



**Diogo João  
Gonçalves Cardoso**

**Estudo do efeito da configuração de um EFP na  
sua capacidade balística**





**Diogo João  
Gonçalves Cardoso**

**Estudo do efeito da configuração de um EFP na  
sua capacidade balística**

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



**"I haven't failed. I've just found 10,000 ways that won't work"**  
Thomas Edison (1846-1931)



**O júri / The jury**

Presidente / President

**Prof. Doutor Joaquim Alexandre Mendes de Pinho da Cruz**  
Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

**Prof. Doutor Jorge Manuel Costa da Fonseca Justo**  
Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia do Porto

**Prof. Doutor Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias**  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)





## **Agradecimentos / Acknowledgements**

Começo por agradecer ao Professor Doutor Filipe Teixeira-Dias pela orientação, estímulo, amizade e confiança depositada em mim na realização deste trabalho, assim como todos os ensinamentos transmitidos, por estar sempre disponível para me ensinar, ouvir e corrigir os meus erros; a ele muito obrigado.

À minha querida mãe, ao meu querido pai e ao meu querido irmão, é graças a eles que me tornei na pessoa que sou hoje e sem eles nada seria possível, um muito obrigado por fazerem parte da minha vida.

À Joana por toda a paciência, confiança, carinho e força transmitida nos momentos certos.

Aos meus amigos no GRIDS e no LAR por toda a paciência, confiança, momentos de descontração e pelo apetite demonstrado na altura da cereja.

Ao Professor Doutor Jorge Ferreira e ao Professor Doutor Vitor Santos pela apoio e cedência de um espaço de trabalho no LAR, obrigado.



## Palavras-chave

EFP; IED; *shaped charge*

## Resumo

Cada vez mais têm vindo a realizar-se esforços de natureza diversa para tentar contrariar a tendência de aumento do número de vítimas de ataques com *Improvised Explosive Devices* (IED), sobretudo nas bombas de beira de estrada em que são utilizados *Explosively Formed Projectiles* (EFP). A missão dos investigadores é criar e desenvolver sistemas de defesa que sejam eficazes na proteção contra ameaças de diversos tipos e sob várias condições. Estes têm de considerar fatores como o tipo de projéteis e a quantidade de energia que lhe está associada, entre muitos outros fatores. Neste trabalho procura-se estudar o processo de formação de um EFP, tendo em conta alguns dos fatores que influenciam a sua capacidade balística. Desenvolveu-se um estudo numérico detalhado onde se alteram parâmetros como os materiais dos componentes, a geometria do projétil e os parâmetros de detonação, utilizando a ferramenta de simulação LS-Dyna™, baseada no método dos elementos finitos. Apresentam-se as características dos materiais usados nas simulações e os procedimentos efetuados na construção dos modelos numéricos. Os resultados mostram que os ensaios numéricos realizados coincidem com trabalhos do mesmo âmbito. Desenvolveram-se modelos analíticos em função dos resultados numéricos obtidos. Foi possível ainda retirar conclusões sobre quais os materiais mais vantajosos numa aplicação deste âmbito, qual o intervalo ótimo para alguns aspectos geométricos e qual o conjunto de parâmetros de detonação mais eficiente e vantajoso. É registada a velocidade, energia cinética e configuração final de todas os projéteis resultantes das simulações numéricas realizadas.



**Keywords**

EFP; IED; *shaped charge*.

**Abstract**

The number of victims of attacks with Improvised Explosive Devices (IED), especially from roadside bombs where Explosively Formed Projectiles (EFP) are frequently used, has been increasing in the last years. In a effort to try to counteract this tendency, researchers have been tasked to create and develop defense systems that are effective in protecting against threats of various types and under various conditions. These researchers must consider factors like the type of projectiles and the amount of energy that they contain, among many other factors. The formation process of a EFP is studied in the present work, especially in terms of kinetic energy and consequent penetration ability of the final projectile. Initially, a detailed numerical study on the formation process of a EFP is developed. The behaviour of the EFP under different material, geometric and detonation configurations is studied using the finite element method with LS-Dyna™. The results regarding the velocity of the projectile show good agreement with results from papers with similar theme. An analytical model is proposed for the final velocity of an EFP under different liner thickness and detonation parameters as well as the thickness of the liner optimal range in a EFP application. The speed, kinetic energy and final configuration of all the projectiles resulting from numerical simulations performed are registered and discussed.



# Conteúdo

<b>I</b>	<b>Enquadramento</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>3</b>
1.1	Enquadramento . . . . .	3
1.2	A balística . . . . .	5
1.3	Conceitos importantes no impacto estrutural . . . . .	6
1.4	Os <i>Explosively Formed Projectiles</i> . . . . .	8
1.5	Estado da arte . . . . .	9
1.6	Objetivos . . . . .	11
1.7	Guia de leitura . . . . .	12
<b>II</b>	<b>Modelação Numérica</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Métodos e Procedimentos</b>	<b>17</b>
2.1	Método dos elementos finitos . . . . .	17
2.2	<i>Software</i> de simulação numérica . . . . .	19
2.3	Modelos Constitutivos . . . . .	20
2.3.1	Modelo de comportamento plástico de Johnson-Cook . . . . .	20
2.3.2	Modelo de comportamento para HE . . . . .	21
2.4	Equações de estado — EOS . . . . .	22
2.4.1	Equação de estado de Gruneisen . . . . .	22
2.4.2	Equação de estado de Jones-Wilkins-Lee (JWL) . . . . .	23
2.5	Caraterização dos materiais utilizados . . . . .	23
2.5.1	Projétil . . . . .	23
2.5.1.1	Cobre OFHC . . . . .	24
2.5.1.2	Ferro ARMCO® . . . . .	24
2.5.1.3	Tântalo . . . . .	26
2.5.2	Revestimento e Base . . . . .	26
2.5.3	Explosivo . . . . .	26
2.5.3.1	TNT — Trinitrotolueno . . . . .	28
2.6	Desenvolvimento dos modelos . . . . .	29
2.6.1	Modelação das geometrias . . . . .	29
2.6.2	Seleção da malha de elementos finitos . . . . .	30
2.6.2.1	Condições de fronteira . . . . .	32
2.6.2.2	Contactos . . . . .	32
2.6.3	Referências dos ensaios numéricos . . . . .	34

<b>3</b>	<b>Modelos de estudo</b>	<b>37</b>
3.1	Análise dos materiais utilizados no modelo . . . . .	37
3.2	Análise do efeito da espessura do projétil . . . . .	38
3.3	Análise do efeito dos parâmetros de detonação . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>43</b>
4.1	Análise da energia cinética dos projéteis obtidos . . . . .	43
4.1.1	Para os diferentes materiais estudados . . . . .	43
4.1.2	Para as diferentes espessuras estudadas . . . . .	44
4.1.3	Para os diferentes parâmetros de detonação estudados . . . . .	48
4.2	Configuração final dos projéteis obtidos . . . . .	54
<b>III</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>61</b>
<b>5</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>63</b>
5.1	Conclusões . . . . .	63
5.2	Trabalhos futuros . . . . .	65



Parte I

Enquadramento



# Capítulo 1

## Introdução

Neste primeiro capítulo apresentam-se os tópicos tratados durante o desenvolvimento da dissertação, explicam-se conceitos relativos à detonação de explosivos, ondas de choque produzidas e absorção de energia. Referem-se alguns materiais tipicamente utilizados em *Explosively formed projectiles*. É incluída a revisão bibliográfica referente a investigações que se enquadra no contexto deste trabalho.

