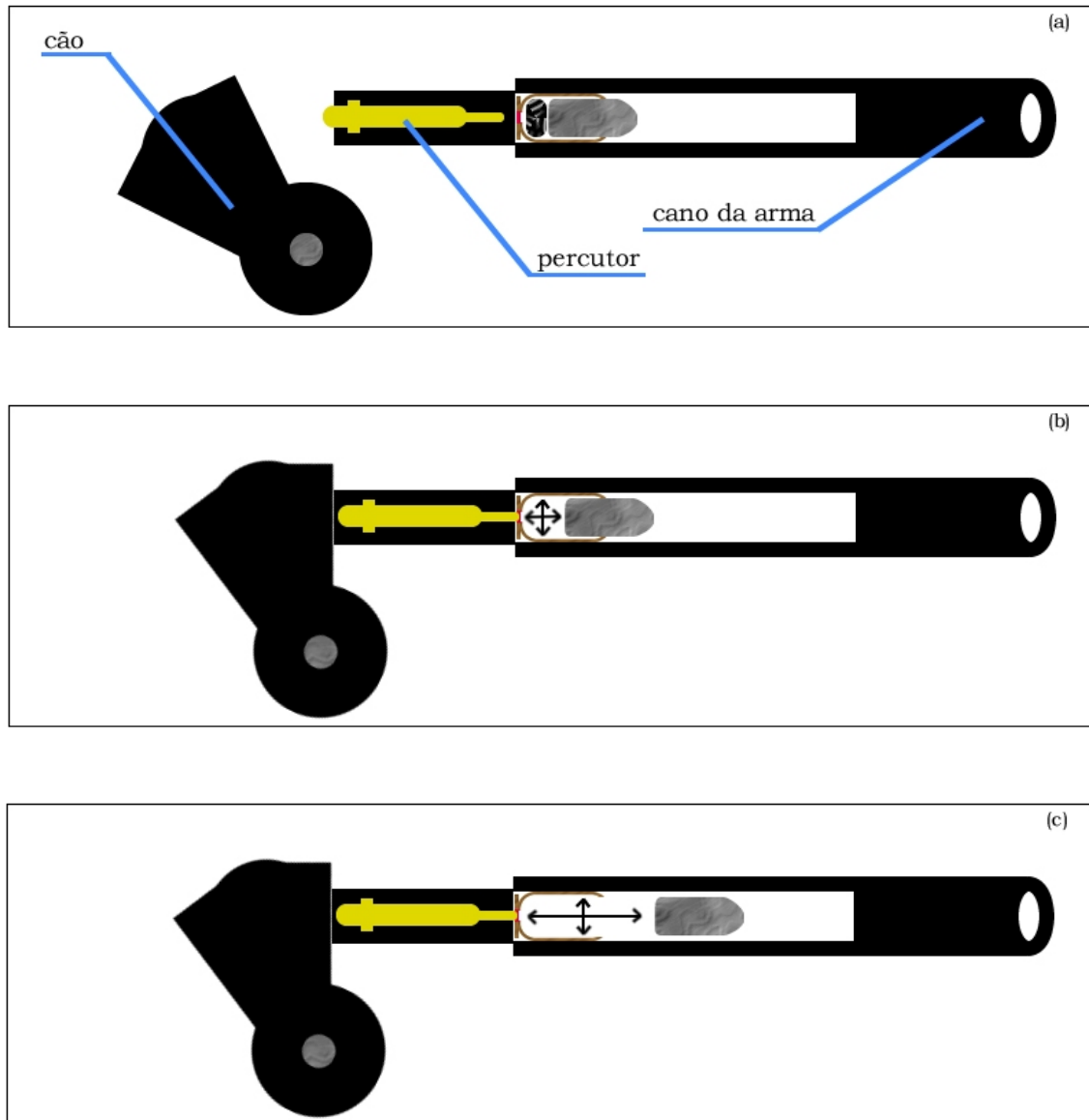


Figura 2.9- Descrição esquemática das várias fases de disparo de uma arma de fogo: (a) arma no seu estágio pré-disparo; (b) primeiro estágio do disparo; (c) aumento da pressão interna (representada pelas setas) e expulsão do projectil.

Ao ser accionado o mecanismo de disparo, geralmente através de força mecânica que pressiona o gatilho, a ponta do percussor deforma o fulminante, comprimindo a mistura iniciadora. Esta, ao sofrer o impacto, produz chamas de alto poder calorífico que passam por orifícios existentes no fundo do alojamento do fulminante e dão início à combustão da pólvora. A combustão da pólvora gera, num curtíssimo espaço de tempo, um volume de gases considerável. A pressão destes impele o projectil através do cano da arma, que é a única saída possível. A expansão dos gases vai também actuar sobre a

---

parte interna da arma, projectando-a para trás, fenómeno conhecido como o 'soco da arma'.

## 2.6 Estado da Arte

A escolha do melhor material a ser usado em protecções balísticas é de extrema importância, tendo que permitir, quer uma melhor mobilidade possível, quer manter a segurança dos seus utilizadores.

Muitos foram os estudos feitos até à data na selecção dos melhores materiais. O aço continua a ser a melhor opção para aplicações de defesa, apesar da sua elevada densidade ser um enorme inconveniente, apesar de pode ser ultrapassado aumentando a sua dureza recorrendo, por exemplo a diversos tipos de tratamentos térmicos. Por outro lado, as ligas de Alumínio de elevada resistência têm vindo a ser cada vez mais usadas. O uso de ligas de titânio seria útil, não fosse a sua aquisição relativamente dispendiosa.

A preocupação com os problemas estruturais no impacto balístico tem vindo a aumentar significativamente na última década nas sociedades modernas. Porém, os processos de penetração e perfuração de alvos metálicos são processos de análise muito complexos, quer de um ponto de vista experimental, quer analítico ou até mesmo numérico. Consequentemente, com o intuito de validar cálculos teóricos e modelos numéricos, é extremamente útil realizar testes de perfuração quase-estáticos, onde algumas incertezas associadas ao material, como características que influenciam a inércia ou propriedades relacionadas com as velocidades de deformação, são difíceis de obter. No entanto, não é possível estabelecer soluções analíticas totalmente fiáveis para problemas estruturais. Por outro lado, nas últimas décadas a utilização de métodos de simulação numérica, como o método dos elementos finitos (MEF), tem vindo a facilitar a obtenção de soluções para a resolução de tais problemas estruturais. Para validar que tal abordagem seja capaz de representar o comportamento real de uma estrutura quando exposta a um comportamento dinâmico são necessárias medidas exactas (experimentais) de processos de deformação.

Diversos modelos têm vindo a ser utilizados para determinar a energia absorvida num impacto balístico. Taylor, em 1948, estudou o trabalho realizado na penetração de um alvo por um projectil assumindo uma expansão radial de um furo cilíndrico com um diâmetro igual ao do projectil [4]. Mais tarde Thompson (1955) [5], melhorou tal modelo, com a diferença de incluir o trabalho despendido na formação da concavidade do material do alvo quando penetrado por projecteis rígidos.

Apesar dos mecanismos de penetração terem sido estudados intensivamente, apenas alguns investigadores têm focado a sua atenção no estudo do efeito das propriedades mecânicas no desempenho balístico. A título de exemplo, veja-se o estudo do efeito do módulo de Young nos esforços de impacto em alvos de alumínio 2024, discutido por Sinhá *et al.* [6], (1977). Tate, no mesmo ano, assumiu que a força de fluxo é três vezes

superior à tensão limite de elasticidade do material do alvo. Woodward [7], 1977, propôs um critério de comparação de selecção de materiais, para sistemas metálicos de protecção balística. Para diferentes tipos de materiais, o critério baseou-se nas suas propriedades físicas e mecânicas. Segundo este estudo, as ligas de Titânio e aço Hadfield parecem ser as mais vantajosas no que diz respeito a performance balística. Num estudo anterior, Manganelo e Abbott [8] investigaram a influência das propriedades do aço em sistemas de protecção, quando submetidos a impactos de baixa velocidade. Estes autores puderam concluir que a dureza é a propriedade que mais afecta a performance balística.

Apesar de a determinação do desempenho do impacto de projecteis em alvos planos ter sido discutida em função da tensão limite de elasticidade por muitos autores, alguns observaram que o simples facto de aumentar a resistência mecânica não leva ao melhoramento do desempenho balístico de um determinado material. A complexidade do estudo da penetração tem limitado o uso de métodos computacionais. Por este motivo, muitos dos trabalhos realizados nesta área foram apenas experimentais, especialmente os realizados até meados da década de 80 do Século XX. A partir daí, mais estudos analíticos foram realizados, que podem ser encontrados na literatura da especialidade.

Como foi referido anteriormente, o cálculo balístico pode recair sobre uma das seguintes categorias: (i) determinação de equações empíricas, (ii) desenvolvimento de modelos analíticos ou (iii) realização de simulação numérica. Bishop *et al.* [9], Hill [10] e Goodier [11], realizaram várias tentativas para determinar a resistência necessária para evitar a penetração de alvos metálicos, através do cálculo de pressões críticas necessárias para expandir a cavidade de impacto do projectil. Posteriormente, Forrestal *et al.* [12-16] recorreram à teoria da expansão de uma cavidade (CET – *Cavity-Expansion Theory*) para calcular a profundidade de penetração e a resistência na perfuração de diversos materiais. Os resultados analíticos e numéricos foram comparados com observações experimentais, notando-se uma excelente concordância entre estas abordagens distintas. Um estudo paramétrico foi também efectuado por estes autores para identificar a relevância dos diferentes parâmetros do modelo constitutivo de Johnson-Cook na resistência da perfuração de alvos. Os resultados indicam que o amaciamento térmico não pode ser negligenciado. Por este motivo foi proposto um procedimento alternativo para a identificação das constantes do material usado na teoria da expansão de uma cavidade (CET).

Gupta e Madhu [17] investigaram o desempenho balístico simples e em multi-camadas de alvos metálicos com velocidades de impacto compreendidas entre 800 e 880 m/s, tendo chegado à conclusão que quando o número de camadas do material é superior a dois, a resistência balística do material diminui.

Nsiampa, Dyckmans e Chabotier [18], de forma a prever o comportamento de alvos de liga de Alumínio 5083, quando sujeitos ao impacto balístico de uma munição de 7.62 mm AP, realizaram simulações numéricas e estudos experimentais, dos quais se pôde concluir que o interior de chumbo do projectil contribui muito mais para um aumento

---

de energia de absorção, do que o revestimento de cobre ou de latão do projectil, apesar da energia inicial do invólucro de latão ou cobre ser duas vezes superior à energia do interior do projectil.

No âmbito desta breve revisão devem ainda salientar-se, pela sua relevância, as investigações realizadas por Borvick [19] neste campo particular: o estudo dos fenómenos de penetração balística. Já no século XXI, o cálculo analítico, baseado na CET, foi comparado por este autor, com resultados obtidos através simulações de elementos finitos não-lineares, tendo ambas as análises sido comparadas com resultados experimentais. Este autor pode concluir que os resultados usando a CET ou análises por elementos finitos são muito semelhantes, desde que as condições iniciais sejam idênticas. Anteriormente (2007), Borvick, Grytten, Hopperstad e Langseth [20], investigaram numérica e experimentalmente a perfuração *quasi*-estática de alvos finos de liga de Alumínio 5083-H116. No final do mesmo ano, os mesmos autores observaram, no estudo numérico e experimental da perfuração a baixa velocidade de alvos de liga de Alumínio 5083-H116, que a deformação dinâmica influencia quer o nível do esforço envolvido quer a fractura do alvo, enquanto o amaciamento térmico influencia apenas a fractura.

Recentemente (2007), Demir, Ubeyli e Yildirim, [21], investigaram o comportamento de alvos de diversos materiais como, as ligas de Alumínio 7075 e 5083 e o aço de elevada resistência, AISI 4140, sob o impacto com um projectil 7.62 mm AP. Vários tratamentos térmicos foram aplicados aos alvos, para estudar o seu comportamento balístico no que diz respeito a dureza e resistência. Resultados experimentais revelam que de todos os materiais estudados, o melhor desempenho balístico foi obtido com a liga de Alumínio, 7075-T651, que mantém uma protecção balística com uma densidade de área superior a 85 kg/m<sup>2</sup>.

No desenvolvimento deste trabalho, o objectivo não é estabelecer o limite balístico, mas sim a qualidade balística do típico material de sistemas de armamento de protecção que é a liga de Alumínio 5083, nomeadamente quando submetida a impactos não-ortogonais.



**Parte II**  
**Caracterização Mecânica dos**  
**Materiais**





# Capítulo 3

## O Alvo e o Projétil

Neste capítulo descreve-se um pouco da história do desenvolvimento da munição utilizada nas simulações numéricas no âmbito deste trabalho. A munição estudada é a 7.62x51 mm NATO. Neste capítulo caracteriza-se ainda, de forma genérica, o material usado para os alvos, a liga de Alumínio 5083-H116.

---

### 3.1 O Projétil

Os estudos que aqui se apresentam recorrem à munição 7.62 x 51 mm NATO, que se mostra na figura 3.1, para avaliar o desempenho de alvos de liga de Alumínio 5083-H116. Muitas são as armas de fogo que utilizam esta munição que foi, inicialmente, conhecida como calibre .30. Era muito utilizada para indicar uma classe muito potente de armas militares: as *Main Battle Rifle* (BR).

O desenvolvimento deste tipo de munição, iniciou-se logo após a Primeira Guerra Mundial, quando se concluiu que a escolha da munição calibre .20-06 era difícil de adaptar em armas de fogo semi-automáticas, um cartucho menos potente permitiria um mecanismo de disparo mais leve. Até ao momento o *design* mais promissor era a munição calibre .276 Pedersen. Porém, quando se demonstrou que a munição calibre

.30-06 poderia ser utilizada em espingardas semi-automáticas, abandonou-se a munição .276.

Durante a Segunda Guerra Mundial e a guerra da Coreia, a Garand M1 foi a espingarda por defeito ao serviço do exército dos Estados Unidos da América (EUA). Mas, a infantaria desejava uma arma mais leve e com uma elevada capacidade de munições e capacidade de *select-fire*. Muitos soldados tentaram o uso da Carabina M1. O resultado foi insatisfatório, devido ao poder inadequado da munição .30 carabina, nesse tipo de arma.



Figura 3.1- Imagem de uma munição 7.62x51mm NATO.

Em Setembro de 1945, depois de testes realizados para melhorar as capacidades da espingarda M1, o Comité Técnico de Segurança dos Estados Unidos da América, focou a sua atenção no desenvolvimento de uma nova e mais leve espingarda para substituir a M2 de calibre .30. O interesse nesta nova munição foi influenciado pelo sucesso da arma alemã 7.9 mm Kurz e pelo facto de a União Soviética ter adoptado a nova munição 7.62 x 39 mm Modelo 43 nas suas armas leves e de assalto Kalashnikov. Quando o desenvolvimento do novo cartucho progrediu, o exército dos EUA começou a notar que o poder da munição usada pelos soviéticos e alemães era demasiado limitado em combates a longa distância. Posteriormente, notou-se a existência de falhas nos requisitos da infantaria dos EUA, sugerindo-se então uma versão mais curta da antiga munição de calibre .30 do cartucho M2 – a 7.62 x 51 mm T65.

Durante o início do ano de 1950, os Britânicos realizaram diversos testes com o objectivo de determinar a melhor munição para as suas tropas, tendo chegado à conclusão que a munição de calibre .280 (7 mm) era a ideal. Em 1953, após bastantes estudos e avaliações, a munição 7.62 x 51 mm T65 foi finalmente adoptada pelas forças da NATO, adoptando-a como o cartuxo *standard*. Três anos mais tarde, após numerosos testes, os Estados Unidos da América finalmente elegeram a espingarda M14 como a sua nova espingarda *standard* de calibre 7.62 mm NATO e a metralhadora M61 também usando a mesma munição.

A figura 3.2, mostra os projécteis de uma munição 7.62x51mm NATO.



Figura 3.2- Projécteis de uma munição 7.62x51mm NATO.

## 3.2 O Alvo

### 3.2.1 Propriedades e aplicações

O Alumínio é o metal mais abundante na Terra e está presente numa grande diversidade de indústrias e segmentos devido às suas propriedades, nomeadamente a sua baixa densidade ( $2.68 \text{ g/cm}^3$ ). A baixa densidade associada à resistência mecânica garante que o Alumínio é um material a ter em conta quer na indústria automóvel quer aeroespacial, uma vez que garante um bom desempenho e um baixo consumo de combustível, tem uma boa condutividade eléctrica que permite que seja usado na transmissão de energia através de cabos e fios e é, também, utilizado em aplicações de aquecimento e arrefecimento. A sua boa formabilidade garante que possa ser utilizado no fabrico de diversos produtos metálicos, podendo ser deformado e conformado com relativa facilidade. O Alumínio tem uma boa resistência à corrosão o que lhe permite que seja utilizado em portas, janelas e revestimentos usados na indústria civil. Em embalagens garante a higiene dos produtos e é uma barreira à contaminação, pode ter uma grande variedade de acabamentos, como anodização e pintura o que aumenta a sua resistência à corrosão e é reciclável, beneficiando o ambiente, por uma menor produção de resíduos e uma menor utilização das matérias-primas.

### 3.2.2 Designação e nomenclatura das ligas e seus tratamentos

As ligas de Alumínio estão divididas em duas grandes classes: (i) as ligas para conformação plástica (*wrought aluminium alloys*) que representam cerca de 85% da produção mundial e (ii) as ligas para fundição, que representam os restantes 15% (*cast aluminium alloys*). As ligas de Alumínio para trabalho mecânico são designadas por um número de quatro dígitos, atribuído pela IADS - *International Alloy Designation System* em que o primeiro dígito muda conforme o elemento de liga principal, como se pode ver na tabela 3.1. O segundo dígito está relacionado com modificações que foram feitas à liga, que, na sua forma original contém este dígito igual a 0 (as que sofrem modificação são numeradas de 1 a 9). Os últimos dois dígitos na série 1xxx estão relacionados com a pureza da liga. Por exemplo, a liga 1145 tem uma pureza de 99,45% enquanto a 1200 tem uma pureza de 99%, para as restantes séries estes dígitos têm pouco significado e servem unicamente para distinguir diferentes ligas de Alumínio na série. Utiliza-se o prefixo X quando a liga está num estado experimental do seu desenvolvimento.

Tabela 3.1- Tabela da composição das diferentes séries dos alumínios.

Série	Elementos de liga principais	Outros elementos de liga
1xxx	Alumínio puro	-
2xxx	Cu	Mg, Li
3xxx	Mn	Mg
4xxx	Si	-
5xxx	Mg	-
6xxx	Mg, Si	-
7xxx	Zn	Cu, Mg, Cr, Zr
8xxx	Li, Sn, Fe, Cu	-
9xxx	Para uso futuro	

As ligas de Alumínio podem ainda ser divididas em dois grandes grupos:

- As ligas tratáveis termicamente, em que se incluem as ligas das séries 2xxx, 6xxx e 7xxx.
- As ligas não-tratáveis termicamente, em que se incluem as ligas das séries 1xxx, 3xxx, 4xxx e 5xxx.

### 3.3 Liga de Alumínio 5083-H116

Um dos papéis das indústrias militares é o de tentar reduzir ao máximo possível o excesso de peso dos sistemas de protecção. Usualmente, tal tarefa é conseguida recorrendo à construção de estruturas com baixo peso. É uma questão de senso comum que o desempenho balístico tem que garantir a segurança dos seus utilizadores contra ameaças como, por exemplo, de projecteis de pequeno calibre.

As ligas de Alumínio são muito usadas na construção de sistemas de protecção balística. Como foi referido, as ligas de Alumínio podem ser classificadas em sete classes principais de ligas de acordo com os seus principais elementos. A classe 5xxxx, ou classe das ligas de Alumínio-Magnésio, é bastante apropriada para o fabrico de chapas por laminagem, que são aplicadas em estruturas navais, no domínio dos transportes, processos estruturais e têm sido utilizadas desde os anos 50, em aplicações militares, devido ao seu baixo custo, à sua soldabilidade, resistência mecânica e à corrosão e boas propriedades balísticas.

Segundo Hatch [21], a liga 5083-H116 é a segunda liga de Alumínio-Magnésio, com maior resistência. Os principais elementos da liga são o Magnésio (com 4.9% em peso) o Manganês (com 0.7% em peso), conforme se mostra na tabela 3.2. É de salientar a elevada percentagem de Magnésio (superior a 3% em peso), que é o máximo que é possível reter numa solução sólida à temperatura ambiente. Consequentemente, tal implica uma potencial instabilidade na liga. A aplicação de um tratamento térmico H116 está associada a um elevado nível de resistência mecânica e a uma resistência à corrosão também elevada. Essa designação não deve ser confundida com a convencional H1\*, onde os últimos dígitos correspondem ao grau de encruamento. Este tratamento térmico pode ser conseguido por diversos meios tais como, por exemplo, por ligeira deformação a frio, ou por laminagem a quente a baixas temperaturas. Normalmente, em alvos finos, o primeiro procedimento a ser efectuado é a laminagem a quente só depois a frio. Em ambos os casos a microestrutura irá ser desigual e uma variação distinta nas suas propriedades mecânicas pode ser claramente visível.

Tabela 3.2- Composição Química da liga de Alumínio AA5083-H116.

<b>Elemento</b>	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	V	Zr	Cr	Al
<b>Wt (%)</b>	0.030	0.0275	4.942	0.538	0.040	0.004	0.012	0.00	0.091	Rest

Na figura 3.3 está representada a microestrutura da liga AA5083-H116, obtida através de microscopia electrónica.

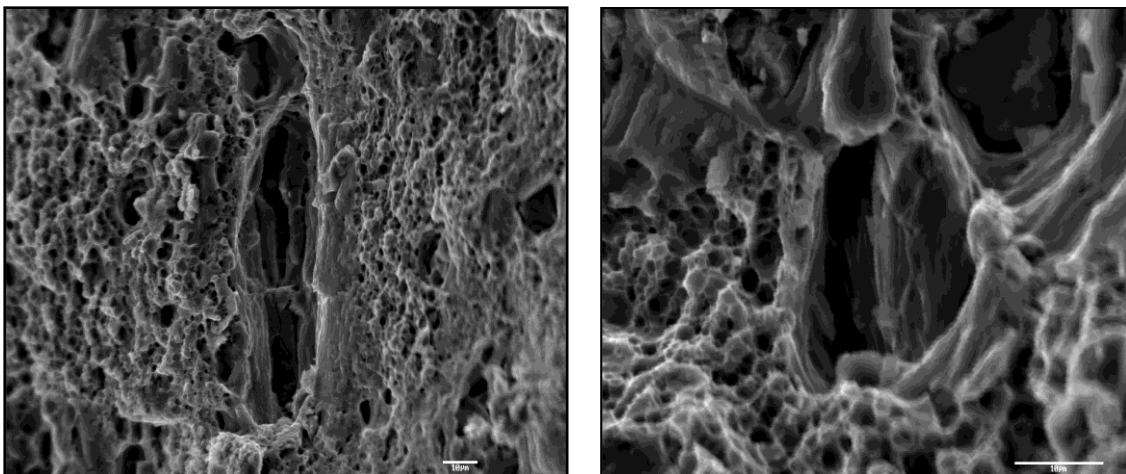


Figura 3.3- Microestruturas da liga de Alumínio 5083-H116.

# Capítulo 4

## Métodos e Procedimentos

Neste capítulo apresentam-se os princípios básicos do Método dos Elementos Finitos (MEF). Descreve-se ainda, de forma sucinta, o programa de simulação numérica utilizado ao longo deste trabalho, o LS-Dyna™, algumas das suas características principais e para que tipo de trabalho se recorre à sua utilização. O desenvolvimento das simulações numéricas também está inserido nesta secção.

---

### 4.1 Método dos Elementos Finitos

Grande parte dos problemas de engenharia podem ser formulados através de princípios da mecânica dos meios contínuos. Este ramo da mecânica trata a matéria como sendo um meio contínuo, sem vazios interiores, não considerando a sua estrutura como sendo molecular. O conceito de meio contínuo permite a definição do ponto geométrico (de volume igual a zero) por um limite matemático, tal como na definição de derivadas no cálculo infinitesimal. Assim, na mecânica dos meios contínuos, os princípios da física são escritos sob a forma de equações diferenciais.

A primeira etapa no processo de modelação computacional de um fenómeno físico consiste na identificação dos factores que influenciam de maneira relevante o problema. Isto exige uma escolha adequada dos princípios físicos e das variáveis dependentes e independentes que descrevem o problema, resultando num modelo matemático constituído por um conjunto de equações diferenciais. A segunda etapa do

processo consiste em obter a solução do modelo matemático, tarefa esta atribuída aos métodos numéricos. O método das diferenças finitas é um destes métodos que foi desenvolvido com a finalidade específica de resolver sistemas de equações diferenciais. Por outro lado, o Método dos Elementos Finitos (MEF) teve a sua origem na análise estrutural. Com o aparecimento dos primeiros computadores digitais no início da década de 50 do Século XX, os métodos matriciais para a análise estrutural tiveram um grande desenvolvimento. As primeiras aplicações envolviam apenas estruturas reticuladas. Porém, a crescente exigência por estruturas mais leves, tais como as encontradas na indústria aeronáutica, conduziu ao desenvolvimento de métodos numéricos que pudessem ser utilizados na análise de problemas mais complexos. Entre trabalhos pioneiros nesta matéria, podem citar-se os trabalhos de Turner [22] e Argyris [23]. Na década de 70, o método dos elementos finitos viu o seu âmbito de aplicação estendido a problemas de mecânica dos fluidos e, desde então, tem vindo a consolidar-se como um método mais geral de solução de equações diferenciais parciais.

## 4.2 Programa de simulação numérica

O LS-Dyna™ é um programa de simulação numérica desenvolvido pela *Livermore Software Technology Corporation* (LSTC), que contém diversas possibilidades de cálculo de problemas reais complexos e baseia-se em análise de elementos finitos com integração temporal explícita. O LS-Dyna™ tem vindo a ser utilizado, por exemplo, pelas indústrias automóvel, aeroespacial, de construção, militar e de defesa, e de bioengenharia. Este programa consiste num único ficheiro executável. Todos os ficheiros de introdução de dados (*input*) são em formato ASCII e, por isso, podem ser preparados usando qualquer tipo de editor de texto, apesar de também poderem ser preparados no pré-processor LS-PrePost.

O potencial do LS-Dyna™ é muito grande, não sendo limitado a um tipo particular de aplicações. O LS-Dyna™ permite resolver problemas dinâmicos, quase-estáticos e estáticos, simulações bi- e tridimensionais, análises térmicas, de mecânica dos fluidos, de fractura, etc. Este programa pode ainda ser aplicado à resolução de problemas não-lineares que implicam pelo menos uma (por vezes todas) das seguintes condições: a mudança de condições fronteiras, a alteração de contactos entre as diferentes partes que constituem o modelo, os elevados níveis de deformação em estruturas ou materiais com comportamento não-linear (que não apresentam um comportamento idealmente elástico) tais como, por exemplo, os polímeros termoplásticos. O LS-Dyna™ permite ainda realizar análise de simulações com altas velocidades e de pequenas durações onde as forças de inércia são importantes. Neste tipo de análise incluem-se, por exemplo, explosões, impacto de automóveis e fabrico de peças laminadas ou estampadas.



### 4.3 Desenvolvimento do modelo

No início do estudo do impacto balístico, optou-se por realizar uma simulação numérica simples, de maneira a testar o modelo de material que seria utilizado quer no alvo quer no projectil, pois a lista de modelos de comportamento usados na caracterização de materiais é vasta, não sendo, por isso, fácil optar pelo mais correcto.

Numa primeira abordagem, recorreu-se a um bloco rectangular de dimensão  $500 \times 500 \times 5 \text{ mm}^3$  e o projectil, uma esfera com 5 mm de diâmetro, conforme se mostra na figura 4.1. De forma a fixar o alvo, o movimento da sua fronteira foi restringido em todas as direcções. Ao projectil, considerado rígido nestes ensaios preliminares, foi conferida uma velocidade inicial de 840 m/s na direcção Oz, isto é, normal ao plano do alvo, de forma a garantir o impacto ortogonal.

Numa segunda simulação, aumentou-se o grau de complexidade. O alvo apresenta-se em forma de disco, com as mesmas dimensões do ensaio anterior, a única diferença encontra-se na geometria do projectil, que se assemelha a um projectil real de uma munição 7.62 mm NATO. O modelo esquemático para esta simulação é o que se representa na figura 4.1. As restrições ao movimento e velocidade inicial do projectil são idênticas às consideradas na simulação anterior.

Uma vez que um dos objectivos deste trabalho é estudar a influência do ângulo de impacto do projectil, realizaram-se mais ensaios alterando unicamente o ângulo de impacto do projectil no alvo. Os ângulos considerados variaram entre 0 e 85°, em intervalos de 5°, considerando ainda diferentes espessuras do alvo, como se apresenta na figura 4.2 e 4.3.

Um outro objectivo deste trabalho foi estudar o comportamento do projectil e a capacidade de absorção de energia do alvo, quer para projecteis rígidos quer para projecteis deformáveis. Considerando o projectil deformável, o tempo de processamento aumenta significativamente, assim como a complexidade em termos de modelação numérica. Assim, optou-se por restringir os ângulos de impacto, apenas a ângulos de 0 a 25° e espessura de alvo, apenas de 5 e 8 mm. Como foi referido anteriormente, o projectil é constituído por dois tipos de material, o revestimento que é de cobre, para dar resistência à estrutura e um interior de chumbo. Nestes ensaios deformáveis, foi aplicado um novo material ao interior do projectil, o aço Weldox 400, muito usado em projecteis balísticos, optou-se pela alteração do material, pois o chumbo é um material muito deformável, o que levaria à aplicação de outros recursos, como a utilização de técnicas de refinamento adaptativo de malhas. Este controlo foi utilizado em ensaios iniciais considerando o alvo rectangular e o projectil esférico, como é possível observar na figura 4.1. A utilização de malha adaptativa é um procedimento recomendado para criar automaticamente um refinamento da malha de elementos finitos em zonas onde possam existir gradientes de tensão ou de deformação significativos. Este procedimento foi adoptado e testado em ensaios com projecteis reais e para diferentes ângulos de impacto. Porém, depressa se eliminou esta estratégia uma vez que o tempo de processamento da simulação numérica aumentava exponencialmente. Tal se deve ao

facto de o programa realizar uma actualização total da malha de elementos finitos no final de cada incremento de tempo do cálculo.

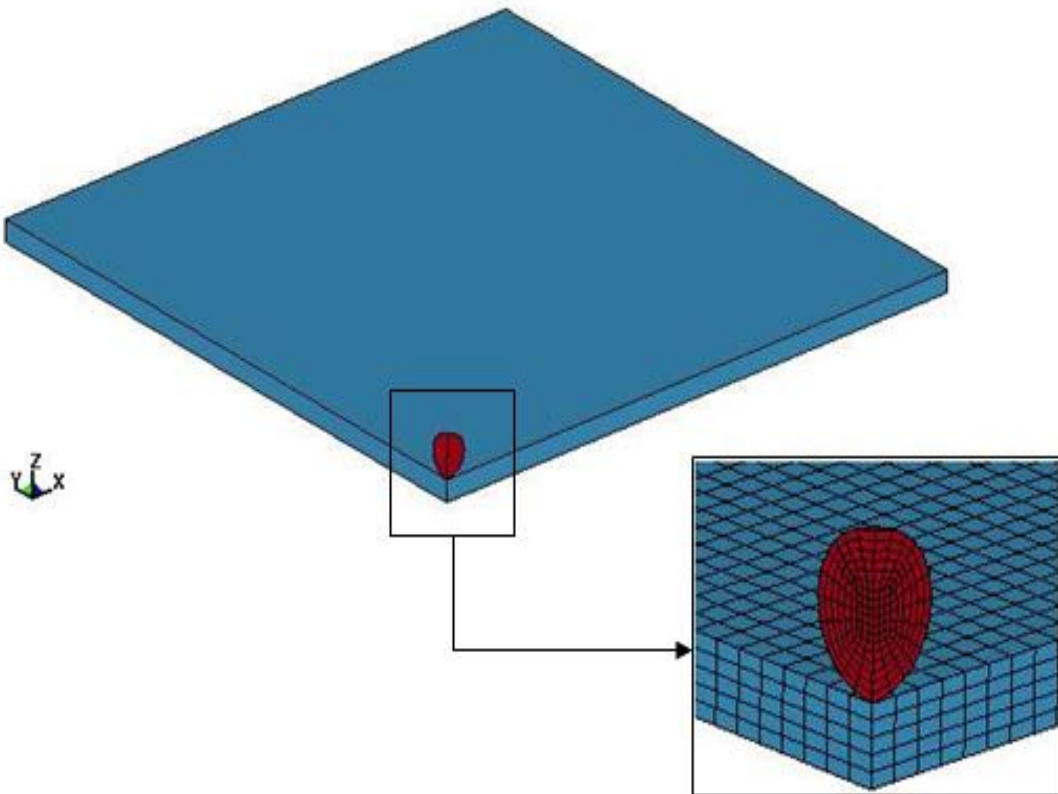


Figura 4.1- Representação esquemática do modelo de simulação numérica do impacto de uma esfera num alvo de geometria rectangular.

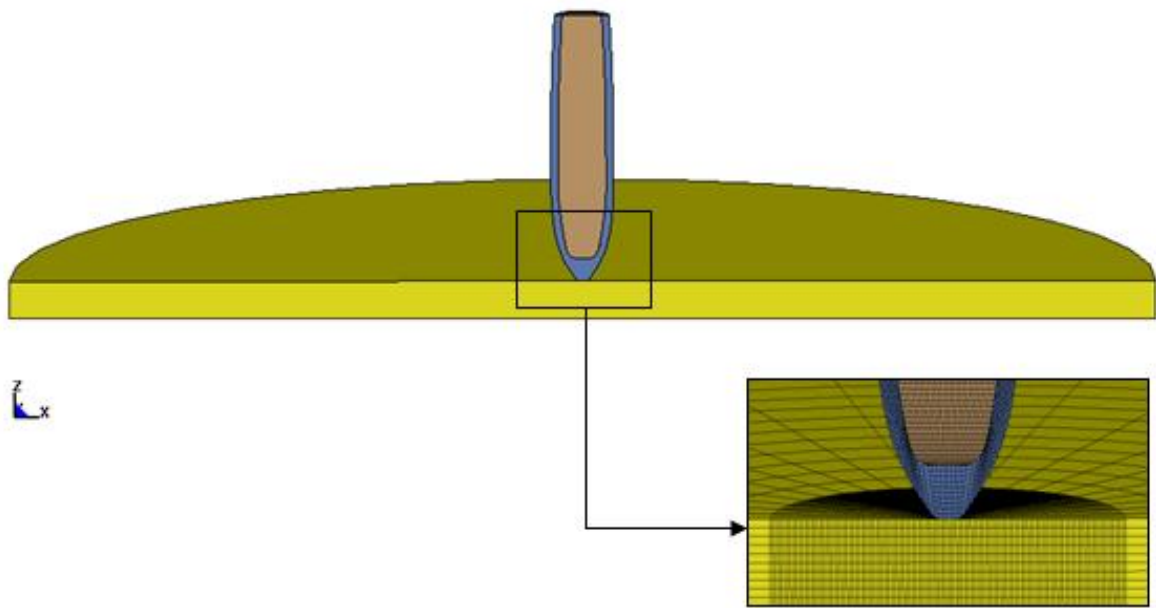


Figura 4.2- Representação esquemática do ensaio final com um projectil 7.62x51mm, um ângulo de impacto de 0° e um alvo de 5mm de espessura.

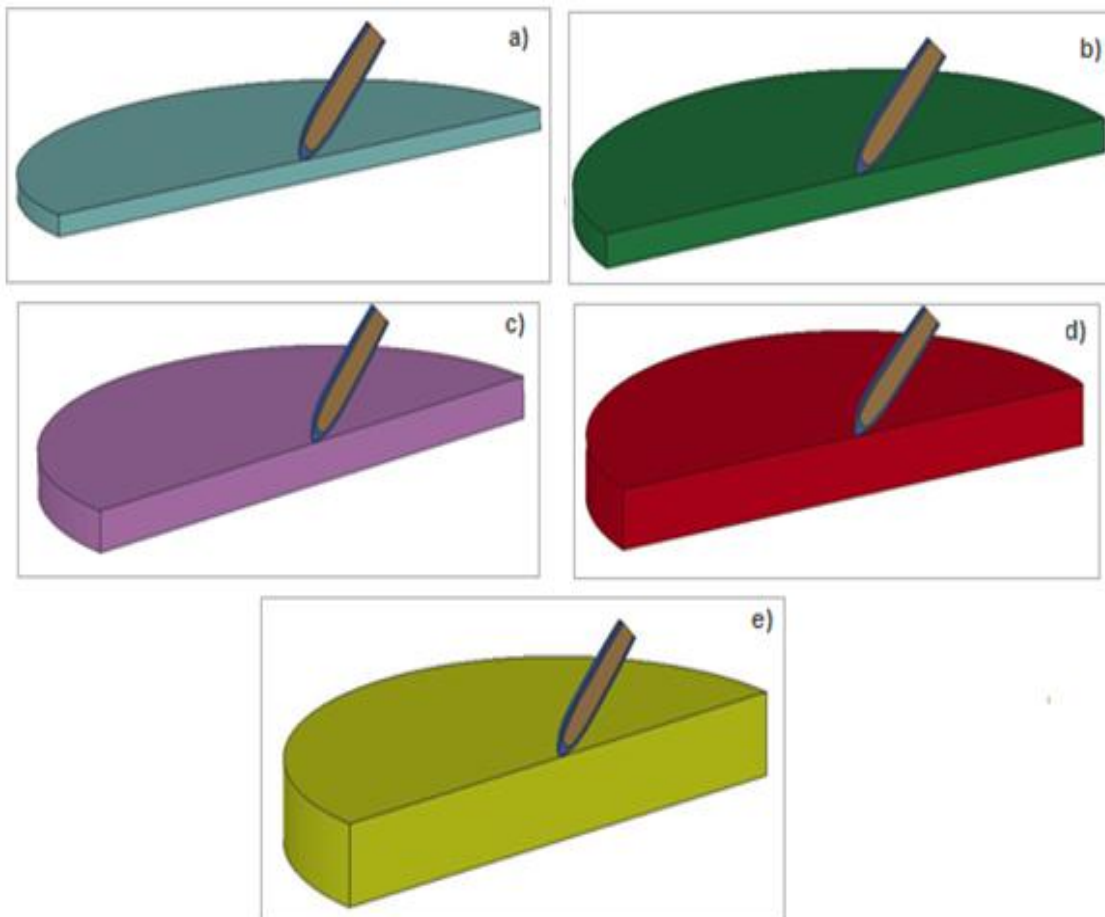


Figura 4.3- Representação da simulação numérica com um ângulo de impacto do projectil de 45°, com espessuras analisadas. (a) 5mm; (b) 8mm; (c) 10mm; (d) 15mm; (e) 20mm.