---

### 1.1 Enquadramento

De acordo com as estatísticas do *Center for Strategic & International Studies* (CSIS) [20] e com dados do Departamento de Defesa Norte-Americano publicados pelo *The Washington Post* [21], o número de baixas devido a *Improvised Explosive Devices* (IED) no Iraque disparou entre 2009 e 2010, chegando a aumentar cerca de 60%. Esta é, por uma larga margem, a maior causa de mortes para as tropas Norte-Americanas. Só no ano de 2010 ocorreram 14661 ataques com IED. Destes ataques resultaram 3366 feridos e ainda 268 mortos, como se pode verificar nos dados estatísticos que se apresentam na figura 1.1.

Em 1885, Charles Edward Munroe observou que um explosivo energético, também designado por HE<sup>1</sup>, com uma cavidade de frente para o alvo deixou uma perturbação no alvo após a detonação. Munroe designou este comportamento dos explosivos como o efeito de Munroe<sup>2</sup> [23]. A primeira referência conhecida ao efeito parece ser de 1792 pelo alemão von Baader. Há também indicações de que engenheiros de minas tenham explorado o fenómeno mais de 150 anos antes. O efeito Munroe foi redescoberto por von Neumann em 1911 depois de este verificar que um bloco de TNT<sup>3</sup> conseguia penetrar um bloco de aço se o explosivo apresentasse um entalhe cónico na superfície de contato [25].

As potencialidades de utilização militar dos resultados de Munroe e Neumann só foram postas em prática anos mais tarde, sendo difícil distinguir a primeira pessoa a colocá-las em prática devido ao secretismo existente em torno de invenções significativas com potencial militar. Nos anos anteriores à segunda Guerra Mundial surgiram as *shaped charges*, isto é, as cargas explosivas moldadas de forma a focar a energia proveniente da detonação de um HE (efeito Munroe) [23]. A aplicação de *shaped charges* para penetrar

---

<sup>1</sup>Do inglês *high-explosive*.

<sup>2</sup>Do inglês *Munroe effect*.

<sup>3</sup>Designação química: Trinitrotolueno.

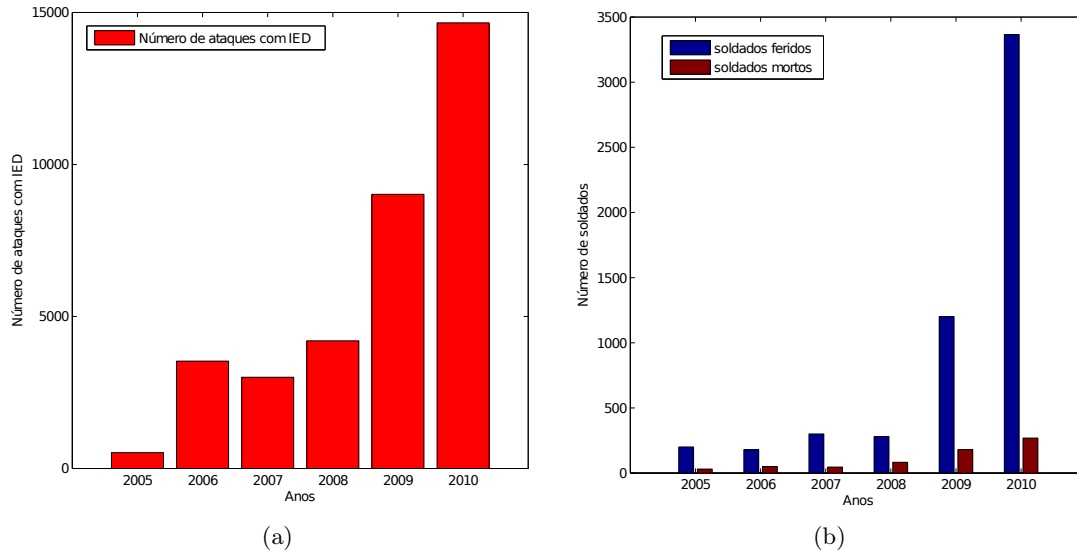


Figura 1.1: Valores estatísticos entre 2005 e 2010 de (a) número de ataques com IED e (b) baixas resultantes desses ataques [21].

blindagens surgiu devido ao contributo de inventores tais como, por exemplo, Cranz, Schardin, Thomanek e Mohaupt, que desenvolveram, independentemente, vários modelos que foram produzidos em segredo pela Grã-Bretanha, Alemanha e Estados Unidos da América [23; 24].

O interesse alemão no efeito dos *shaped charges* foi sempre elevado. No período de 1926 a 1929, Carl Cranz e Hubert Schardin estudaram o efeito Mach<sup>4</sup> e, por volta de 1937, Schardin formulou uma teoria segundo a qual o efeito Mach podia ser a explicação para o comportamento das *shaped charges*. Em experiências desenhadas para testar esta teoria, Thomanek, descobriu a importância de existir um material na superfície da cavidade do explosivo, tendo o vidro sido o primeiro material utilizado. Foram ainda realizados testes recorrendo a diferentes materiais, verificando-se uma superioridade dos aços e ligas de cobre na capacidade balística dos projéteis resultantes. Essas experiências também revelaram a importância crítica da espessura do material e da necessidade do controlo da mesma. Thomanek fundou e geriu uma empresa que desenvolveu e produziu armas recorrendo à tecnologia *shaped charge* para a Alemanha.

O desenvolvimento de *shaped charges* revolucionou a guerra anti-tanques. Devido a esta tecnologia, ainda hoje os tanques sofrem de grande vulnerabilidade, devido às *shaped charges*, como é o caso dos *Explosively Formed Projectiles* (EFP), mencionados em detalhe mais à frente.

Nos últimos anos têm vindo a realizar-se esforços de natureza diversa para tentar contrariar a tendência de aumento do número de vítimas de ataques com IED, sobretudo nas bombas de beira de estrada<sup>5</sup> em que são utilizados EFP com capacidade de penetração de blindagens balísticas. A utilização de blindagens é de extrema importância no atual cenário de guerra moderno, assim como no cenário de guerrilha urbana. Compre-

<sup>4</sup>Do inglês *Mach effect*, também conhecido como *Woodward effect* [23].

<sup>5</sup>Do inglês *roadside bombs*.

ender o nível de proteção balística em diferentes cenários de ameaça é uma necessidade para garantir a segurança de forças quer militares quer policiais [22]. Consequentemente, para este fim, é de grande importância que se possam desenvolver meios de avaliação previsível destas ameaças, permitindo uma melhor compreensão do seu comportamento e, desta forma, o desenvolvimento de meios e métodos de proteção contra as mesmas.

## 1.2 A balística

A balística é a ciência em que se estuda o movimento de corpos lançados ao ar livre. Esta ciência está, frequentemente, relacionada com o disparo de projéteis por armas de fogo. No estudo do disparo de um projétil por uma arma de fogo, o seu movimento pode dividir-se em três fases distintas:

- i) Balística interna;
- ii) Balística externa;
- iii) Balística terminal.

De uma forma resumida, a balística interna diz respeito ao estudo dos fenómenos que ocorrem desde o momento do disparo até ao instante em que o projétil abandona o mecanismo que o proporcionou (*e.g.* cano da arma), normalmente associado ao disparo de uma arma de fogo. Este estudo baseia-se nas variáveis da temperatura, volume e pressão de gases no interior do mecanismo de disparo durante a explosão do material combustível, assim como no formato do mecanismo e do projétil.