# Parte III

## Modelação Numérica



## Capítulo 5

# Modelação Numérica

Neste capítulo apresentam-se as simulações numéricas em LS-Dyna™. As simulações são realizadas de acordo com especificações pré-definidas, isto é, realizam-se simulações para diferentes espessuras de alvos e fazendo variar o ângulo de impacto do projectil, conforme descrito no capítulo anterior, definem-se modelos de materiais, condições de fronteira e outras condições para a obtenção de resultados numéricos.

---

No âmbito do estudo do impacto de projecteis em alvos deformáveis, foram realizados ensaios numéricos recorrendo ao LS-Dyna™. No pré-processamento da simulação numérica em estudo, foi necessário recorrer a um programa associado ao LS-Dyna™, o LS-PrePost, onde todos os parâmetros necessários à modelação do ensaio são definidos como, por exemplo, a geometria dos alvos e dos projecteis, o modelo de material a aplicar a cada uma das partes, as condições de fronteira, *etc.* Na fase de pós-processamento é essencial recorrer ao LS-PrePost, de modo a obter, visualizar e analisar os resultados das análises realizadas.

## 5.1 Modelos Constitutivos

De forma a validar as diferentes propriedades e modelos implementados no âmbito deste trabalho, quer relativamente ao alvo quer em relação ao projectil, foram efectuados diversas simulações numéricas. Estudou-se o efeito do ângulo de impacto no desempenho balístico dos alvos, comparando-os com diversas espessuras, considerando quer um projectil rígido quer deformável.

A base de dados do programa LS-Dyna™ disponibiliza uma grande variedade de modelos de comportamento de material. O modelo adoptado para a caracterização do comportamento da liga de Alumínio 5083-H116, utilizada no alvo, foi o \*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC. Este é um modelo bi-linear elástico-plástico, que contém formulações que combinam isotropia com encruamento cinemático. Os parâmetros necessários na sua definição são: a densidade do material, o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson, a tensão limite de elasticidade. Estes parâmetros são os que se indicam na tabela 5.1. Na caracterização do comportamento dos materiais do projectil, que apresenta a geometria da munição 7.62 x 51 mm NATO e é formado por dois materiais distinto (um invólucro de cobre e o interior em chumbo), o modelo de comportamento aplicado para ambos foi o \*MAT\_RIGID, pois considerou-se não existir deformação do projectil. As propriedades mecânicas dos modelos foram retiradas da literatura e encontram-se listadas na tabela 5.1.

Numa simulação mais próxima da realidade, aplicou-se mais alguma complexidade ao ensaio. Para além de variar o material do interior do projectil e por conseguinte o modelo de caracterização, o projectil tem a possibilidade de se deformar. O material aplicado no interior do projectil é o W尔多ox 400 é um material frequentemente utilizado em projecteis com capacidade de perfuração de armaduras, usualmente designados por *Armour Piercing (AP)*. As suas propriedades mecânicas encontram-se listadas na tabela 5.1 e o modelo constitutivo aplicado é o \*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC, o mesmo modelo aplicado no alvo. O exterior do material mantém as mesmas características usadas nos ensaios rígidos.



Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas dos diferentes materiais utilizado em todo este trabalho.

Propriedades Mecânicas	$\rho$ [kg/mm <sup>3</sup> ]	E [GPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\nu$
AA5083-H116	$2.7 \times 10^{-3}$	70	278	0.3
Cobre	$8.8 \times 10^{-3}$	101	195	0.35
Chumbo	$11.34 \times 10^{-3}$	14	-	0.42
Weldox	$7,85 \times 10^{-3}$	200	460	0.3

## 5.2 Contactos e condições de fronteira

É essencial, e de extrema importância, a definição da forma como cada componente (projectil e alvo) envolvido na simulação interage quando em contacto com os restantes. Para tal, existem diversos modelos de contacto disponíveis na biblioteca do programa LS-Dyna™.

Em todas as simulações realizadas, quer considerando o projectil rígido quer deformável, o contacto definido entre o alvo e o projectil é do tipo, \*CONTACT\_ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE, muito usado em simulações de impactos balísticos. De uma forma geral, este contacto é recomendado sempre que elementos sólidos, envolvidos na definição do contacto, estão sujeitos a erosão (eliminação de material) devido a critérios de ruptura do material. A definição das superfícies *slave* e *master* é arbitrária, uma vez que os resultados serão os mesmos, apesar de ser usual a escolha do *slave* para a estrutura que sofre mais deformações.

Finalmente, de forma a tornar o sistema numericamente estável, fixam-se os nós da face circunferencial exterior do alvo restringindo-se, portanto, todos os graus de liberdade destes nós, evitando assim a possibilidade quer de rotação quer de translação (ver figura 5.1(b)). Devido à simetria do problema, apenas metade do projectil e alvo é representado neste estudo, como se pode ver na figura 5.1(a). Consequentemente, aplicaram-se condições de fronteira de simetria no plano médio do modelo. Nestas condições de fronteira bloqueia-se a componente de deslocamento na direcção  $O_y$  em todos os nós, como se pode observar através da figura 5.1.

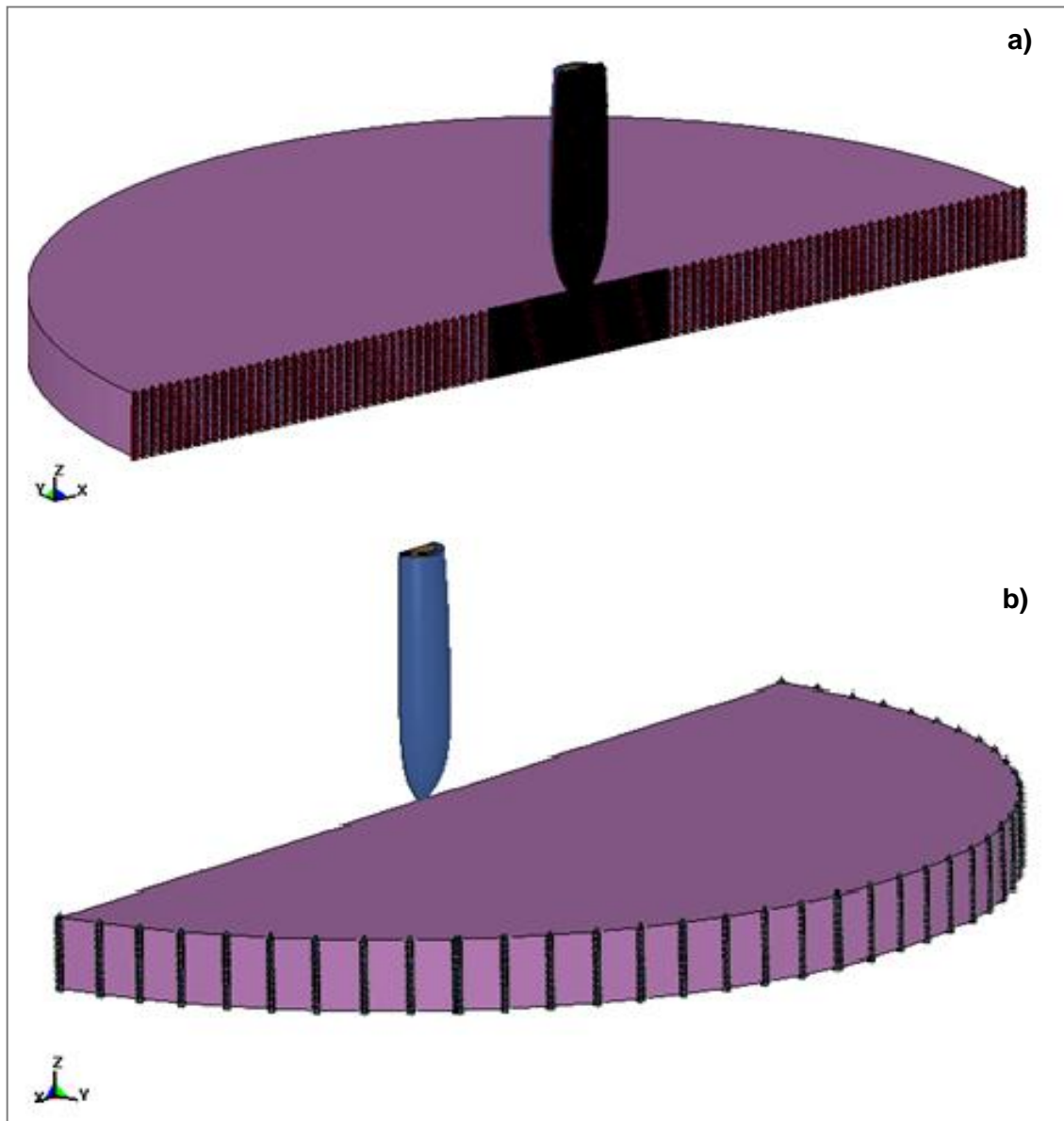


Figura 5.1- Representação esquemática das condições de fronteira do alvo e do projectil: (a) condições de simetria no plano de simetria do alvo e do projectil e (b) restrições ao movimento na fronteira exterior do alvo.

Para garantir que o invólucro do projectil e o seu interior se deslocam com a mesma velocidade e direcção foi aplicada a condição `*CONSTRAINED_RIGID_BODIES` que permite unir os corpos um ao outro para que durante toda a simulação actuem como um só.

Atingidos os objectivos com a não-deformação do projectil, é necessário aplicar deformabilidade ao mesmo, a única diferença entre os ensaios rígidos e os ensaios deformáveis, está no contacto entre as duas partes constituintes do projectil e no modelo de material utilizado na caracterização do projectil, pois agora é necessário incluir os

respectivos parâmetros deformáveis no programa de simulação numérica. O contacto definido entre as duas partes do projectil – o invólucro e o interior – é o \*CONTACT\_TIED\_SURFACE\_TO\_SURFACE. Este tipo de contacto é aplicado em materiais deformáveis. De uma forma geral, o que se deforma mais é considerado o *master*, assim, neste caso o exterior do projectil (invólucro) será definido como *master*. Este contacto permite às duas partes do projectil deslocarem-se com a mesma magnitude e direcção de velocidade uma da outra, tornando-as fixas uma à outra.

### 5.3 Modelo de elementos finitos do alvo

Na modelação numérica do alvo, os elementos finitos seleccionados para a discretização da estrutura foram elementos sólidos hexaédricos de oito nós, com três graus de liberdade por nó e um ponto de integração. Devido à existência de uma grande deformação do alvo na zona de impacto, há necessidade de usar um controlador que permite reduzir perturbações numéricas. As instabilidades, resultantes da existência de modos de energia nula, podem ser controladas através da activação de um módulo de controlo de *hourglass*, incorporado no LS-Dyna™. Este módulo de controlo designa-se por \*CONTROL\_HOURLASS.

Sendo o alvo o componente estrutural de maior importância em todo este trabalho, uma vez que é o seu desempenho que está a ser avaliado, torna-se conveniente desenvolver malhas de elementos finitos adequadas às condições e geometria (espessura, diâmetro) a ser utilizadas nas simulação. Consequentemente, no alvo, optou-se por realizar duas zonas de refinamento distinto: (i) uma zona mais refinada, localizada no centro do alvo, precisamente na zona de impacto do projectil, e (ii) a restante área do alvo, menos refinada, uma vez que os gradientes de deformação e tensão esperados são menos significativos. Como consequência desta abordagem, com o aumento do ângulo de impacto, a zona de maior refinamento da malha de elementos finitos foi alargada uma vez que a zona de influência do impacto no alvo também aumenta para zonas mais afastadas do centro do alvo. Porém, neste caso, o tempo de processamento aumenta significativamente, com o consequente aumento do número de elementos finitos. Nas figuras 5.2 e 5.3 encontram-se representados alguns dos alvos e refinamentos de malha realizados.

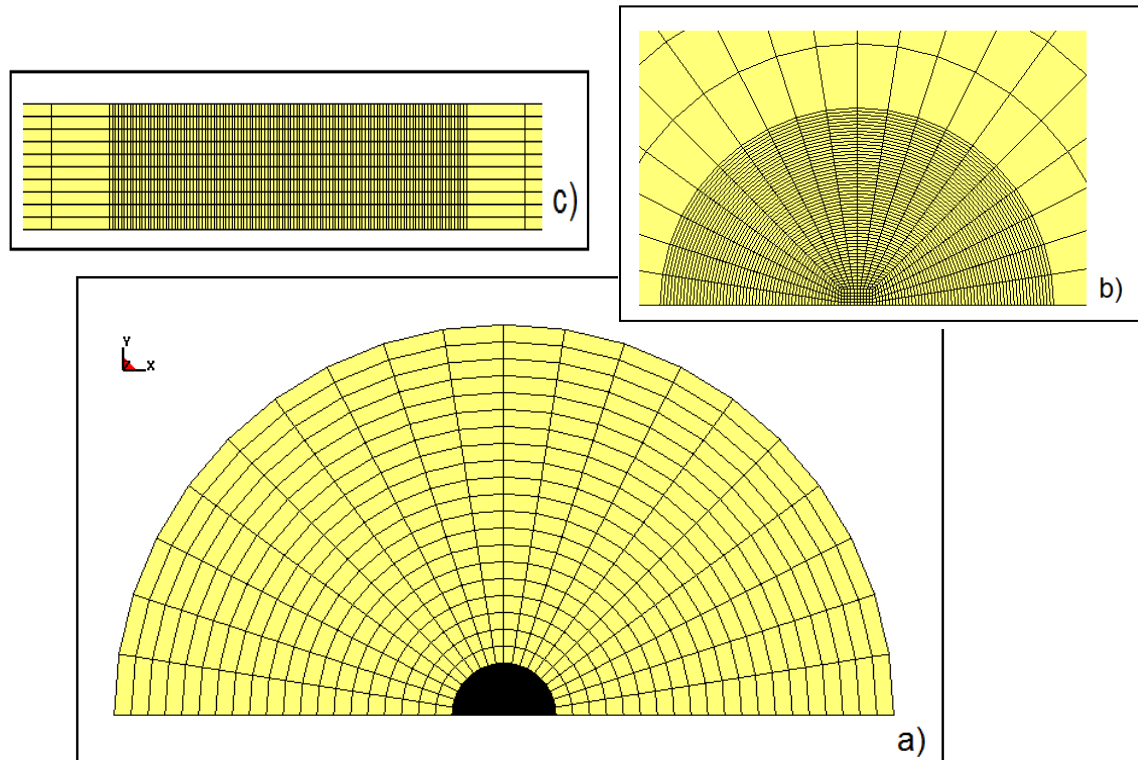


Figura 5.2- Representação esquemática da malha, pouco refinada, de elementos finitos utilizada na discretização do alvo de 5mm para pequenos ângulos de impacto. (a) vista ortogonal do alvo; (b) Ampliação da zona refinada; (c) Refinamento da malha em espessura.

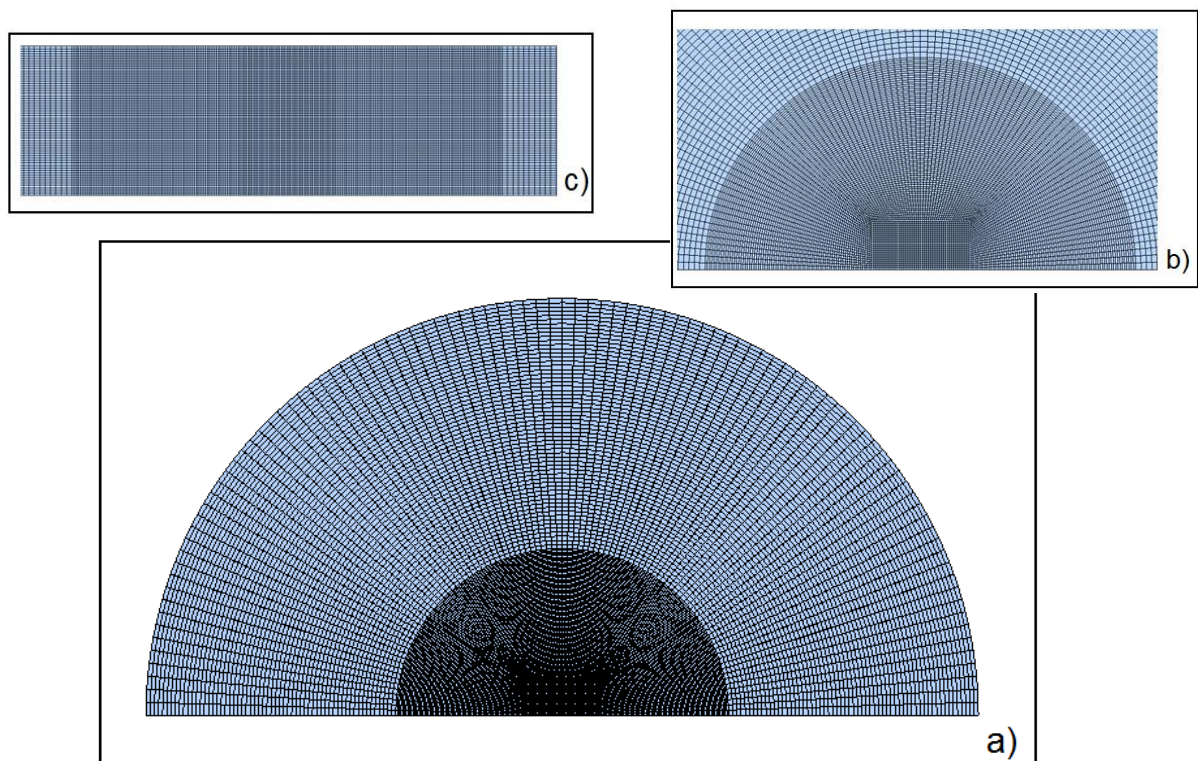


Figura 5.3- Representação esquemática da malha, muito refinada, de elementos finitos utilizada na discretização do alvo de 20mm para elevados ângulos de impacto: (a) vista ortogonal do alvo, (b) Ampliação da zona refinada e (c) Refinamento da malha em espessura.

Na tabela 5.2 indicam-se as características das malhas de elementos finitos realizadas, nomeadamente, o número de elementos e o número de nós correspondentes aos refinamentos do alvo de 5 mm com pequenos ângulos de impacto e ao alvo de 20 mm para os ensaios com elevado ângulo de impacto. Considerou-se pequenos ângulos de impacto, aos ângulos entre os 0 e os 30°, pois atingiam uma pequena área central do alvo. Os chamados elevados ângulos de impacto designam-se por aqueles em que o refinamento do alvo tem que ser maior, pois os elementos que são *varridos*, ou seja eliminados pelo projectil abrangem uma maior área de do alvo, como por exemplo ângulos de 50 a 85°.

Tabela 5.2- Caracterização das malhas de elementos finitos.

Designação	Número de Elementos	Número de Nós
5mm (< $\alpha$ )	15500	31473
20mm (> $\alpha$ )	885000	926465

## 5.4 Modelo de elementos finitos do projectil

Para criar as malhas de elementos finitos do projectil utilizado nas simulações numéricas, utilizaram-se duas ferramentas: o *SolidWorks* e o *Hypermesh*. Foi necessário recorrer a este programa de pré-processamento devido à geometria do projectil, uma vez que o LS-Dyna™ não possui as ferramentas necessárias para uma boa representação quer da forma quer da malha de elementos finitos do projectil.

Como foi referido anteriormente, o projectil é constituído por duas partes, um invólucro de cobre que reveste o interior em chumbo. Inicialmente criaram-se ambas as partes do projectil usando o *SolidWorks*, sendo posteriormente importadas para o *Hypermesh*, num ficheiro com extensão \*.IGS, onde são definidos apenas os elementos casca, representativos das superfícies exteriores de ambas as partes do projectil. Com o *Hypermesh* ambas as partes foram discretizadas de maneira a importar a geometria para o LS-Dyna™, pois importando o ficheiro \*.IGS directamente para o LS-Dyna™ não haveria hipótese de alteração da geometria.

Após a importação do ficheiro para o LS-Dyna™, foi possível recorrer a uma ferramenta associada ao LS-Dyna™ – o *2DMesh* –, de modo a criar, tal como o nome

indica uma malha de elementos casca. Após a malha de elementos finitos bidimensional ter sido criada, foi necessário utilizar comando SPIN que gera elementos sólidos a partir de elementos casca. Neste caso foi necessário rodar 180°, de maneira a criar apenas metade de um projectil, tal como foi referido anteriormente, devido à simetria do problema, apenas metade do projectil e alvo é representado neste estudo. A figura 5.4 representa esquematicamente a malha de elementos finitos das duas partes constituintes do projectil.

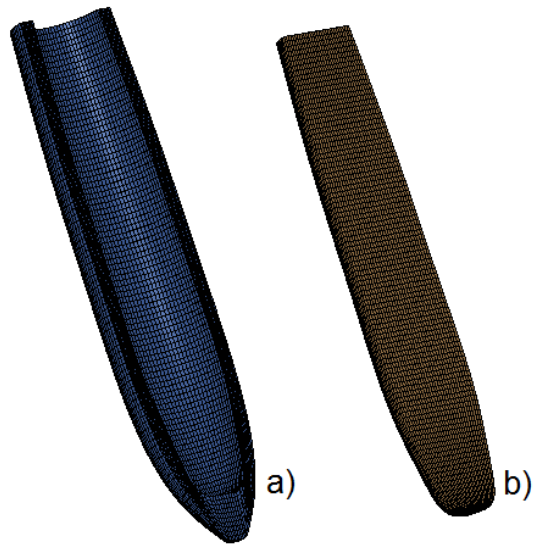


Figura 5.4- Representação esquemática da malha de elementos finitos utilizada na discretização do projectil: a) invólucro e (b) interior do projectil 7.62 NATO.

## Capítulo 6

# Resultados e Discussão

Neste capítulo do trabalho são confrontados e discutidos os resultados obtidos através das simulações numéricas para os diferentes ângulos de impacto e espessuras do alvo e considerando o alvo como uma estrutura deformável, o projectil rígido ou deformável. São analisados os parâmetros de absorção de energia por parte do alvo durante o impacto.

---

Na secção seguinte apresenta-se uma análise detalhada da capacidade de absorção do alvo de liga de Alumínio 5083-H116. Realizam-se estudos de simulações em que os alvos, com diferentes espessuras, se encontram sujeitos a diferentes ângulos de impacto. Inicialmente, considera-se o projectil como uma estrutura rígida e de seguida comparam-se resultados considerando o projectil deformável.

## 6.1 Capacidade de absorção de energia - Projétil rígido

### 6.1.1 Influência da espessura do alvo

Nas figuras 6.1 a 6.3 mostra-se a variação da energia cinética do projétil ao longo do tempo, para ângulos de impacto compreendidos entre 0 e 55°. Note-se que, para simplificar a análise, a escala da energia cinética foi truncada. Em todos estes resultados é possível observar que à medida que a simulação decorre, a energia cinética diminui e a energia cinética final diminui com o aumento do ângulo, o que leva a um aumento de absorção de energia por parte do alvo. Mais uma vez esse caso explica-se pelo aumento da quantidade de material que interage com o projétil à medida que o ângulo de impacto aumenta.

Na análise dos resultados para os ângulos de impacto 60° e 65°, como se pode ver nas figuras 6.3, todos eles se comportam de igual modo aos ângulos referidos anteriormente. Embora existam algumas perturbações claramente notáveis nos gráficos, principalmente para as espessuras de 15 e 20mm. Essas irregularidades estão associadas aos fenómenos de perfuração do alvo pelo projétil na zona menos refinada do alvo. Como foi referido anteriormente, o alvo apresenta uma zona muito refinada que se refere à região central onde o projétil inicia o contacto com o alvo, e uma zona menos refinada, que corresponde ao resto do alvo. A opção por realizar duas zonas com níveis de refinamento distintos deve-se única e exclusivamente ao facto de minimizar o tempo de cálculo. Na figura 6.4 mostra-se a distribuição de tensões equivalente de von Mises para a simulação numérica do impacto ortogonal, 0°, de um projétil 7.62 x 51mm NATO num alvo de espessura de 5mm, onde é claramente visível as duas zonas de refinamento bem como um fenómeno de perfuração, formação de pétalas (petaling). Este fenómeno, como foi referido anteriormente, ocorre quando a tensão de cedência é excedida na parte do alvo oposta ao impacto do projétil e se desenvolve uma fractura em forma de estrela em volta do projétil. As secções formadas são então empurradas para trás pelo movimento do projétil, formando as pétalas.



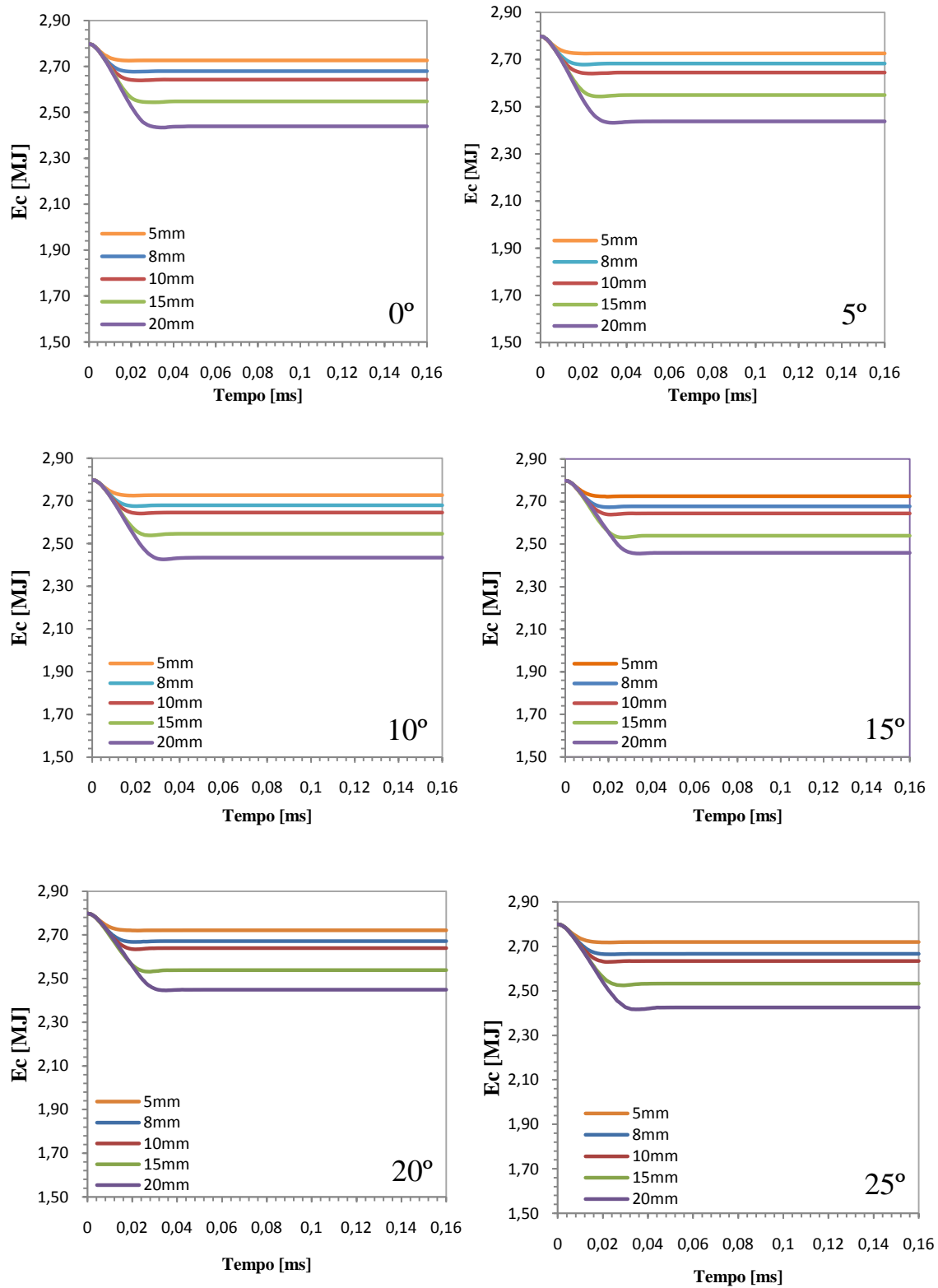


Figura 6.1- Variação da energia cinética em função do tempo, para os ângulos de impacto e espessuras analisadas, para um projectil rígido.

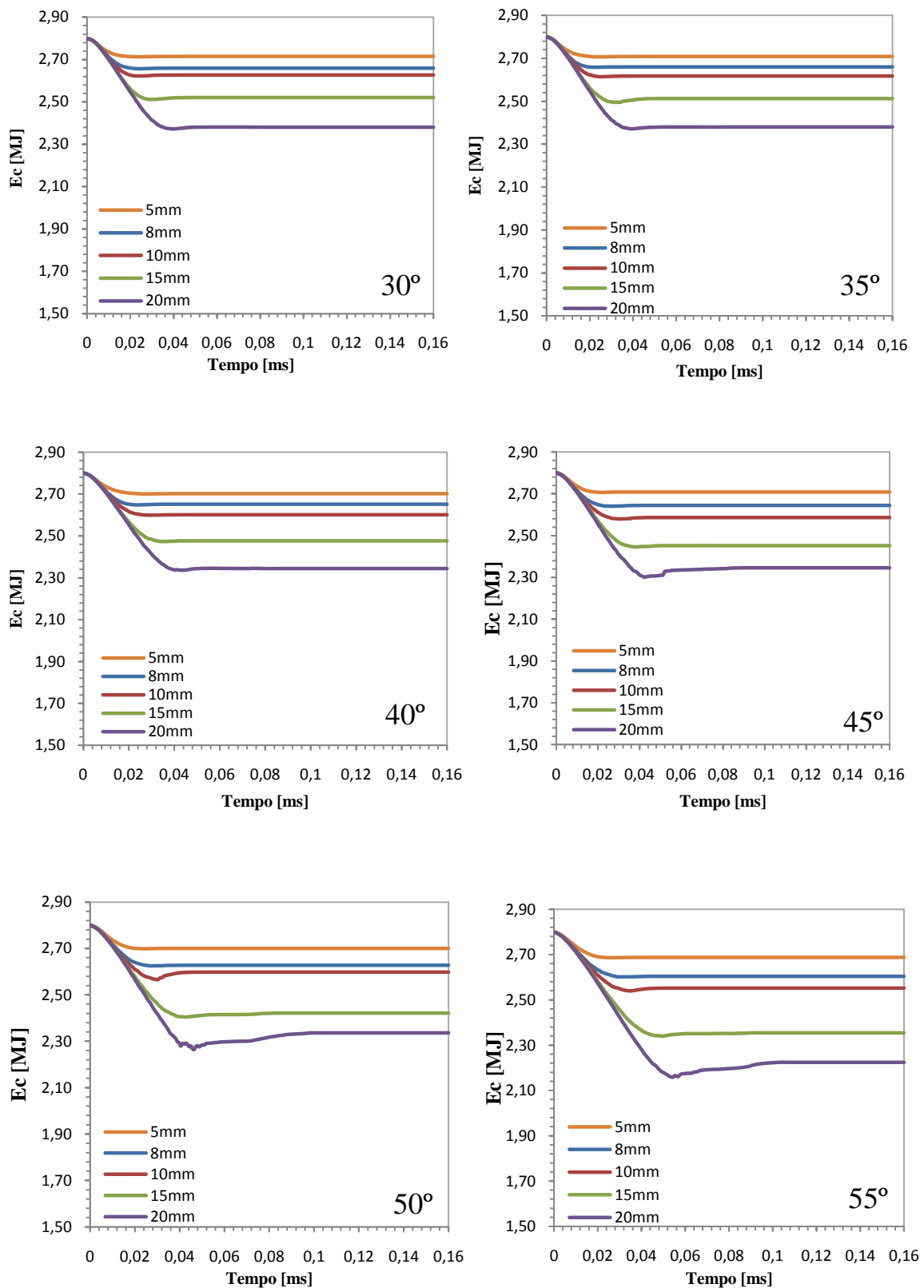


Figura 6.2- Variação da energia cinética em função do tempo, para os ângulos de impacto e espessuras analisadas, para um projectil rígido.

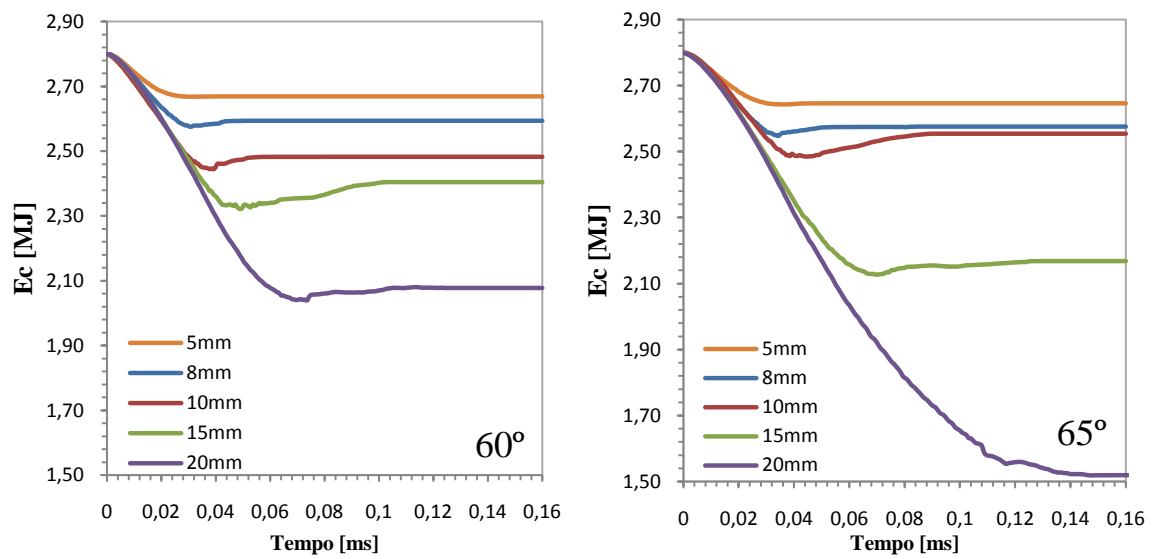


Figura 6.3- Variação da energia cinética em função do tempo, para os ângulos de impacto e espessuras analisadas, para um projectil rígido.

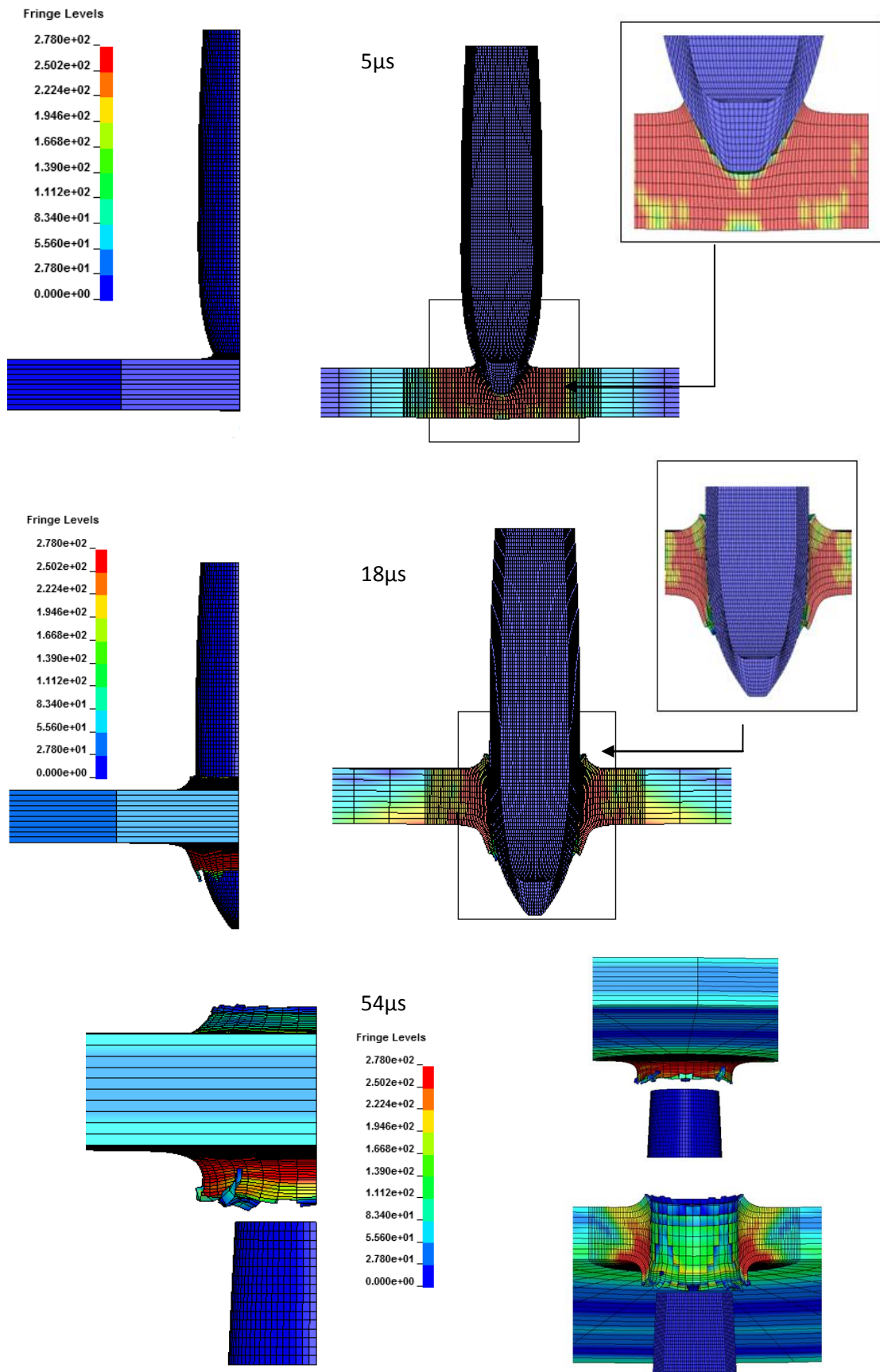


Figura 6.4- Distribuição de tensões equivalente de von Mises para a simulação numérica do impacto ortogonal, 0°, de um projectil rígido 7.62 x 51 mm NATO num alvo de espessura de 5mm.