A balística externa consiste no estudo de todos os fenómenos que ocorrem desde o instante em que o projétil abandona o mecanismo de disparo até ao instante em que atinge o alvo. Neste estudo, a aerodinâmica, que estuda a relação e interação entre o movimento do projétil e o ar que o envolve, é tida em consideração. O calibre, formato, massa, velocidade inicial e rotação do projétil são fatores determinantes para a construção de um projétil com grande poder de destruição. A energia que irá ser transmitida ao alvo é a energia cinética e a maximização desta permitirá um melhor resultado do ponto de vista do ataque. Da simples análise física, recorrendo a análises energéticas, é possível determinar que a massa e a velocidade são dois dos fatores mais relevantes no desenvolvimento de uma arma e de um projétil, sendo, como é sabido, a energia cinética de um corpo em movimento dada por  $E_c = mv^2/2$ . Um dos motivos de controvérsia do passado está relacionado com a trajetória dos projéteis. Antes de Galileu, acreditava-se que a trajetória descrita por um projétil era retilínea, porém Galileu e Newton demonstraram que a trajetória de qualquer corpo sob ação da gravidade é parabólica, sendo a distância total percorrida por um projétil designada por alcance.

A balística terminal estuda o comportamento dos projéteis após o impacto com os alvos, e é caracterizada pela ocorrência de eventos rápidos, de elevadas pressões e grandes velocidades de deformação. Depois de disparado, o projétil deve possuir uma quantidade significativa de energia cinética, para atingir o alvo, penetrá-lo e executar a sua tarefa. Este ramo é subdividido em três segmentos: balística leve de proteção pessoal (*e.g.* coletes à prova de projéteis de armas de calibre reduzido); balística pesada de proteção pessoal (*e.g.* capacetes e armaduras leves) e balística pesada de proteção de veículos (*e.g.* painéis balísticos e armaduras pesadas).

### 1.3 Conceitos importantes no impacto estrutural

Os impactos estruturais, que ocorrem em regime dinâmicos, apresentam algumas características que os distinguem dos carregamentos em condições quase-estáticas. Do ponto de vista físico, os efeitos de inércia devem ser considerados em todas as equações de análise. Estes efeitos dão ênfase às tensões de choque, que se propagam nos materiais impactados, e que são essenciais para a correta caracterização dos fenômenos transientes que ocorrem num impacto. Do ponto de vista do material, a curta duração de um fenômeno de impacto leva a velocidades de deformação elevadas, o que não se verifica nos fenômenos quase-estáticos, e que devem ser tidas em conta na correta modelação dos fenômenos envolvidos [18]. Os problemas inerentes ao impacto de projéteis podem ser classificados numa vasta gama de parâmetros tais como, por exemplo, os modos de penetração e os modos de cedência. Porém, considerando uma análise física, é possível deduzir que a massa e a velocidade são dois dos parâmetros mais importantes no desempenho de um projétil. Como se viu, estes parâmetros influenciam diretamente a energia cinética que é transmitida ao alvo e, posteriormente, absorvida, em maior ou menor grau.

De acordo com Zukas *et al.* (1982) [27], o termo projétil pode ser utilizado para designar qualquer objeto capaz de ser lançado. Os projéteis são normalmente caracterizados como macios, semi-duros ou duros, dependendo do material que é utilizado e dos níveis de deformação que sofrem durante um impacto. Os projéteis macios sofrem deformação significativa, enquanto que os semi-duros sofrem apenas pequenas deformações, que não se fazem sentir nos projéteis duros. Além disso, é usual caracterizar os projéteis pela sua geometria inicial. Tendo em conta a penetração de um alvo, é necessário prever a energia cinética (função da massa e velocidade do projétil) que é transmitida ao alvo.

Os vários regimes de velocidade, tendo em conta os estudos realizados por Backman e Goldsmith (1978) [26] serão caracterizados de seguida:

- Regime de baixa velocidade (0–50 m/s): a deformação é controlada por flexão elástica e plástica, ocorrendo um alongamento plástico de membrana para um aumento da massa do projétil. O domínio de baixa velocidade abrange acontecimentos tais como, por exemplo, a queda de objetos, impacto de veículos, colisão de navios, *etc.*
- Regime de velocidade sub-militar (50 – 500 m/s): projéteis duros irão apresentar um comportamento elástico, enquanto o alvo apresenta uma resposta plástica. A taxa de energia dissipada no alvo é limitada pela transmissão de ondas elásticas e plásticas que tendem a reduzir a extensão da deformação. O regime de velocidade sub-militar abrange, geralmente, o desenho de contentores nucleares, queda livre de engenhos explosivos e mísseis, e ainda os fragmentos resultantes de explosões.
- Regime de velocidade militar (500 – 1300 m/s): a maior parte da energia cinética é convertida em trabalho plástico, quer para o projétil quer para o alvo. A parte ativa do alvo, isto é, a parte afetada pelo impacto, encontra-se dentro de uma zona limitada, tipicamente 2 a 3 vezes o diâmetro do projétil. Esta gama de velocidades é de grande interesse para aplicações militares tais como, por exemplo, o lançamento de mísseis e projéteis de grande energia cinética.
- Regime de velocidade ultra-militar (1300 – 3000 m/s): dependendo das propriedades mecânicas do projétil e do alvo, torna-se necessário recorrer a uma descrição hidrodinâmica do comportamento dos materiais. Quando o nível de tensão superar

a resistência do material, o alvo e o projétil podem comportar-se como fluidos. Este regime de velocidades abrange, essencialmente, o lançamento de *rockets* e EFP.

- Regime de hiper-velocidade ( $> 3000$  m/s): o projétil e o alvo comportam-se como fluidos, sendo o projétil vaporizado para velocidades extremamente elevadas. Este domínio de velocidade é de grande interesse no projeto de vaivéns espaciais, resistentes ao impacto de meteoritos.

Durante o período de voo, correspondente ao estudo da balística externa, o projétil está sujeito a um conjunto de forças que têm grande influência sobre a trajetória e velocidade do projétil, devendo estas ser contabilizadas. Na figura 1.2 são descritas as forças atuantes num projétil após o seu disparo. Os vectores  $\vec{F}_{Dx}$  e  $\vec{F}_{Dy}$  representam as componentes da força de resistência do ar nas direções horizontal e vertical, respetivamente. Estas forças causam desaceleração no movimento com uma magnitude proporcional ao quadrado da sua velocidade  $v$ . O vector  $\vec{F}_g$  representa a força de gravidade (peso) que transmite uma aceleração descendente sobre o projétil fazendo-o desviar-se da linha inicial de disparo. O vector  $\vec{F}_P$  é a força de disparo (propulsão inicial) do projétil. Durante o processo de detonação e disparo (balística interna) é originado um movimento de rotação do projétil. Quando esse movimento de rotação se torna excessivo, o projétil sofre instabilidade na sua trajetória. Essa instabilidade poderá causar distorções e perdas de acuidade/precisão do disparo [18]. O alvo pode ser definido como um objeto móvel ou estacionário que sofre

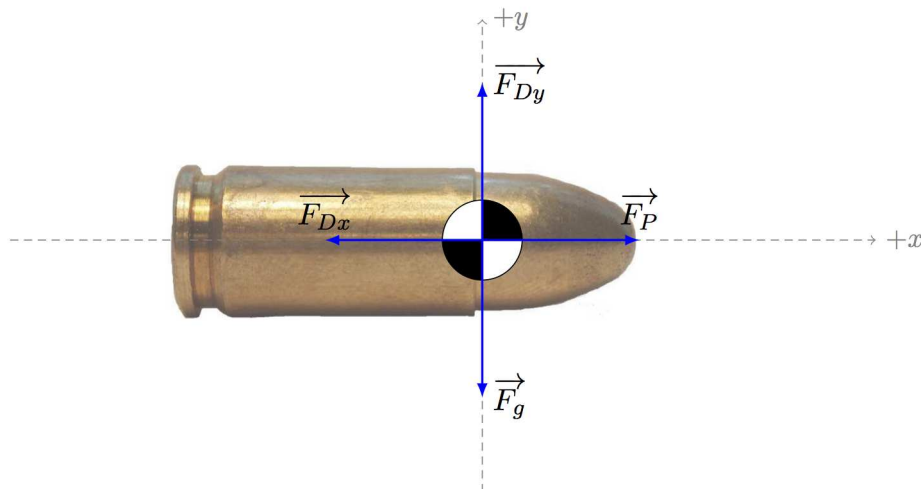


Figura 1.2: Representação esquemática das forças que atuam no projétil durante o voo [35].

deformação proveniente do impacto de um projétil. A classificação de um alvo pode ser feita conforme a sua espessura. Segundo Backman e Goldsmith (1978) [26], a classificação dos alvos é feita em quatro categorias:

- Semi-infinito, se não existir influência das condições de fronteira da região oposta ao impacto.
- Espesso, se existir influência das condições de fronteira (fixações, apoios, *etc.*) da região oposta ao impacto, mas apenas para uma penetração substancial do projétil.