Na análise dos resultados referentes ao ângulo de  $75^\circ$  (ver figura 6.5) podem observar-se algumas incoerências quando comparadas com os restantes resultados. O que acontece para o alvo de 5 mm de espessura é que o projectil já não perfura como em todos os ângulos anteriormente referidos, daí não existe um varrimento de material tão elevado como existe no alvo de espessura de 8mm, em que o projectil não perfura, mas uma grande parte de material do alvo é rasgada pelo projectil. Refira-se, neste âmbito, a elevada semelhança entre os resultados obtidos para o alvo de 15mm de espessura e de 20mm de espessura: a energia absorvida pelos dois alvos é idêntica. Tal facto pode explicar-se devido ao efeito *ricochete* do projectil, isto é, a mudança progressiva de direcção do projectil após o impacto com o alvo. Este fenómeno ocorre logo no início do impacto devido à maior espessura dos alvos, que aumenta, conseqüentemente, o seu desempenho balístico.

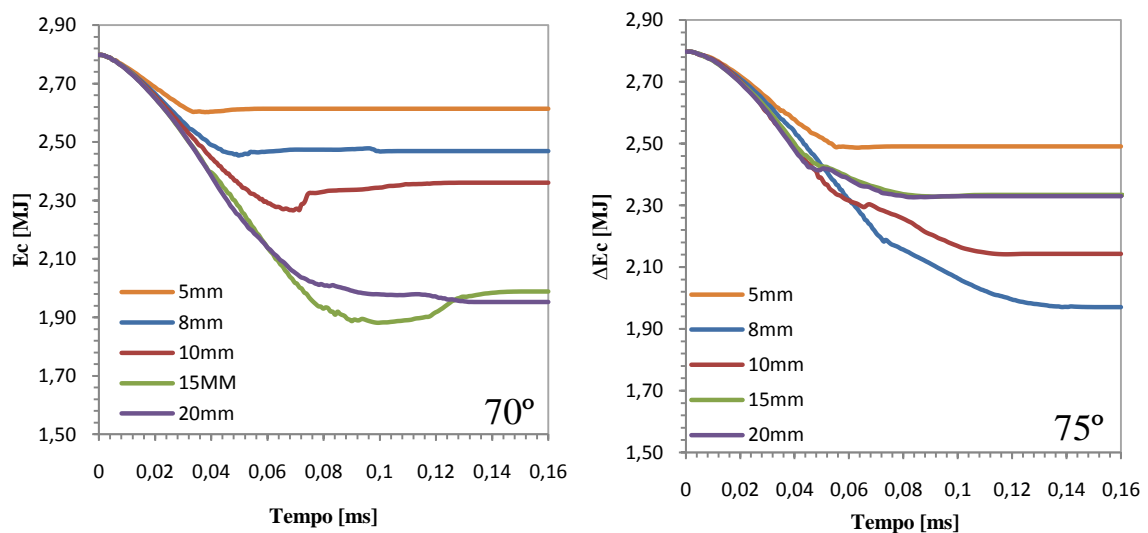


Figura 6.5- Variação da energia cinética em função do tempo, para os ângulos de impacto e espessuras analisadas, para um projectil rígido.

Enquanto nos gráficos das figuras 6.1 a 6.3, o alvo de espessura de 5mm era o que apresentava uma absorção de energia inferior, para o ângulo de impacto de 80° o mesmo não acontece. Como é possível observar através dos resultados da figura 6.6, quanto menor for a espessura, maior será a energia absorvida. Este facto pode explicar-se devido aos dois fenómenos descritos anteriormente: volume de material percorrido e *ricochete* do projectil, estando estes fenómenos interligados. Uma vez que o projectil altera a sua direcção no momento em que atinge o alvo, sem que haja perfuração significativa do alvo, o volume de material do alvo que irá ser deformado vai ser muito menor para espessuras maiores, daí a absorção de energia do alvo ser inferior.

Tal como seria de esperar, para o ângulo de impacto de 85°, a situação que ocorre no alvo de 80° mantém-se. Para espessuras inferiores e ângulos de impacto superiores, a capacidade de absorção de energia do alvo é superior quando comparada com alvos de espessura superior.

A figura 6.7 mostra a distribuição de tensões equivalentes de von Mises, no instante em que o projectil perfura o alvo, para a simulação numérica do impacto a 80° de um projectil rígido 7.62 x 51mm NATO num alvo de espessura de 5mm, o que comprava que quanto maior a quantidade de material do alvo que é deformada durante o impacto do projectil, maior a absorção de energia do alvo. Pode ainda concluir-se que, quanto maior a espessura do alvo menor o ângulo de impacto que permite que haja perfuração total do alvo, como seria de esperar.

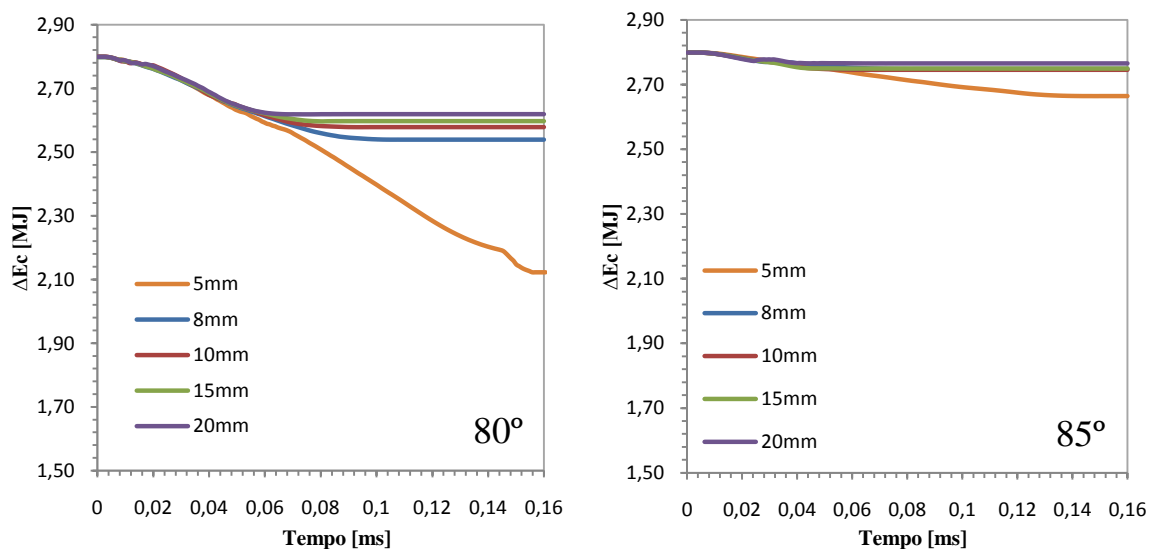


Figura 6.6- Variação da energia cinética em função do tempo, para os ângulos de impacto e espessuras analisadas, para um projectil rígido.

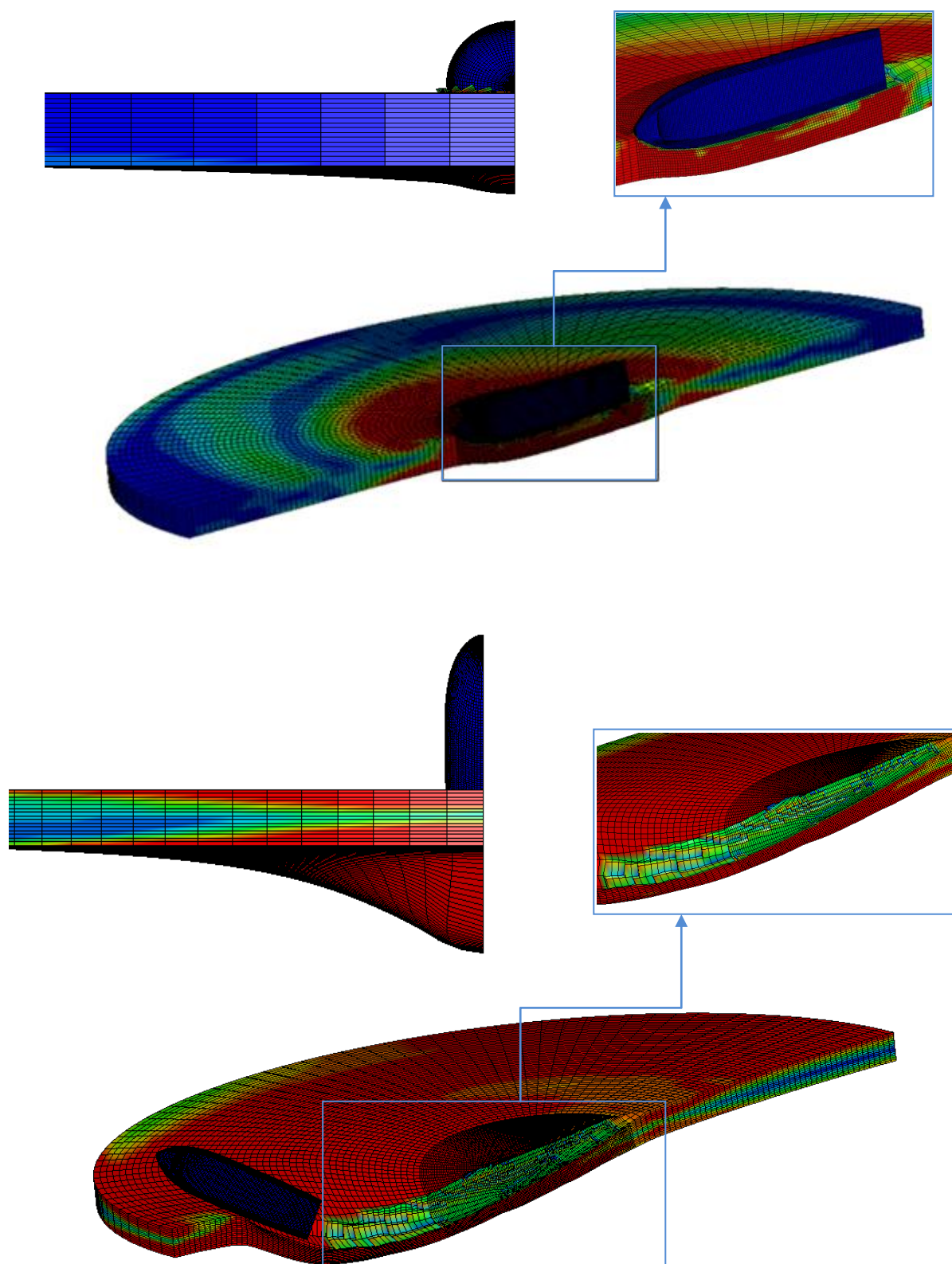


Figura 6.7- Distribuição de tensões equivalente de von Mises para a simulação numérica do impacto ortogonal, 80°, de um projétil rígido 7.62 x 51 mm NATO num alvo de espessura de 5mm.

### 6.1.1.1 Modelo constitutivo da liga de Alumínio 5083-H116

Analisando os resultados que se mostram na figura 7.9 pode determinar-se que a variação da energia absorvida com o ângulo de impacto é, tendencialmente, exponencial. Consequentemente, pode propor-se uma relação genérica do tipo,

$$E = E^* + Ae^{(n.\alpha)}$$

em que  $\alpha$ , é o ângulo de impacto,  $E$  é a energia absorvida no impacto,  $E^*$  e  $A$  são constantes que verificam a relação,

$$E_0 = E^* + A$$

ou seja,  $E^* + A$  representa a energia absorvida para o impacto ortogonal. A constante  $n$  determina a forma como a energia absorvida varia com o ângulo, ou seja, valores de  $n$  mais elevados referem-se a uma variação mais brusca da energia absorvida, enquanto que valores de  $n$  mais reduzidos dizem respeito a variações mais suaves da absorção de energia.

Na tabela 6.1 apresentam-se os valores de  $n$ ,  $E^*$ ,  $A$  e  $(E^*+A=E_0)$  para os alvos com diferentes espessuras. Como se pode verificar, analisando o gráfico da figura 7.9 e os valores da tabela 6.1, a capacidade de absorção de energia aumentam, como seria de esperar, com o aumento da espessura do alvo.

Tabela 6.1 - Valores de  $n$ ,  $E^*$ ,  $A$  e  $(E^*+A=E_0)$  para os alvos com diferentes espessuras.

Espessura	$n$	$E^*$ [MPa]	$A$ [MPa]	$(E^*+A=E_0)$ [MPa]
5mm	0,176	86728	0,456	86729
8mm	0,229	142022	0,023	142022
10mm	0,111	168639	111,3	168750
15mm	0,085	258165	1380,8	259545
20mm	0,164	382527	20,2	382547



A variação com o tempo da energia cinética para todos os ângulos de impacto analisados está representada na figura 6.9. Com estes resultados pretende analisar a evolução da energia absorvida pelo alvo desde o momento em que projectil inicia o seu movimento, até ao momento que mesmo abandona o alvo. Pela análise do gráfico nota-se claramente uma tendência exponencial para as diferentes espessuras analisadas, atingindo um pico para um dado ângulo de impacto. Esse valor máximo de energia cinética ocorre para ângulos de impacto para os quais o projectil deixa de perfurar por completo o alvo. Enquanto que na espessura do alvo de 5 mm este pico ocorre para o ângulo de impacto de 80°, nos alvos de 8 e 10mm de espessura o projectil deixa de perfurar o alvo para o ângulo de impacto de 75°, pois a diferença das espessuras é muito pequena e em espessuras de 15 e 20mm, o pico encontra-se compreendido entre os ângulos de 65 e 70°, respectivamente. Nas figuras 6.10 e 6.11 mostra-se a distribuição de tensões equivalente de von Mises para a simulação numérica do impacto a 65° de um projectil rígido 7.62 x 51 mm NATO num alvo de espessura de 20mm, pode então concluir-se que quanto maior for a espessura do alvo, menor será o ângulo em que deixa de existir perfuração total do alvo por parte do projectil.

Para as espessuras de 10 e 20mm, podem observar-se algumas perturbações nos gráficos, devido à extrema dificuldade em encontrar a malha de elementos finitos ideal, apesar de se ter estado muito próximo. Porém, o tempo de processamento aumentou drasticamente e, apesar dessas pequenas inconsistências nos resultados, não deixa de ser evidente a tendência exponencial para diferentes espessuras de alvos.

Relativamente à energia envolvida nas simulações, verificou-se, como seria de esperar, o aparecimento de modos de energia espúria (*hourglass*). Porém, a ordem de grandeza desta componente de energia é muito pequena e semelhante em todas as simulações numéricas. Consequentemente, não foi necessário a sua análise detalhada. Nesse sentido, na figura 6.8, representa-se o quociente de energia. Como é possível observar, este quociente é sempre muito próximo de 1, o que seria de esperar uma vez que é o quociente entre a energia total e a soma da energia inicial com o trabalho externo. Assim, para o balanço de energia ser ideal, esse quociente tem que ser o mais próximo de 1 possível.

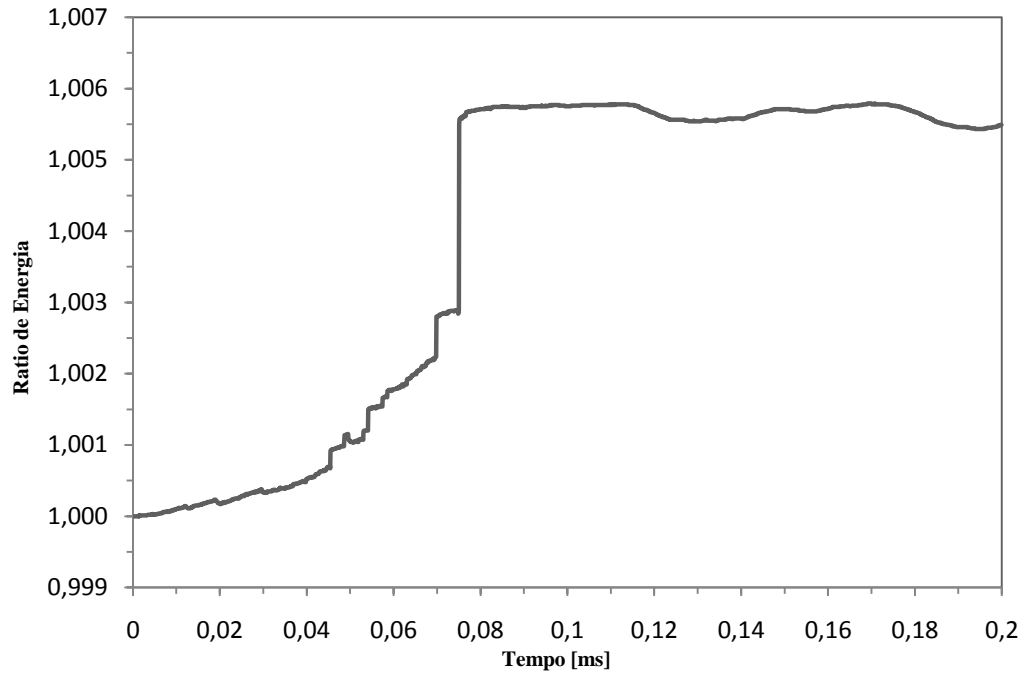


Figura 6.8- Quociente entre a energia total e a soma da energia inicial com o trabalho externo em função do tempo. para facilitar a visualização a escala do quociente de energias foi truncada.

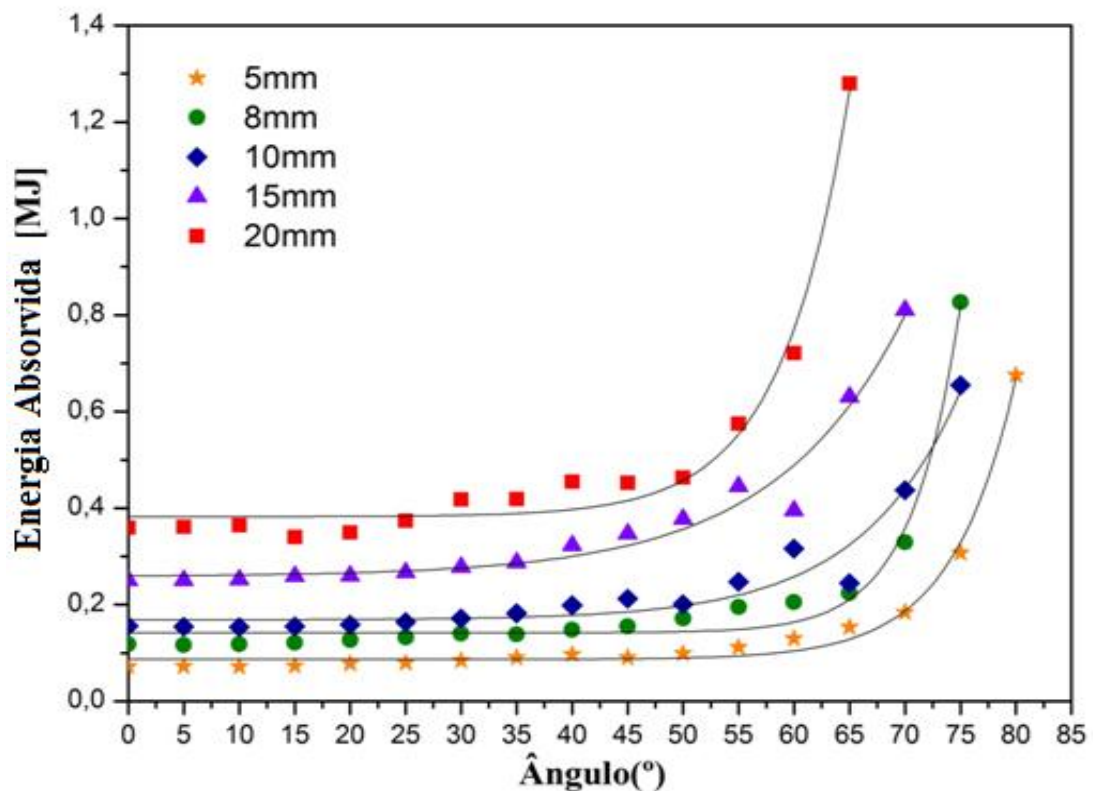


Figura 6.9- Energia Cinética em função do ângulo de impacto para as diferentes espessuras analisadas para um projectil rígido.

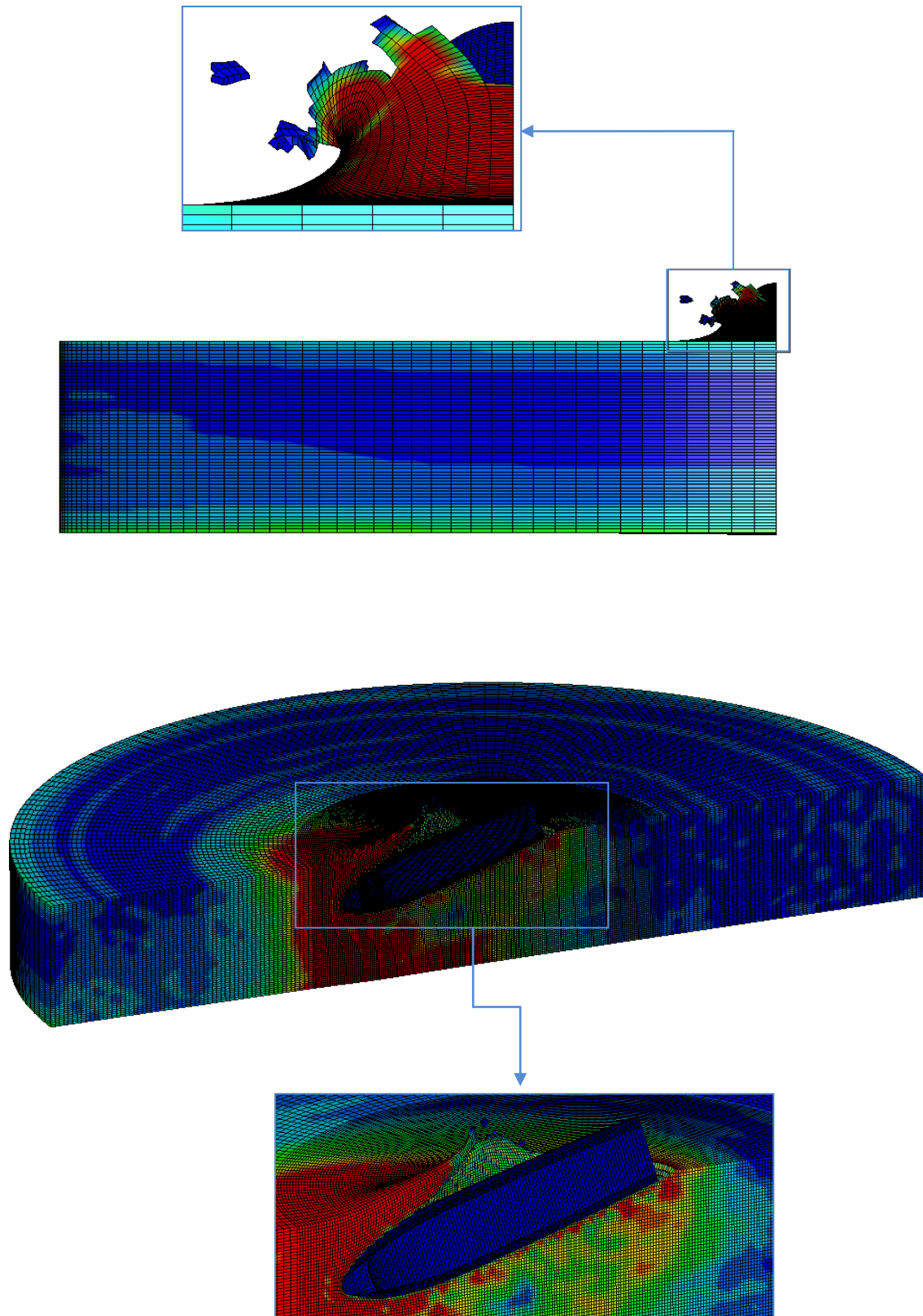


Figura 6.10- Distribuição de tensões equivalentes de von Mises para a simulação numérica do impacto 65°, de um projectil rígido 7.62 X 51 mm NATO num alvo de espessura de 20mm, após 35 $\mu$ s.

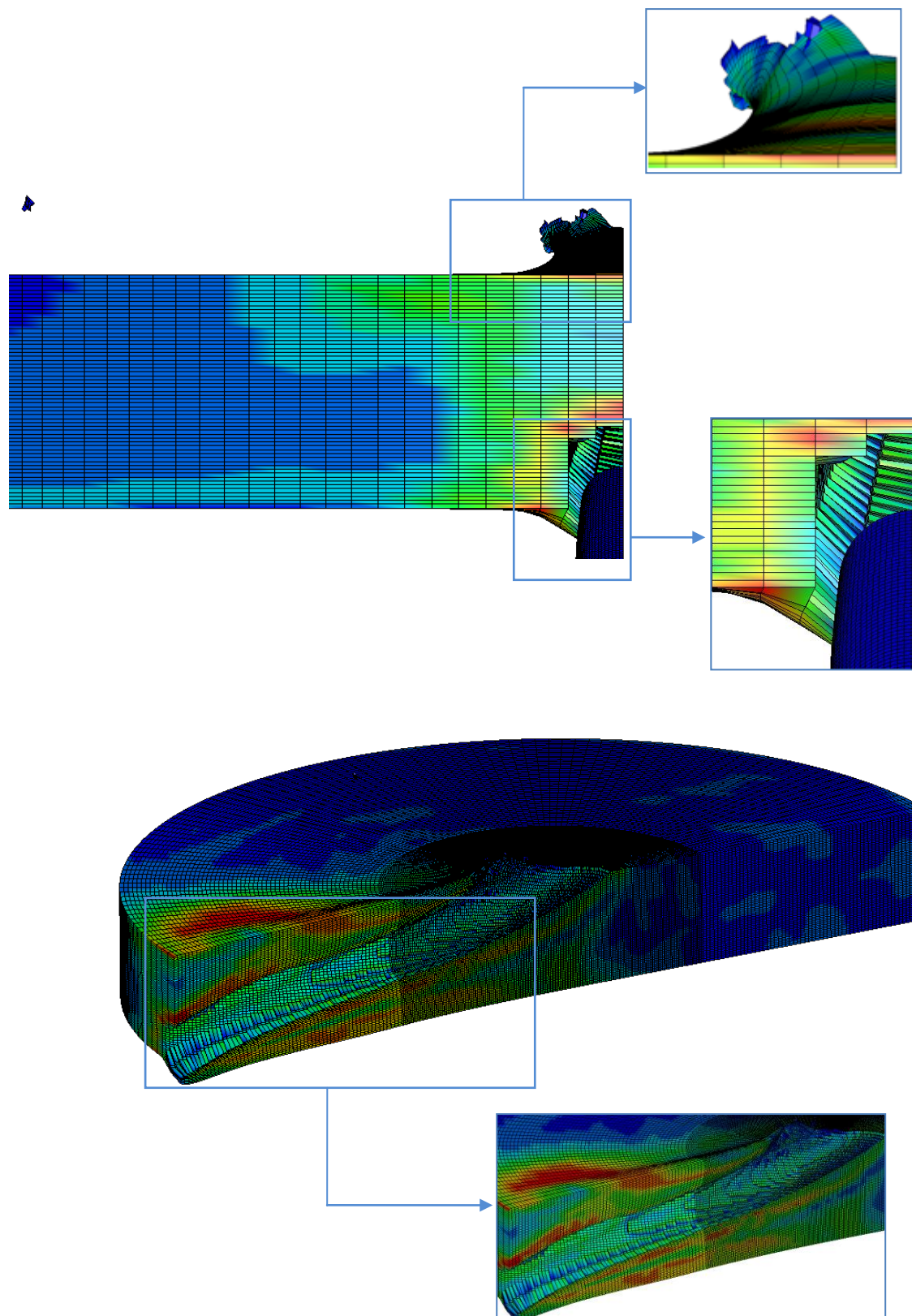


Figura 6.11- Distribuição de tensões equivalentes de von Mises para a simulação numérica do impacto 65°, de um projectil rígido 7.62 X 51 mm NATO num alvo de espessura de 20mm, após 117 $\mu$ s.

### 6.1.2 Influência do ângulo de impacto

Nos gráficos das figuras 6.12 a 6.16 representa-se a evolução da energia cinética com o tempo de impacto, para os diferentes alvos analisados, isto é, para os alvos com espessuras de 5, 8, 10, 15 e 20mm. Como é possível observar, o tempo de impacto aumenta com o aumento do ângulo e a taxa de variação de energia cinética é aproximadamente constante para os casos em que existe perfuração total, diminuindo a partir do primeiro ângulo em que ocorre *ricochete*, ou seja, em que o projectil já não perfura o alvo totalmente. Como foi referido anteriormente, existem perturbações nas curvas de energia cinética em função do tempo para os ângulos de impacto maiores. Tal se deve à dificuldade de encontrar a malha de elementos finitos do alvo ideal, tendo em conta os constrangimentos relacionados com o tempo de processamento.

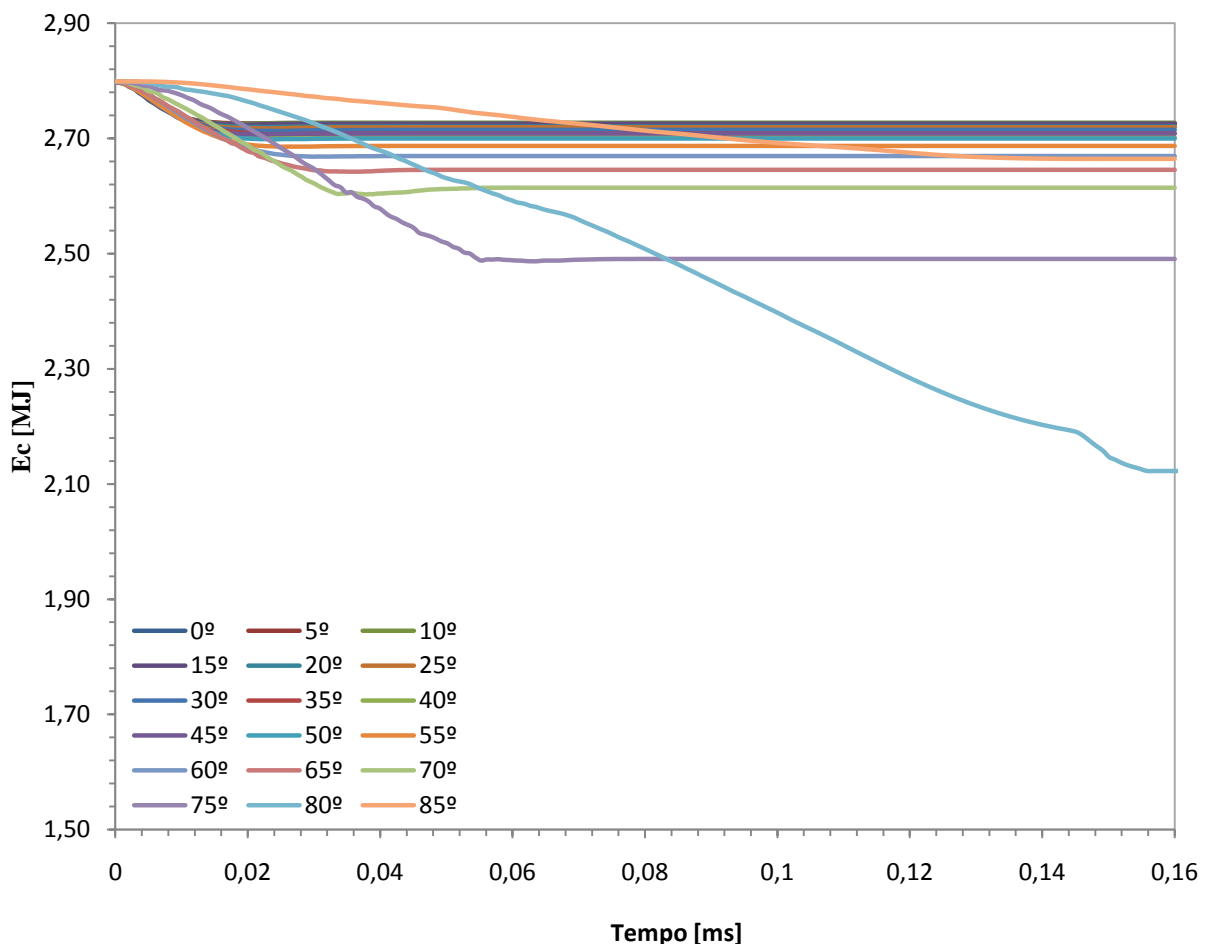


Figura 6.12- Variação da energia cinética em função do tempo para todos os ângulos de impacto analisados, para o alvo de 5 mm de espessura e um projectil rígido.

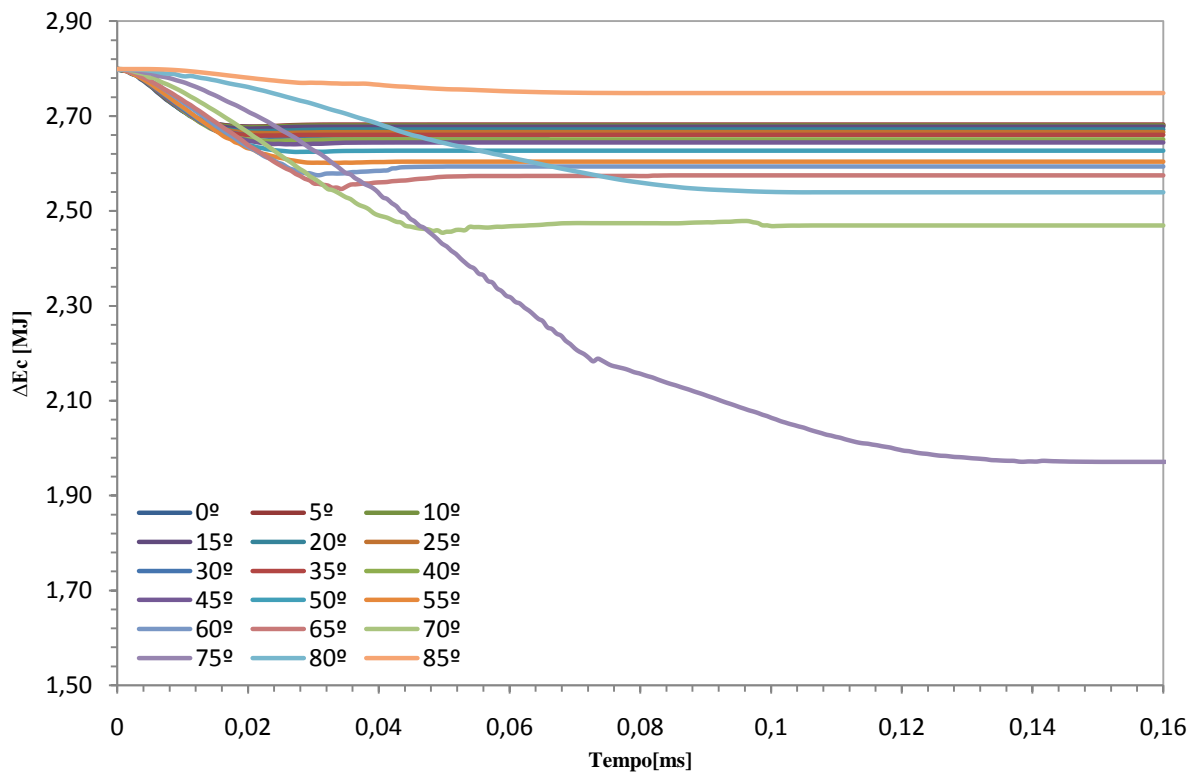


Figura 6.13- Variação da energia cinética em função do tempo para todos os ângulos de impacto analisados para o alvo de 8mm e um projétil rígido.