- Intermédio, se a superfície oposta ao impacto exercer uma influência considerável no processo de deformação, durante o movimento do projétil.
- Fino, se os gradientes de tensão e deformação não existirem em toda espessura.

O termo *penetração* é definido como a entrada de um projétil em qualquer região do alvo (Backman e Goldsmith (1978) [26]). A penetração envolve processos como perfuração, em que o projétil atravessa o alvo completamente, com uma velocidade residual final; incrustação, que traduz a cessação de movimento do projétil durante o contacto com o alvo; e o ricochete, que denota a mudança de trajetória do projétil (frequentemente sem que ocorra perfuração ou incrustação).

## 1.4 Os *Explosively Formed Projectiles*

Um *Explosively Formed Projectile* (EFP), também conhecido como *Self-Forging Fragment* (SFF), utiliza a ação de uma onda de choque proveniente da detonação de um explosivo energético (HE) para projetar e deformar um disco de metal dúctil num projétil compacto que atinge velocidades nos regimes militar e ultra-militar. Na perspetiva de ataque, um EFP apresenta duas grandes vantagens em relação a outras *shaped charges* e projéteis disparados por armas de fogo: (i) a elevada energia cinética devida às velocidades elevadas e (ii) a consequente eficácia dos projéteis a grandes distâncias. Um EFP típico tem vários componentes, como se mostra na figura 1.3, cada um deles com a sua influência no processo de formação do projétil. De seguida serão caracterizados os componentes de um EFP, tendo em conta os estudos realizados por Johnson [1] e Wu [10]:

- Explosivo: são utilizados explosivos que produzam pressões elevadas a uma grande velocidade de detonação, normalmente HE tais como, por exemplo, o TNT e o RDX<sup>6</sup>.
- Revestimento e base: são dois componentes que contêm o explosivo, criando o efeito de Munroe, direcionando a onda de choque originada pela detonação para o disco. São normalmente utilizados aços e alumínio no fabrico destas partes.
- Detonador: garante a detonação do explosivo. A sua posição e sincronismo (em caso de vários detonadores) influencia a velocidade e a geometria final do projétil.
- Disco ou *liner*: é a parte mais importante, pois é a que vai desenvolver o projétil. São utilizados materiais dúcteis como o cobre, ferro ou tântalo. Existe um variado número de fatores geométricos como, por exemplo, o diâmetro, a espessura, a curvatura, *etc*, que influenciam o projétil resultante.

A formação do EFP vai assim depender de vários fatores tais como, por exemplo, o tipo de detonação, a relação comprimento-diâmetro do explosivo, a geometria dos vários componentes e os materiais utilizados, criando projéteis com diferentes formas e velocidades, influenciando assim a capacidade de penetração nos alvos. Na figura 1.4 é possível visualizar as várias etapas do processo de formação de um EFP. Numa primeira fase é detonado o HE, o que produz uma onda de choque geralmente esférica que, devido à presença do revestimento e da base, é direcionada para o disco. Devido à concavidade

<sup>6</sup>Do inglês *Research Department X*. Designação química: ciclotrimetilenotrinitramina.



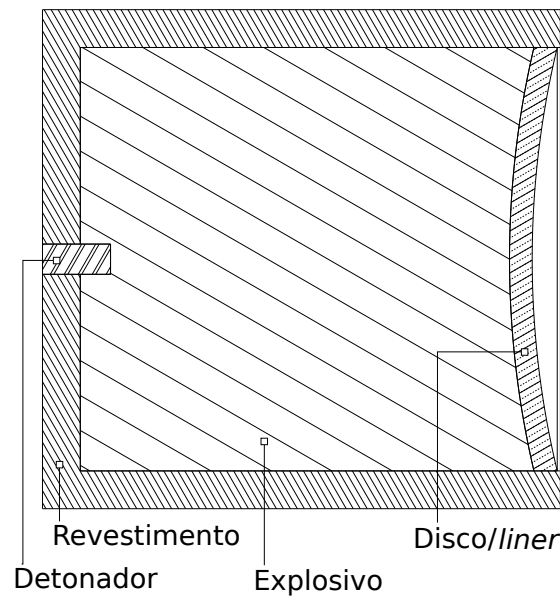


Figura 1.3: Esquema representativo dos componentes de um EFP.

do disco o primeiro impacto da onda de choque vai ocorrer na parte central do disco, transferindo o pico máximo da energia produzida para essa mesma parte. Essa energia deforma o disco com velocidades de deformação muito elevadas, resultando num comportamento hidrodinâmico. O processo de formação tem uma duração de aproximadamente  $300 \mu s$  [2], resultando num projétil final com um diâmetro entre 25 e 30% do diâmetro inicial do disco.



Figura 1.4: Esquema representativo do processo de formação de um EFP (Laboratório de Pesquisa da Força Aérea (AFRL), *Global Security*, desenhado por Hulteng e Treible [36]).

## 1.5 Estado da arte

As primeiras publicações com referência a dispositivos semelhantes aos *Explosively Formed Projectile* (EFP) apareceram em 1936, por Wood [5]. Porém, apenas na década de 70 do século passado é que os estudos relacionados com este tipo de tecnologias sofreram um aumento significativo devido a duas razões: o sucesso obtido no desenvolvimento de técnicas de simulação numérica de um EFP e vários modelos protótipo patrocinados

pelo Exército e Força Aérea Americanas. Desde então foram feitos avanços significativos no desenvolvimento de modelos de análise para compreender melhor o comportamento de diferentes tipos de EFP, alguns dos quais serão aqui apresentados e que tiveram um impacto significativo na evolução dos EFP, permitindo o desenvolvimento do modelo de avaliação previsível que é apresentado nesta dissertação.

Em 1981 Johnson [1] demonstrou as capacidades de análises numéricas tridimensionais na modelação da interação explosivo-metal com superfícies complexas. Para tal, Johnson utilizou o exemplo de um explosivo que acelera um projétil metálico depois de detonado (EFP). Neste estudo foram estudados e investigados: o efeito da variação (linear) da espessura do projétil, desde  $0.9t_0$  no bordo do disco até  $1.1t_0$  no seu centro ( $t_0$  corresponde à espessura constante de um projétil com a mesma massa), o efeito de uma detonação descentrada e ainda o efeito de uma distribuição não-uniforme da densidade de explosivo. Pode concluir-se com este estudo que estes parâmetros pouco influenciam a velocidade linear do projétil, verificando-se, por outro lado, a introdução significativa de velocidades angulares nos projéteis resultantes. Mais recentemente, Johnson [9] publicou um trabalho que visa algumas questões associadas à computação tridimensional de EFP, em que explica os efeitos da interface de contacto, da geração da malha, dos tipos de elementos finitos, entre outras questões.

Blache e Weimann [6] demonstraram a importância do comprimento da carga explosiva ( $L$ ) e a forma como este afeta a energia cinética transmitida ao projétil. Estes autores demonstraram também que o contorno da onda de choque gerada pela detonação do explosivo tem uma maior relevância na transferência de energia para o projétil do que o parâmetro  $L$ .

Uma relação dimensional muito importante é a relação comprimento-diâmetro ( $L/D$ ) do explosivo, como foi demonstrado por Bender e Carleone [4], que levou estes autores a concluir que à medida que  $L/D$  aumenta, a energia cinética do projétil aumenta até a um máximo da relação, que foi estabelecido em  $L/D = 1,5$ . Outra conclusão retirada deste estudo foi a influência da adição de massa no revestimento do explosivo e projétil que causa o aumento da duração da onda de choque e o conseqüente aumento da energia total transferida para o projétil.

Yiu [2] estudou os efeitos de um revestimento assimétrico na formação de um EFP. No caso em estudo foram colocados dois tipos de revestimentos no EFP, uma metade de aço e outra metade de resina epóxida. Esta experiência resultou num EFP fortemente distorcido devido ao desequilíbrio da onda de choque produzida. Apesar disso, foi possível concluir que a maior espessura e a maior densidade do revestimento influencia a forma final do EFP produzido, resultando num projétil mais sólido e compacto. Num outro estudo, relatado por van Bree [12], observou-se que o aumento súbito da espessura do revestimento junto do bordo do projétil resultaria na fragmentação do mesmo durante a sua formação.

Weimann [3], Weickert e Gallagher [7] demonstraram que a adição de um anel sobre o invólucro e o projétil tem um efeito sobre a forma e a velocidade do EFP, proporcionando-lhe aletas, que permitem uma estabilização aerodinâmica do projétil em voo. Um outro método para a formação das aletas surgiu em 1994 através de uma patente criada por Bender e Carleone [5], que explicam que a utilização de um espaçador muito fino entre o projétil e a carga explosiva, disposto de forma radial obtendo variações periódicas da espessura do projétil causando uma formação desigual da cauda do EFP e, conseqüentemente, levando ao aparecimento de aletas.

Pappu e Murr [8] analisaram experimental e numericamente as características residuais das microestruturas de um EFP. Para o desenvolvimento do modelo de análise estes autores utilizaram o hidrocódigo AUTODYN-2D, com o qual criaram modelos para três tipos de materiais, o tântalo, ferro e cobre, tendo ainda utilizado dois modelos constitutivos para cada um deles, o modelo de Johnson-Cook e o modelo de Zerilli-Armstrong. Aqueles autores concluíram que, apesar dos materiais utilizados terem uma vasta aprovação em aplicações de EFP, apresentam diferenças significativas que influenciam o mecanismo através do qual se deformam, como a estrutura cristalina (BCC<sup>7</sup> para Fe, Ta e FCC<sup>8</sup> para Cu), a temperatura de fusão, *etc.* O modelo de Zerilli-Armstrong apresentou melhor resultado para os projéteis de Ta, ao contrário dos projéteis de Fe que apresentaram melhor resultado com o modelo de Johnson-Cook. Já os projéteis de Cu apresentam resultados igualmente bons para ambos os modelos constitutivos.

Mais recentemente, Jun Wu *et al.* [10] estudaram a formação, o voo e a capacidade de penetração de um EFP. Na análise realizada foi utilizado uma única configuração geométrica em que adotaram o método Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) para simular o comportamento pretendido. Estes autores consideraram a resistência do ar através de uma equação de atenuação de velocidade para uma distância de voo de 48 metros. A velocidade do projétil foi estudada através da teoria da similaridade e por simulação numérica, tendo sido validada por resultados experimentais de velocidade residual após impacto num alvo de aço balístico com 25 mm de espessura. Nesse estudo concluiu-se ainda que é possível obter uma geometria ideal para um EFP combinando a forma do explosivo e do projétil. Simular o processo de voo completo do EFP é complexo e, por vezes, mesmo impraticável, tendo sido analisado apenas 0.5 metros de voo, levando a resultados razoáveis, podendo considerar o método de atenuação preciso e verificando-se uma perda de velocidade de aproximadamente 6.5 m/s por cada metro percorrido, consistente com os resultados experimentais. O uso da teoria de similaridade pode ser útil para resolver os problemas técnicos de cálculo do voo completo do EFP até certo ponto: o erro obtido na velocidade residual após 0.5 m de voo corresponde a menos de 10% . Por fim, através da comparação dos resultados obtidos de velocidade e penetração no alvo, aqueles autores concluíram que a simulação consegue razoavelmente prever a formação, massa, velocidade, estabilidade de voo e capacidade de penetração do projétil/EFP.

Weibing [11] analisou os efeitos na formação de um EFP através do número de pontos de detonação, da posição dos mesmos e do sincronismo entre eles, concluindo que a velocidade e a relação comprimento-diâmetro( $L/D$ ) do projétil aumenta à medida que aumenta o número de pontos de detonação, sendo que para valores superiores a 6 o EFP tem um comportamento e forma semelhante ao de uma detonação radial. Para um EFP com 60 mm de diâmetro o atraso de sinal entre detonadores não deve ser superior a 200  $\mu$ s. Os resultados experimentais confirmam que para certas distâncias de voo a capacidade de penetração aumenta para o dobro e a abertura reduz cerca de 40%.

## 1.6 Objetivos

Um *Improvised Explosive Device* (IED) do tipo *Explosively Formed Projectile* (EFP) tem como principal função danificar e destruir veículos blindados e, para tal, tem de

---

<sup>7</sup>Do inglês *body centered cubic*.

<sup>8</sup>Do inglês *face centered cubic*.

produzir projéteis com uma elevada capacidade de penetração/perfuração. Estes projéteis resultam de um processo de formação complexo, em que os materiais apresentam um comportamento de regime dinâmico com elevada velocidade de deformação, o qual depende de fatores tais como os mencionados na secção 1.4. Uma melhor compreensão do comportamento deste tipo de ameaças permitirá o desenvolvimento de melhores meios e métodos de proteção. Para tal, pretende-se desenvolver meios de modelação e avaliação previsíveis dos projéteis dos EFP resultantes, com o intuito de analisar as velocidades e, conseqüentemente, a energia cinética resultante. Assim, de uma forma estruturada, os objetivos do trabalho aqui proposto consistem no estudo da energia cinética do projétil do EFP através da avaliação da velocidade final. Neste contexto pretende-se estudar um conjunto de materiais que constituem o EFP e o efeito exercido pelos mesmo no processo de formação do projétil. É também pretendido estudar o efeito quer de parâmetros geométricos do EFP tais como, por exemplo, a espessura inicial do disco (*liner*), quer do comportamento do EFP quando sujeito a diferentes parâmetros de detonação tais como, por exemplo, o número de detonadores. Por fim, pretende-se estabelecer uma relação entre os vários parâmetros estudados de forma a obter um EFP final otimizado.

## 1.7 Guia de leitura

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

### Parte I - Enquadramento e Objetivos

Nesta primeira parte apresentam-se os tópicos envolvidos e tratados durante o desenvolvimento da dissertação, explicam-se conceitos relativos à detonação de explosivos, às ondas de choque produzidas e à absorção de energia. Referem-se alguns materiais tipicamente utilizados em *Explosively Formed Projectiles*, como por exemplo o cobre, o ferro, o TNT, *etc.* É incluída a revisão bibliográfica referente a investigações realizadas que se contextualizaram no âmbito deste trabalho. Expõem-se os objetivos desta dissertação e constrói-se um breve guia dedicado ao leitor.

### Parte II - Métodos Numéricos

Nesta parte é descrito o método numérico utilizado para a realização das análises. São descritos os procedimentos e métodos utilizados na caracterização do comportamento mecânico de alguns materiais através de simulações numéricas em LS-Dyna<sup>TM</sup>, de forma a determinar as condições ideais para caracterização dos materiais em situação de detonação.

De seguida são descritos os modelos finais de EFP desenvolvidos através da inclusão dos vários componentes e das relações de contacto estabelecidas entre eles. Explicam-se também os métodos utilizados e considerações feitas no processo de simplificação do modelo.