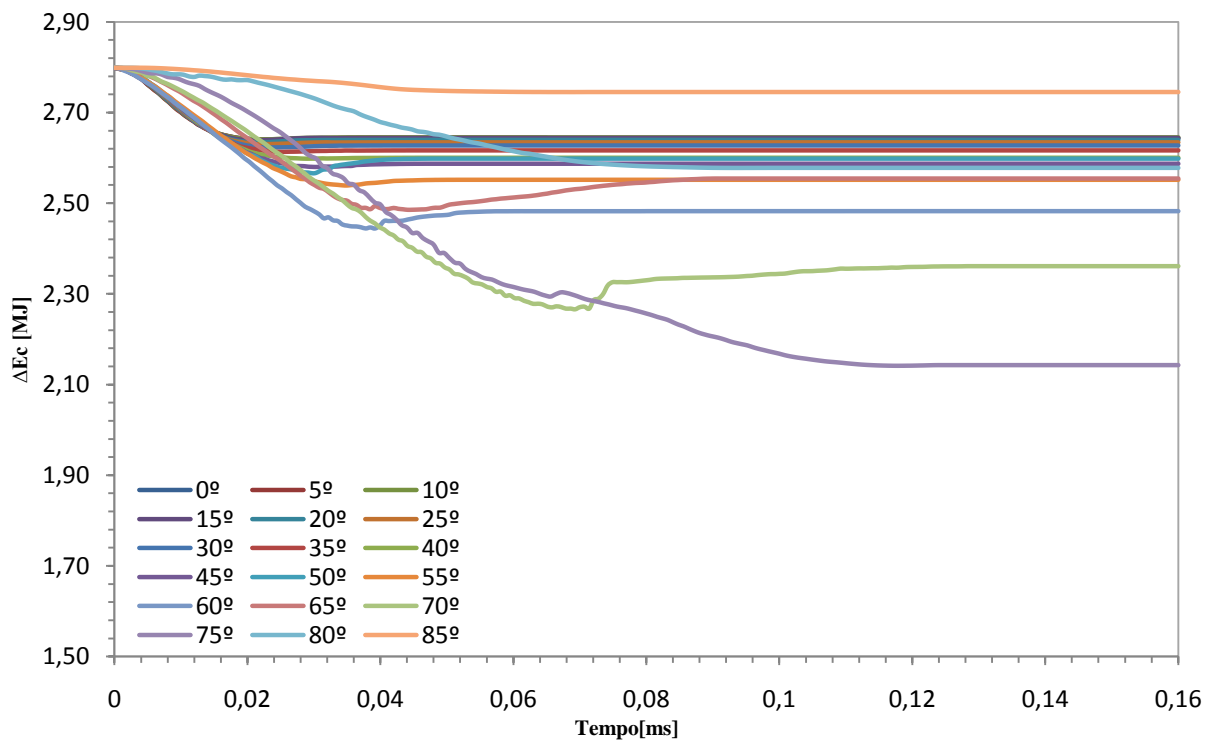


Figura 6.14- Variação da energia cinética em função do tempo para todos os ângulos de impacto analisados para o alvo de 10mm e um projétil rígido.

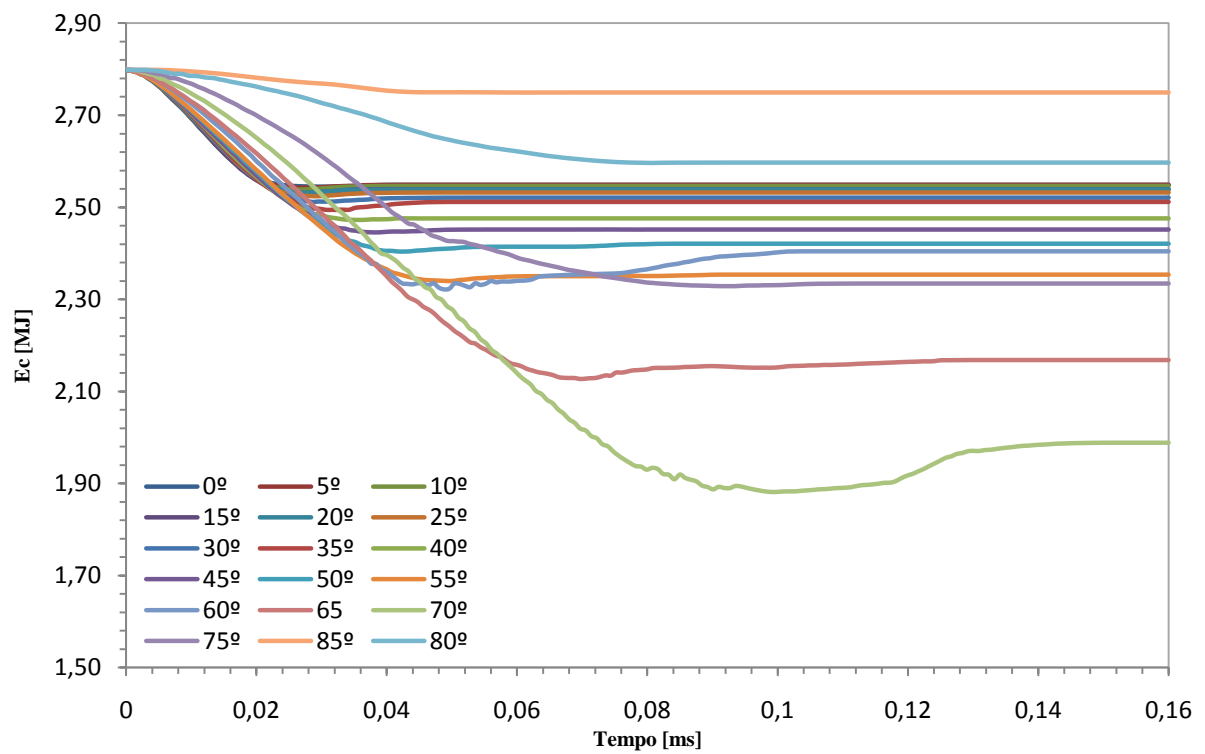


Figura 6.15- Variação da energia cinética em função do tempo para todos os ângulos de impacto analisados para o alvo de 15mm e um projétil rígido.

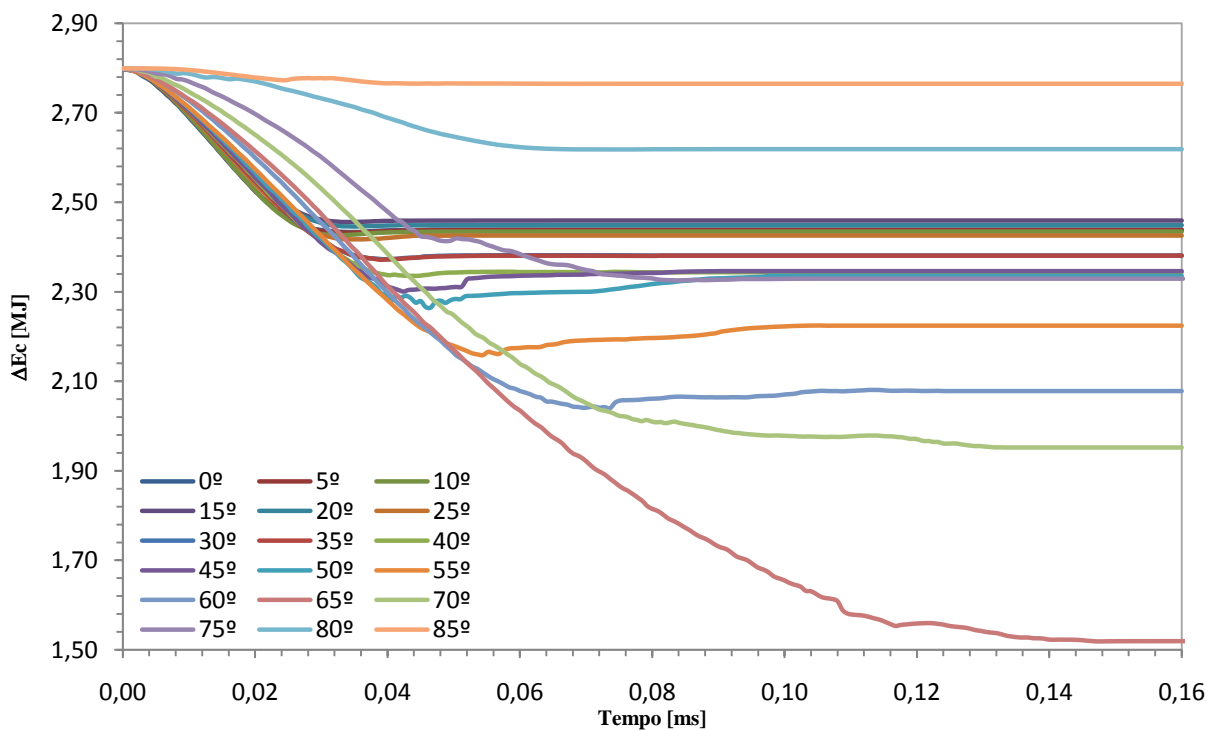


Figura 6.16- Variação da energia cinética em função do tempo para todos os ângulos de impacto analisados para o alvo de 20mm e um projétil rígido.

## 6.2 Capacidade de absorção de energia- Projétil deformável

No estudo da capacidade de absorção de energia do alvo para um projétil deformável, apenas foram testadas espessuras de 5 e 8mm, para ângulos de impacto de 0-25°. Optou-se pela realização destas espessuras, para obter uma comparação entre ensaios deformáveis e ensaios rígidos, capacidade de absorção do projétil tendo como material do seu interior chumbo e o aço Wieldox 400.

Na análise do alvo de 5mm para ensaios deformáveis e rígidos, apesar de não ser claramente visível na figura 6.12 os ângulos de 0 a 25°, é possível observar que a energia absorvida por parte do alvo, ronda os 0.3MJ, enquanto que na figura 6.17, que corresponde à variação de energia cinética em função do tempo com um projétil deformável, a capacidade de absorção do alvo é menor, cerca de 1/3, tal facto é explicado pois a densidade do chumbo, material usado para o interior do projétil nas simulações rígidas, é superior (cerca de 7/5), quando comparada ao aço Wieldox 400, usado nos projéteis deformáveis. Relativamente à capacidade de absorção de energia apenas o impacto a 25° se destaca, sendo superior quando comparando com os outros ângulos de impacto.

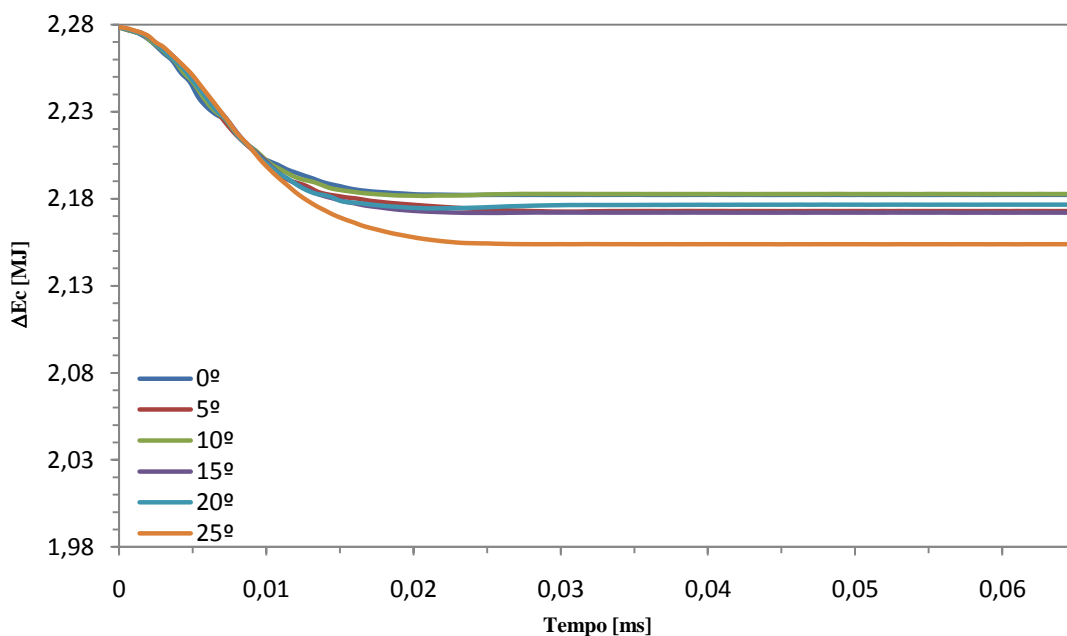


Figura 6.17- Variação da energia cinética em função do tempo para os ângulos de impacto analisados para o alvo de 5mm e um projétil deformável.

Na figura 6.18 mostra-se a distribuição de tensões equivalente de von Mises para a simulação numérica do impacto a 10° de um projétil deformável 7.62 x 51mm NATO num alvo de espessura de 5mm. Como se pode ver nota-se a parte do projétil que sofre uma maior deformação é a parte exterior de cobre, pois a sua tensão de cedência é inferior à do aço balístico e além disso o invólucro de cobre tem como função proteger a



parte interior do projectil de maneira a conservar as propriedades mecânicas do aço balístico, para que a sua performance na perfuração do alvo seja extremamente eficaz.

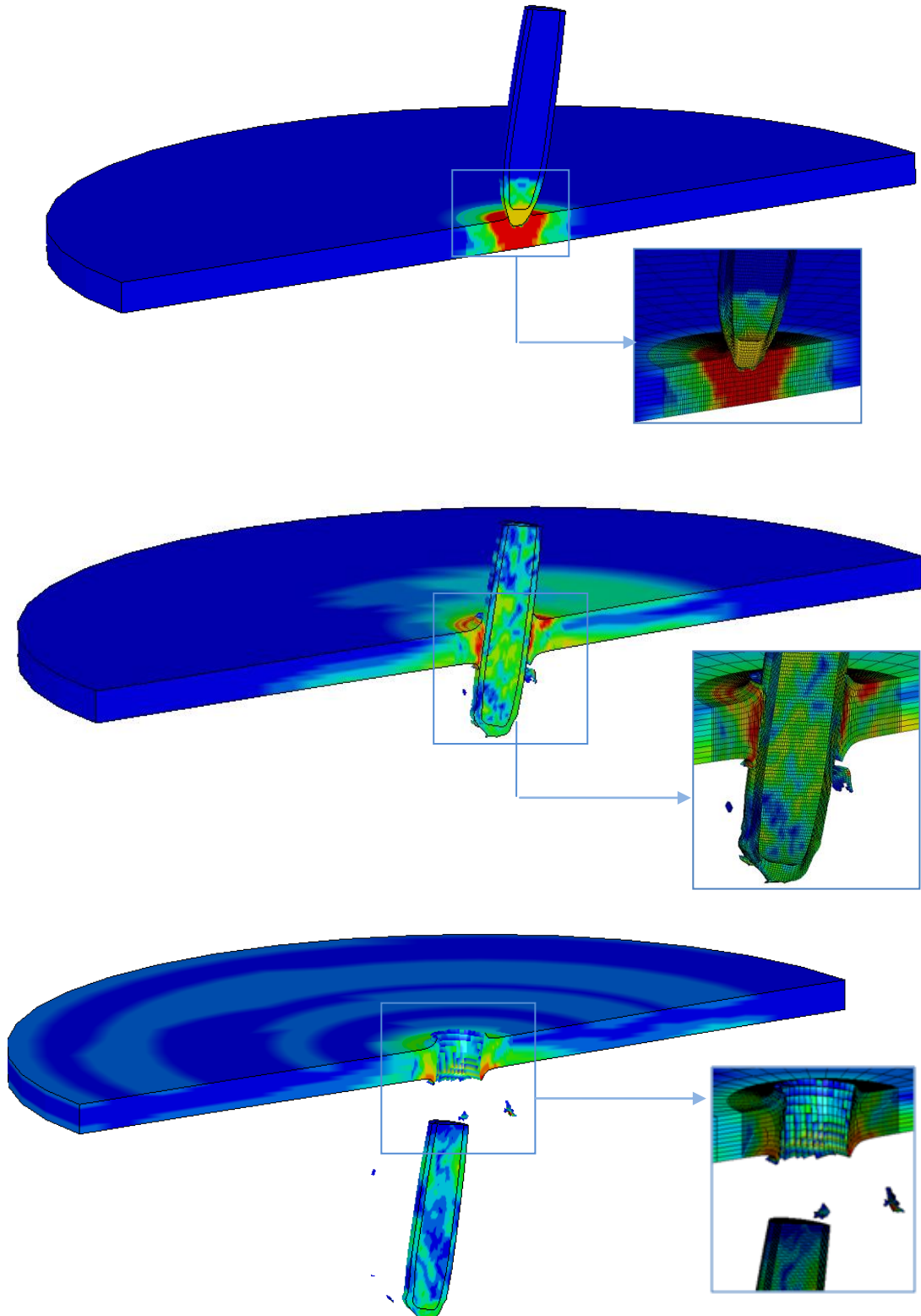


Figura 6.18- Distribuição de tensões equivalente de von Mises para a simulação numérica do impacto a  $10^\circ$  de um projectil deformável 7.62 x 51 mm NATO num alvo de espessura de 5 mm.

A variação da energia cinética em função do tempo para simulações numéricas de um alvo de 8mm com ângulos de impacto de 0° a 25° de um projectil deformável encontra-se representado na figura 6.18. Na análise da influência do ângulo de impacto, tal como acontecia nos ensaios com projecteis rígidos, à medida que o ângulo de impacto do projectil aumenta a capacidade de absorção do alvo aumenta. O tempo de impacto aumenta com o aumento do ângulo e a taxa de variação de energia cinética é aproximadamente constante para os ângulos analisados.

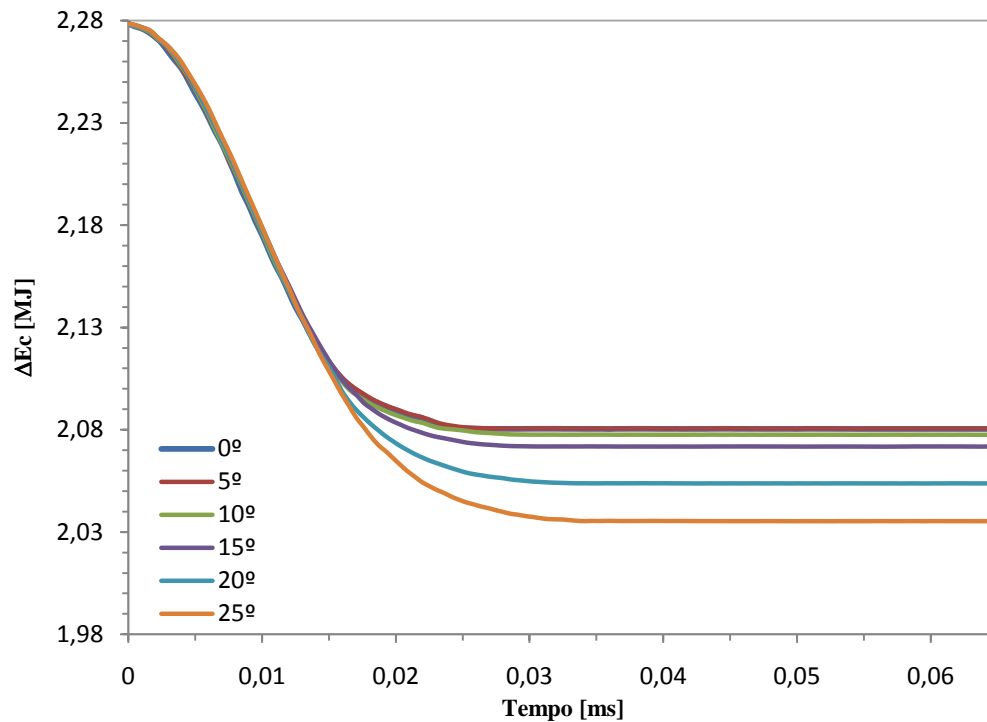


Figura 6.19- Variação da energia cinética em função do tempo para os ângulos de impacto analisados para o alvo de 5mm e um projectil deformável.