Por fim apresentam-se os resultados obtidos nas simulações numéricas, realizadas em LS-Dyna<sup>TM</sup>, de formação de um EFP. Os resultados de interesse no âmbito de capacidade balística do projétil formado — velocidade, energia cinética, *etc.* — são confrontados e

avaliam-se as diferenças e os benefícios dos parâmetros geométricos estudados.

### **Parte III** - Considerações Finais

A terceira parte deste trabalho consiste, unicamente, nas conclusões e discussões gerais de todos os resultados obtidos e desenvolvimentos efetuados na realização deste trabalho.



Parte II

Modelação Numérica





## Capítulo 2

# Métodos e Procedimentos

Neste capítulo é descrito o método numérico utilizado para a realização das análises. São descritos os procedimentos e métodos utilizados na caracterização do comportamento mecânico de alguns materiais no âmbito deste trabalho, através de simulações numéricas em LS-Dyna™, de forma a determinar as condições ideais para caracterização dos materiais em situação de detonação.

---

### 2.1 Método dos elementos finitos

No presente capítulo apresenta-se uma breve introdução ao Método dos Elementos Finitos (MEF), método de análise essencial para a realização de simulações numéricas sobre balística. Em finais do Século XVIII, o matemático e cientista Gauss propôs, pela primeira vez, a utilização de funções de aproximação para resolver problemas matemáticos, introduzindo um dos conceitos de base para o desenvolvimento do Método dos Elementos Finitos, designado como MEF. No século seguinte verificou-se pouca evolução nesta matéria, essencialmente devido à complexidade existente no processamento e resolução de equações algébricas. Já em meados do Século XX, devido a avanços tecnológicos tais como, por exemplo, o aparecimento do computador digital, observou-se um desenvolvimento significativo do MEF, permitindo a resolução de sistemas de equações complexas [18].

Alexander Hrennikoff (1941) e Richard Courant (1942) [13] foram dois dos pioneiros que utilizaram abordagens dramaticamente diferentes do MEF, mas que partilham uma característica essencial, a discretização de um meio contínuo num conjunto de subdomínios discretos, usualmente chamados de elementos. Porém, foi em 1947 que O. Zienkiewicz juntou os dois métodos de Hrennikoff e Courant, e desenvolveu o formalismo matemático a que se chamou de Método dos Elementos Finitos [14].

Devido às grandes necessidades manifestadas pelas indústrias nuclear, militar e aeroespacial, foi na década de 50 do século XX que se verificou o desenvolvimento significativo do MEF. Em 1956 Turner *et al.* [15] publicaram um artigo científico onde propuseram um método de análise estrutural, sendo este método muito idêntico ao MEF. No caso particular do MEF, a publicação mais antiga em que são utilizados os termos *elementos finitos* data de 1960 e foi escrita por Ray Clough, professor da Universidade de Berkeley e, simultaneamente, funcionário da Boeing [16]. Os grandes passos no desenvolvimento

do MEF e que o conduziram ao seu formato actual, foram dados em finais da década 60 e início da década 70 do século XX.

Em 1973, o MEF foi fornecido com uma base matemática rigorosa por G. Strang e G. Fix na publicação "*An Analysis of The Finite Element Method*". Desde então o MEF tem vindo a ser generalizado para um conjunto de campos da matemática aplicada para modelar numericamente sistemas físicos numa grande variedade de áreas das ciências e das engenharias. Na atualidade, o recurso aos métodos numéricos tornou-se uma ferramenta essencial para qualquer tipo de investigação. Dada a sua rapidez, baixo custo e o constante aumento de precisão disponível, a realização de simulações numéricas utilizando o Método dos Elementos Finitos abrange, como foi mencionado anteriormente, uma vasta gama de ramos das engenharias e áreas de investigação.

De uma forma resumida, a análise com base no MEF pode ser dividida em várias etapas:

- i) Modelação do sistema real em análise;
- ii) Discretização do meio contínuo;
- iii) Definição de propriedades de cada elemento e montagem dos mesmos;
- iv) Definição dos parâmetros de controlo de análise;
- v) Cálculo Numérico;
- vi) Visualização e interpretação dos resultados.

A primeira abordagem ao MEF inicia-se pela modelação geométrica da estrutura ou problema em análise. Essa modelação é conseguida através da utilização de ferramentas de desenho assistido por computador (CAD<sup>1</sup>) como CATIA<sup>™</sup> ou LS-Prepost<sup>™</sup>, o pré-processador do LS-Dyna<sup>™</sup>. O MEF é um método numérico que procura uma solução aproximada da distribuição de um conjunto de variáveis de um domínio próprio, difícil (ou impossível) de obter de forma analítica. Essa solução é encontrada através da divisão do domínio em vários elementos, isto é, a discretização do meio em elementos finitos. Os elementos finitos podem assumir vários tipos e geometrias tais como, por exemplo, os tetraedros e hexaedros, cada um deles com vantagens e desvantagens dependendo do tipo de análise pretendida.

A definição de modelos de comportamento dos materiais é de grande importância para garantir precisão dos resultados obtidos. Na área do cálculo estrutural os modelos do comportamento dos materiais, frequentemente designados por modelos constitutivos, podem ser de diversos tipos tais como, por exemplo: (i) elástico (linear), em que após a sujeição de esforços o material retoma a sua condição inicial de deformação nula; (ii) plástico (não-linear), em que parte da deformação tem carácter permanente; (iii) elasto-plástico, que corresponde a uma fase inicial de comportamento elástico e outra de comportamento plástico; (iv) viscoelástico e viscoplástico, quando a resposta do material depende do tempo (velocidade), *etc.*

Para definir completamente o modelo de comportamento de um material torna-se necessário a obtenção de propriedades físicas e mecânicas tais como, por exemplo, a densidade, módulo de corte, *etc.*

---

<sup>1</sup>Do inglês *Computer Aided Design*.

Depois de determinadas e definidas as propriedades necessárias, são definidos os carregamentos aplicados, as condições de apoio e de contorno do problema, normalmente designadas como condições de fronteira [17; 18].

Só depois de totalmente definido o modelo e os parâmetros de controlo da análise é que se procede ao cálculo e pós-processamento, conforme representado no esquema da figura 2.1.

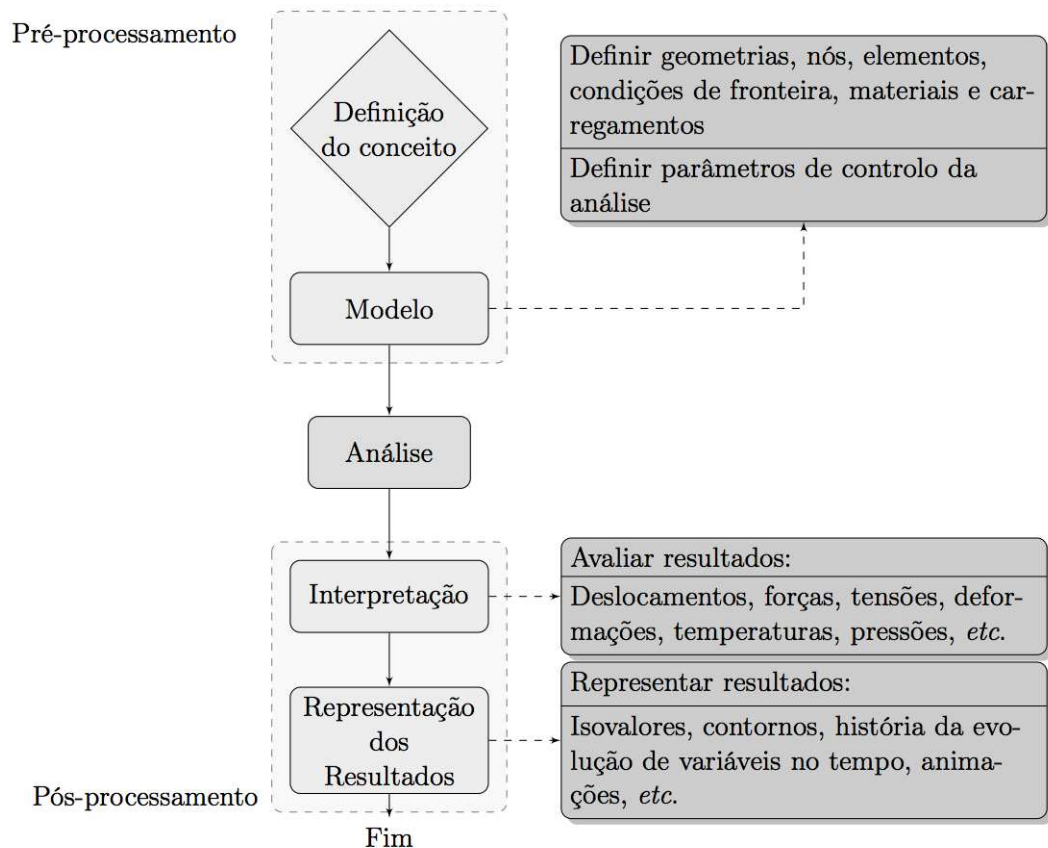


Figura 2.1: Representação esquemática da metodologia de análise típica de um problema recorrendo ao método dos elementos finitos (MEF) [19].

## 2.2 Software 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™ teve por base um outro programa de simulação, o DYNA3D™, desenvolvido pelo Dr. John Hallquist no *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL) em 1976. Este *software*, por sua vez, foi desenvolvido com o intuito de simular o impacto de uma bomba nuclear libertada a baixa altitude. Nesta época não existia *software* de cálculo tridimensional capaz de simular impactos e os programas de análise bidimensionais disponíveis não eram adequados. 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-processador 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 bidimensionais e tridimensionais, análises térmicas, de mecânica dos fluidos, de fratura, *etc.* Este programa pode ainda ser aplicado à resolução de problemas não-lineares que implicam pelo menos uma (por vezes todas) das seguintes condições: mudança de condições fronteiras, alteração de contactos entre as diferentes partes que constituem o modelo, aumento dos 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.

## 2.3 Modelos Constitutivos

Um modelo constitutivo é uma descrição matemática da resposta de um material a vários tipos de carregamentos. Esta é a área mais investigada de mecânica dos sólidos devido à sua complexidade e à necessidade de modelos constitutivos precisos para aplicações práticas de engenharia. Situações como, por exemplo, um impacto estrutural, levam frequentemente à ocorrência de eventos de escoamento plástico a elevadas taxas de deformação com aumento localizado da temperatura e possível fratura do material. É do conhecimento científico que o escoamento plástico é função da deformação plástica, da taxa de deformação e da temperatura [18]. Vários modelos constitutivos foram apresentados ao longo dos anos com diferentes relações funcionais. O modelo constitutivo mais referenciado em problemas de impacto é o modelo de Johnson-Cook [28] segundo o qual a dependência do estado de tensão triaxial considera os efeitos quer da elevada velocidade de deformação quer da temperatura.

### 2.3.1 Modelo de comportamento plástico de Johnson-Cook

No âmbito deste trabalho, para a previsão do comportamento dos materiais durante a simulação numérica foi utilizado o modelo constitutivo elasto-viscoplástico apresentado por Johnson e Cook [28]. Neste modelo, a tensão equivalente de von-Mises,  $\bar{\sigma}$ , é considerada como sendo o produto de três características do material, nomeadamente: a deformação plástica do material, a taxa de deformação plástica e a temperatura necessária para alterar a dureza do material. Segundo aqueles autores, a tensão  $\bar{\sigma}$  é apresentada como sendo:

$$\bar{\sigma} = (A + B\epsilon^n) [1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*)] [1 - (T^*)^m], \quad (2.1)$$

onde  $A, B, C, n$  e  $m$  são constantes do material que correspondem à tensão de cedência, constante e expoente de encruamento, constante da velocidade de deformação e o coeficiente de amaciamento térmica, respetivamente,  $\epsilon$  é a deformação plástica equivalente, a

taxa de deformação plástica equivalente (adimensional) é dada por  $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ , e  $T^*$  é a temperatura adimensional definida por

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}, \quad (2.2)$$

onde  $T$  é a temperatura corrente,  $T_m$  é a temperatura de fusão do material e  $T_0$  é a temperatura de mudança de fase.

O primeiro fator na equação 2.1,  $(A + B\epsilon^n)$ , representa dependência da tensão da deformação plástica, para  $\dot{\epsilon}_0 = 1$  e  $T^* = 0$ . Os outros fatores representam, respetivamente, os efeitos dinâmicos e os da temperatura no fluxo de tensão.

### 2.3.2 Modelo de comportamento para HE

No LS-Dyna<sup>TM</sup> existe um modelo material para a previsão do comportamento de um explosivo energético (HE), denominado \*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN. Este modelo calcula as frações queimadas,  $F$ , com base nos trabalhos de Wilkins (1964) [49] e Giroux (1973) [50]. Este cálculo é realizado em duas fases (de uma forma cíclica), a iniciação e a propagação. Na primeira fase é calculado o tempo de ignição,  $t_1$ , para todos os elementos finitos da discretização do explosivo, dividindo a distância entre o ponto de detonação e o centro do elemento pela velocidade de detonação do explosivo,  $D$ . Para o caso de múltiplos pontos de detonação, o ponto mais perto do elemento determina o valor de  $t_1$ . Na segunda fase são calculadas as frações queimadas do explosivo. Este modelo permite três tipos de cálculo das frações queimadas definidas pelo parâmetro  $\beta$ : a detonação programada, a detonação  $\beta$  e a detonação que relaciona as duas anteriores, a detonação  $\beta$ +programada.

Para uma detonação programada o modelo de explosivo tem o comportamento de um material elasto-plástico ideal, permitindo que o explosivo seja comprimido sem que haja detonação do mesmo. Neste tipo de detonação, a fração queimada,  $F_1$ , é calculada da seguinte forma:

$$F_1 = \begin{cases} \frac{2(t-t_1)DA_{e_{\max}}}{3\nu_e} & \text{para } t > t_1 \\ 0 & \text{para } t \leq t_1 \end{cases}, \quad (2.3)$$

em que  $t$  corresponde ao tempo de ignição do elemento explosivo,  $A_{e_{\max}}$  corresponde à área máxima do elemento e  $\nu_e$  é o seu volume.

Para uma detonação  $\beta$  qualquer compressão volumétrica causa detonação do explosivo. Neste tipo de detonação a fração queimada,  $F_2$ , é calculada da seguinte forma:

$$F_2 = \frac{1 - V}{1 - V_{CJ}}, \quad (2.4)$$

em que  $V_{CJ}$  corresponde ao volume de Chapman-Jouget e  $V$  é o volume relativo do explosivo.

Nos modelos de *Explosively Formed Projectiles* (EFP) desenvolvidos, é utilizada uma detonação  $\beta$ +programada. Este tipo de detonação apresenta um comportamento misto que permite a detonação programada através de um detonador ou a detonação  $\beta$  através da compressão volumétrica, desta forma, a fração queimada é calculada como o máximo das detonações, isto é,

$$F = \max(F_1, F_2). \quad (2.5)$$

Desta forma, de acordo com os estudos realizados por Wilkins [49] e Giroux [50], a pressão num elemento finito da discretização do HE é determinada da seguinte forma:

$$p = Fp_{EOS}(V, E), \quad (2.6)$$

onde  $p_{EOS}$  é a pressão calculada pela equação de estado que é função do volume relativo,  $V$ , e da densidade de energia interna por unidade de volume,  $E$ .