Relativamente à influência da espessura, ao observar-se a figura 6.17 e 6.19, à medida que a espessura aumenta a capacidades de absorção aumenta, tal facto explica-se devido ao aumento de material do alvo que irá ser deformado, daí a absorção de energia do alvo ser inferior.

A figura 6.20 mostra a deformada no instante em que o projectil perfura o alvo, para a simulação numérica do impacto a 20° de um projectil deformável 7.62 x 51 mm NATO num alvo de espessura de 8mm. Embora não ser claramente notável uma maior deformação do projectil, este facto ocorre, pois a espessura do alvo aumenta logo existe um maior o desgaste da parte exterior do projectil.

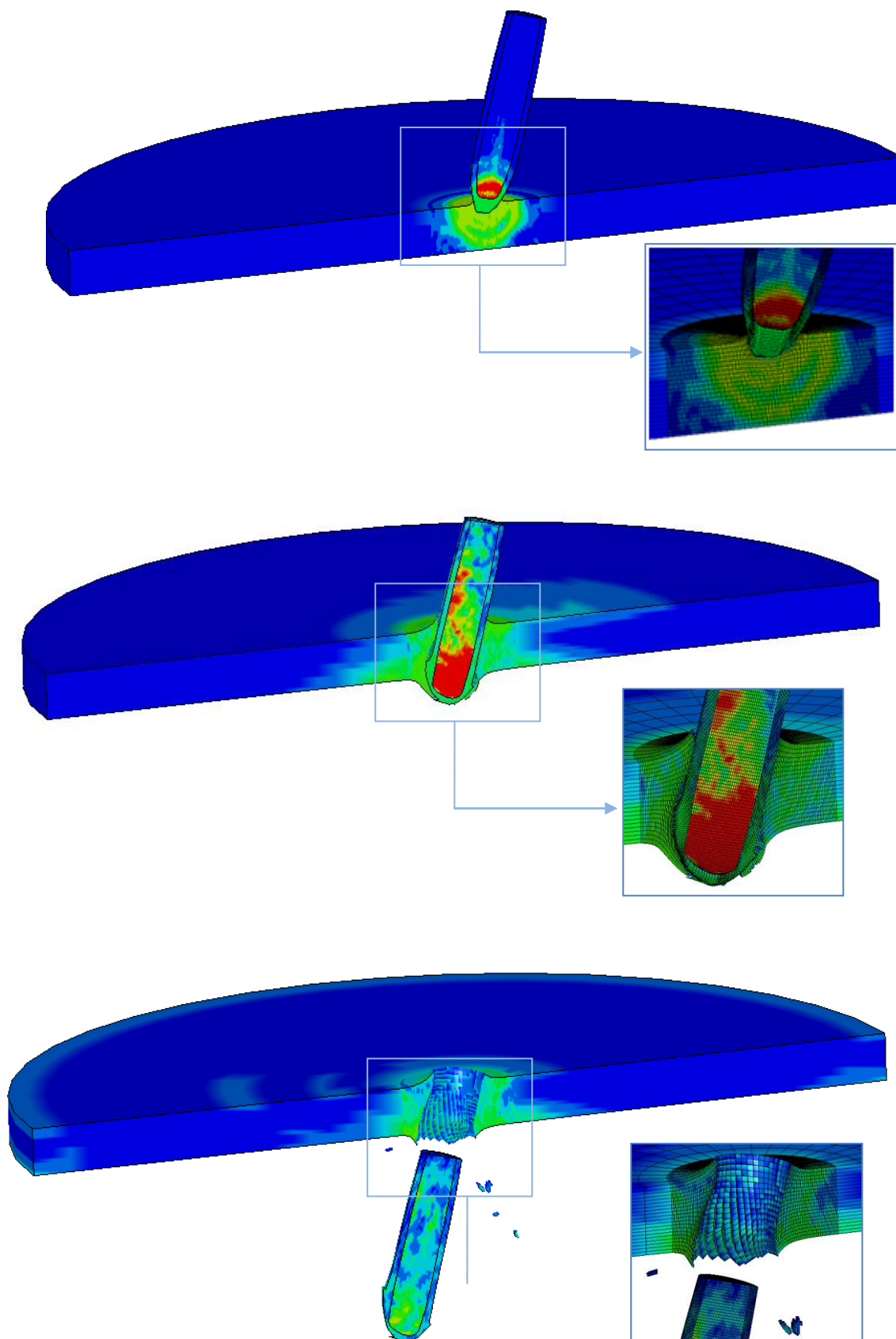


Figura 6.20- Distribuição de tensões equivalente de von Mises para a simulação numérica do impacto a 15° de um projectil deformável 7.62 x 51 mm NATO num alvo de espessura de 8 mm.



# Parte IV

## Considerações Finais



# Capítulo 7

## Conclusões Finais

Nesta secção apresentam-se as conclusões gerais e discutem-se os resultados obtidos ao longo deste trabalho.

---

O objectivo do trabalho consistiu na análise da influência do ângulo de impacto bem como a influência da espessura do alvo, no impacto balístico de um projectil 7.62 x 51 mm NATO num alvo de uma liga de Alumínio 5083-H116.

Numa primeira análise considerou-se o projectil como um corpo rígido e o alvo como um corpo deformável. Analisando os resultados obtidos nas simulações numéricas efectuadas, pode concluir-se que quanto maior o volume de material deformado do alvo durante o impacto do projectil, maior é a capacidade de absorção de energia do alvo. Daí poder afirmar-se que quanto maior a espessura e desde que ocorra perfuração total do alvo, maior a energia absorvida.

Apresentou-se um modelo analítico aproximado, baseado numa aproximação exponencial para a descrição da forma como a energia é absorvida em função do ângulo. Analisando os resultados mostrados na figura 6.9 pode determinar-se que a variação da energia absorvida com o ângulo de impacto é, tendencialmente, exponencial. Em termos de influência do ângulo de impacto, a constante  $n$ , como foi possível constatar, determina a forma como a energia absorvida varia com o ângulo, ou seja, valores de  $n$  mais elevados referem-se a uma variação mais brusca da energia absorvida, enquanto que valores de  $n$  mais reduzidos dizem respeito a variações mais suaves da absorção de energia. Recorrendo aos valores de  $n$ ,  $E^*$ ,  $A$  e  $(E^*+A=E_0)$  para as diferentes espessuras dos alvos, como se pôde verificar a capacidade de absorção de energia aumenta, como seria de esperar, com o aumento da espessura do alvo.

---

Relativamente à influência do ângulo de impacto, tanto para os ensaios com projecteis rígidos como para os ensaios com projecteis deformáveis, o tempo de impacto aumenta com o aumento do ângulo e a taxa de variação de energia cinética é aproximadamente constante para os casos em que existe perfuração total, diminuindo a partir do primeiro ângulo em que ocorre *ricochete*, ou seja, a partir do ângulo em que o projectil deixa de atravessar o alvo. Como foi referido anteriormente, notam-se algumas perturbações nas curvas de energia cinética em função do tempo em maiores ângulos de impacto nas simulações numéricas para projecteis rígidos. Estas perturbações são devidas à dificuldade de determinar a malha de elementos finitos ideal para o alvo, tendo em conta as limitações de tempo de processamento do ensaio.

Em termos de pico máximo de absorção de energia, apenas foi realizada esta análise para ensaios com projecteis rígidos. Como seria de esperar o alvo que apresenta um maior valor de energia absorvida é o alvo de 20mm. O alvo que apresenta uma menor capacidade de absorção de energia é o de 5 mm de espessura pois, tal como foi dito anteriormente, quando maior o volume de material deformado, maior a energia absorvida pelo alvo. Esse valor máximo de energia cinética ocorre para ângulos de impacto onde o projectil deixa de perfurar o alvo totalmente.

Relativamente à energia envolvida nas simulações, verificou-se a ocorrência de modos espúrios de energia (*hourglass modes*). Porém, verificou-se que a ordem de grandeza desta componente de energia é muito pequena, mantendo-se quase constante em todas as simulações numéricas realizadas. Consequentemente, foi admitido como não sendo necessária a sua análise detalhada dessa componente. O quociente de energia é sempre muito próximo de 1, o que seria de esperar uma vez que é o quociente entre a energia total e a soma da energia inicial com o trabalho externo. Assim, para o balanço de energia ser ideal, esse quociente tem que ser o mais próximo de 1 possível.



# Lista de Figuras

Figura 2.1- Disparo de um projectil por uma arma de fogo.

Figura 2.2- Representação esquemática das componentes de uma arma de fogo, especificamente da metralhadora MG 42 de munições de calibre 7.62 [22].

Figura 2.3- Esquema geral de composição interna de uma munição.

Figura 2.4- (a) Projectil de chumbo de ponta ogival; (b) projectil de chumbo de canto-vivo; (c) projectil de chumbo de semi-canto-vivo.

Figura 2.5- (a) Projecteis encamisados; (b) Projecteis semi-encamisados; (c) Projecteis expansivos.

Figura 2.6- Representação esquemática dos diferentes modos de perfuração num impacto balístico.

Figura 2.7- Representação de invólucros classificados quanto ao tipo de: (a) corpo; (b) base; (c) tipo de iniciação.

Figura 2.8- Exemplo de fulminantes.

Figura 2.9- Descrição esquemática das várias fases de disparo de uma arma de fogo: (a) arma no seu estágio pré-disparo; (b) primeiro estágio do disparo; (c) aumento da pressão interna (representada pelas setas) e expulsão do projectil.

Figura 3.1- Imagem de uma munição 7.62x51mm NATO.

Figura 3.2 - Projecteis de uma munição 7.62x51mm NATO.

Figura 3.3- Microestrutura da liga de Alumínio 5083-H116.

Figura 4.1- Representação esquemática do modelo de simulação numérica do impacto de uma esfera num alvo de geometria rectangular.

Figura 4.2- Representação esquemática do ensaio final com um projectil rígido 7.62x51mm, um ângulo de impacto de  $0^\circ$  e um alvo de 5mm de espessura.

Figura 4.3- Representação da simulação numérica com um ângulo de impacto do projectil de 45°, com espessuras analisadas. (a) 5mm; (b) 8mm; (c) 10mm; (d) 15mm; (e) 20mm.

Figura 5.1- Representação esquemática das condições de fronteira do alvo e do projectil: (a) condições de simetria no plano de simetria do alvo e do projectil e (b) restrições ao movimento na fronteira exterior do alvo.

Figura 5.2- Representação esquemática da malha, pouco refinada, de elementos finitos utilizada na discretização do alvo de 5mm para pequenos ângulos de impacto. (a) Vista ortogonal do alvo; (b) Ampliação da zona refinada; (c) Refinamento da malha em espessura.

Figura 5.3- Representação esquemática da malha de elementos finitos utilizada na discretização do alvo de 20mm para elevados ângulos de impacto: (a) vista ortogonal do alvo, (b) Ampliação da zona refinada e (c) Refinamento da malha em espessura.

Figura 5.4- Representação esquemática da malha de elementos finitos utilizada na discretização do projectil: (a) invólucro e (b) interior do projectil 7.62 NATO.

Figura 6.1- Variação da energia cinética em função do tempo, para os ângulos de impacto e espessuras analisadas.

Figura 6.2- Variação da energia cinética em função do tempo, para os ângulos de impacto e espessuras analisadas e projectil rígido.

Figura 6.3 - Variação da energia cinética em função do tempo, para ângulos de impacto, para todas as espessuras analisadas e projectil rígido.

Figura 6.4- Distribuição de tensões equivalente de von Mises para a simulação numérica do impacto ortogonal, 0°, de um projectil 7.62 x 51 mm NATO num alvo de espessura de 5mm.

Figura 6.5- Variação da energia cinética em função do tempo, para os ângulos de impacto e espessuras analisadas e projectil rígido.

Figura 6.6- Variação da energia cinética em função do tempo, para ângulos de impacto de 80 e 85°, para todas as espessuras analisadas e projectil rígido.

Figura 6.7- Distribuição de tensões equivalente de von Mises para a simulação numérica do impacto ortogonal, 80°, de um projectil rígido 7.62 x 51 mm NATO num alvo de espessura de 5mm.

Figura 6.8- Quociente entre a energia total e a soma da energia inicial com o trabalho externo em função do tempo. Para facilitar a visualização a escala do quociente de energias foi truncada.

Figura 6.9- Energia Cinética em função do ângulo de impacto para as diferentes espessuras analisadas.

---

Figura 6.10- Distribuição de tensões equivalente de von Mises para a simulação numérica do impacto 65°, de um projectil rígido 7.62 X 51 mm NATO num alvo de espessura de 20mm, a 35 $\mu$ s.

Figura 6.11- Distribuição de tensões equivalente de von Mises para a simulação numérica do impacto 65°, de um projectil rígido 7.62 X 51 mm NATO num alvo de espessura de 20mm, a 177 $\mu$ s.

Figura 6.12 - Variação da energia cinética em função do tempo para todos os ângulos de impacto analisados, para o alvo de 5 mm de espessura e um projectil rígido.

Figura 6.13 - Variação da energia cinética em função do tempo para todos os ângulos de impacto analisados para o alvo de 8mm e um projectil rígido.

Figura 6.14 - Variação da energia cinética em função do tempo para todos os ângulos de impacto analisados para o alvo de 10mm e um projectil rígido.

Figura 6.15 - Variação da energia cinética em função do tempo para todos os ângulos de impacto analisados para o alvo de 15mm e um projectil rígido.

Figura 6.16 - Variação da energia cinética em função do tempo para todos os ângulos de impacto analisados para o alvo de 20mm e um projectil rígido.

Figura 6.17- Variação da energia cinética em função do tempo para os ângulos de impacto analisados para o alvo de 5mm e um projectil deformável.

Figura 6.18 - distribuição de tensões equivalente de von Mises para a simulação numérica do impacto a 10° de um projectil deformável 7.62 x 51 mm NATO num alvo de espessura de 5 mm.

Figura 6.19- Variação da energia cinética em função do tempo para os ângulos de impacto analisados para o alvo de 5mm e um projectil deformável.

Figura 6.20- Distribuição de tensões equivalente de von Mises para a simulação numérica do impacto a 15° de um projectil deformável 7.62 x 51 mm NATO num alvo de espessura de 8 mm.



# Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Tabela da composição das diferentes séries dos alumínios.

Tabela 3.2 - Composição Química da liga de Alumínio AA5083-H116.

Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas dos diferentes materiais usados ao longo deste trabalho.

Tabela 5.2 - Caracterização da malha de elementos finitos.



## Bibliografia

[1] Wikipédia, 12-03-2009, < <http://en.wikipedia.org>>.

[2] MG42, 12-03-09, <<http://www.mg42.us/>>.

[3] Grytten, F, Low- Velocity Penetration of Aluminium Plates. *Norwegian University of Science and Technology*.

[4] G. Taylor. The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress. i. theoretical considerations. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 194:289-299, 1948.

[5] W. T. Thompson. An approximate theory of armor penetration. *Journal of Applied Physics*, 26:80-82, 1955.

[6] P. Sinhá, I.P. Singh, and C. H. Ma. Effects of shock loading on the young's modulus of alloy 2024 al. *Journal of Applied Physics*, 48:167, 1977.

[7] Woodward RL. A rational basis for the selection of armour materials. *Journal Aust Insitute Metals*, 22:167-70, 1977.

[8] Manganello J, Abbot KH. Metallurgical factors affecting the ballistic behavior of stell targets. *Journal Mater JMLSA*, 17:231-9, 1972.

[9] Bishop RF, Hill R, Mott NF. The theory of indention and hardness. *Proceedings of Royal Society*, 57:147-59, 1945.

- 
- [10] Hill R. The mathematical theory of plasticity. *London: Oxford University Press*, 1950.
- [11] Goodier, JN. On the mechanics of indentation and cratering in solid targets of strain-hardening metal by impact of hard and soft spheres. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> Symposium on Hypervelocity Impact III*. AIAA, New York, 215-59, 1965.
- [12] Forrestal MJ, Rosenberg Z, Luk VK, Bless SJ. Perforations of aluminium plates with conical-nosed projectiles. *Journal of Applied Physics*, 54:230-2, 1965.
- [13] Rosenberg Z, Forrestal MJ. Perforations of aluminium plates with conical-nosed rods - additional data and discussion. *Journal of Applied Mechanics*, 55:236-8, 1988.
- [14] Forrestal MJ, Luk VK, Brar NS. Perforation of aluminium armor plates with conical-nose projectiles. *Mechanics of Materials*, 10:97-105, 1990.
- [15] Piekutowski AJ, Forrestal MJ, Poormon KL, Warren TL. Perforation of aluminium plates with ogive-nose steel rods at normal and oblique impacts. *International Journal of Impact Engineering*, 18:877-87, 1990
- [16] Warren TL, Poormon KL. Penetration of 6061-T651 aluminium targets by ogive-nosed VAR 4340 steel projectiles at oblique angles: experiments and simulations. *International Journal of Impact Engineering*, 25:993-1022, 2001.
- [17] Gupta NK, Madhu V. An experimental study of normal and oblique impact of hard-core projectile on single and layered plates. *International Journal of Impact Engineering*, 19:395-414, 1997.
- [18] Nsiampa N, Dyckmans G, Chabotier A. Impact of 7.62mm AP ammunition into aluminium 5083 plates. *Proceedings of 23<sup>rd</sup> International Symposium on Ballistics Tarragona*, 2007.
- [19] Grytten F, Borvik T, Hopperstad OS, Langseth, A. Quasi-static perforation of thin aluminium plates. *International Journal of Impact Engineering*, 486:497, 2009.
- [20] Demir T, Ubeyli M, Yildirim RO. Investigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62mm armor piercing projectile. *Materials and Design*, 2009:2016, 2008.
- [21] Hatch, JE. Aluminium: properties and physical metallurgy. *American Society for Metals*, 353-357, 1984.
-



[22] Turner, M. J.; Clough, R. J.; Martin, H. C. & Topp, L. J. Stiffness and deflection Analysis of Complex Structures. *Journal of the Aeronautical Sciences*. v. 23 n.9, p.805-823, 1956.

[23] Argyris, J. H. Recent Advances in Matrix Methods of Structural Analysis. *Pergamon Press Elmsford, New York*, 1963.