## 2.4 Equações de estado — EOS

Na física e na termodinâmica, uma equação de estado (EOS<sup>2</sup>) estabelece uma relação entre as variáveis de estado de um determinado problema [30]. De uma forma mais específica, uma equação de estado é uma equação termodinâmica que descreve o estado da matéria sujeita a um conjunto de condições físicas, fornecendo uma relação matemática entre dois ou mais estados tais como, por exemplo, a energia interna, a pressão, a temperatura ou o volume. Situações de simulação que necessitam da definição de equações de estado são normalmente caracterizadas por elevadas taxas de deformação — material sujeito a pressões que excedem limite de elasticidade ou a propagação de ondas de choque. Atualmente não existe nenhuma equação de estado única que descreva, com precisão, todas as propriedades de todos os materiais e substâncias sujeitas a todos os conjuntos de condições possíveis. A equação de estado mais referenciada em problemas de impacto para o comportamento de metais é a equação de Gruneisen, que estabelece uma relação entre pressão e volume num sólido a uma dada temperatura. Esta EOS é frequentemente utilizada para determinar a pressão num sólido comprimido por uma onda de choque. Para problemas de detonação de explosivos surge uma outra equação de estado muito referenciada, a equação de Jones-Wilkins-Lee (JWL). Presentemente existem várias equações de estado para os produtos de uma detonação ou problemas de impacto, desenvolvidas especificamente para satisfazer critérios específicos dos utilizadores. A escolha de uma equação de estado particular é baseada na capacidade desta em acomodar o algoritmo no *software* de simulação e na capacidade adaptativa da EOS a pequenas modificações.

### 2.4.1 Equação de estado de Gruneisen

A equação de estado de Gruneisen é uma expressão matemática muito utilizada para descrever a resposta dos materiais ao impacto de ondas de choque. O comportamento, para uma grande variedade de materiais, é descrito adequadamente pela relação linear de Hugoniot, entre a velocidade da onda de choque,  $v_s$ , e a velocidade das partículas dos materiais,  $v_p$ , que está na base da equação de Gruneisen [32], isto é,

$$v_s = C_0 + sv_p, \quad (2.7)$$

onde  $C_0$  e  $s$  são parâmetros dos materiais obtidos experimentalmente. Os valores destes parâmetros podem ainda ser encontrados na literatura para vários tipos de materiais [8; 10]. A EOS de Gruneisen relaciona a pressão,  $p$ , e a energia interna,  $E$ , de um material

---

<sup>2</sup>Do inglês *Equation of State*.

para um estado final de Hugoniot [32]. A EOS de Gruneisen define a pressão para o material comprimido como

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu+1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu+1)^2} \right]} + (\gamma_0 + a\mu) E \quad (2.8)$$

e, para o material expandido, como

$$p = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu) E, \quad (2.9)$$

onde  $C$  é a velocidade no ponto de intercepção das curvas  $v_s$  e  $v_p$ , e  $S_1, S_2$  e  $S_3$  são os coeficientes dos declives das curvas  $v_s$  e  $v_p$ . O coeficiente de Gruneisen é representado por  $\gamma_0$  e a correção de primeira ordem do coeficiente por  $a$ . O parâmetro  $\mu$  é um fator adimensional representado por

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1, \quad (2.10)$$

em que  $\rho_0$  e  $\rho$  são a densidade inicial e instantânea do material, respetivamente.

### 2.4.2 Equação de estado de Jones-Wilkins-Lee (JWL)

A equação de estado de Jones-Wilkins-Lee (JWL) é uma expressão matemática empírica, muito utilizada para descrever a relação pressão-volume associada à detonação de explosivos energéticos (HE). A equação é utilizada para calcular o estado dos produtos à medida que estes expandem em condições de alta pressão e densidade, instantes depois da detonação, para um estado final de pressões normais e densidade gasosa. A equação de JWL é baseada no princípio de Gruneisen mas ajustada a dados experimentais. Como qualquer equação de estado empírica, a viscosidade, a condutividade, a fricção e as forças de campo (como a da gravidade), são negligenciadas quando comparadas com os momentos principais do sistema. A natureza prática e a grande base de dados experimental de explosivos suportados pela EOS JWL apresentam-se como as duas principais vantagens sobre outras equações de estado. Adicionalmente, a EOS JWL é formulada na base dos dois bem reconhecidos precedentes, Murnaghan e Tait [51].

A forma mais geral do algoritmo de pressão de JWL pode ser escrita da seguinte forma:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}. \quad (2.11)$$

Esta expressão relaciona a pressão  $p$  com o volume relativo  $V = v/v_0$  e a energia  $E$ . Aqui,  $v_0$  corresponde ao volume inicial de explosivo por reagir enquanto  $v$  é o volume de material sujeito à pressão  $p$ . O termo de energia,  $E$ , contém a energia das ligações químicas assim como a energia cinética associada a aspectos relacionados com a detonação. Os termos  $A, B, C, R_1, R_2$  e  $\omega$  são constantes dos materiais que correspondem aos coeficientes de pressão do material, os valores próprios (principal e secundário) e a parte fraccionária do expoente adiabático da equação de Tait, respetivamente [51].

## 2.5 Caraterização dos materiais utilizados

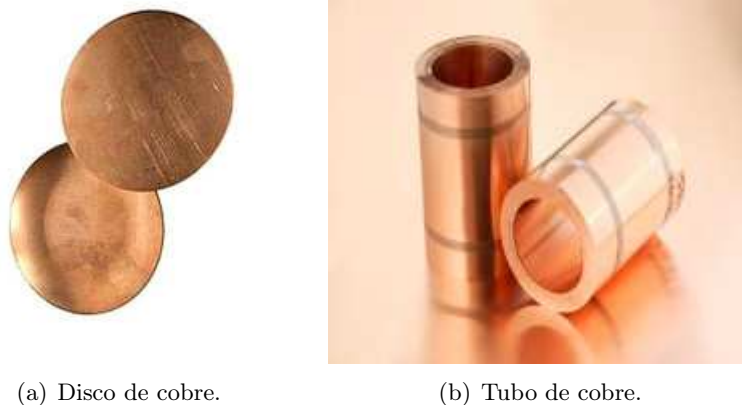
### 2.5.1 Projétil

As propriedades dos materiais que constituem o projétil são muito importantes no contexto dinâmico do processo de formação do *Explosively Formed Projectile* (EFP) e na

eventual eficácia na penetração do alvo. São utilizados materiais com elevada densidade, ductilidade e temperatura de fusão suficientemente alta para evitar a fusão devido ao aquecimento adiabático. O cobre, o ferro e o tântalo são materiais que possuem uma boa combinação destas características, tornando-os nos mais escolhidos para este tipo de aplicações.

### 2.5.1.1 Cobre OFHC

O cobre *oxygen free high conductivity*, também conhecido como, cobre OFHC, é uma liga de cobre com alta condutividade, de aproximadamente 58.108 MS/m, que foi electrolicamente refinado de forma a reduzir os valores de oxigénio para menos de 0.001%. O cobre OFHC, devido ao processo de refinamento a que é sujeito, apresenta-se quase sem impurezas, o que leva a um aumento das qualidades e características inerentes ao material como por exemplo uma elevada ductilidade, resistência ao impacto, condutividade térmica e elétrica, *etc.* Estes parâmetros são de elevada importância para a absorção da onda de choque produzida pela detonação do explosivo e conseqüente aceleração e deformação do material para formar o projétil. Na figura 2.2 estão representados dois exemplos de cobre na forma de (a) disco e (b) tubo.



(a) Disco de cobre.

(b) Tubo de cobre.

Figura 2.2: Exemplos de aplicação do cobre [37; 38].

Neste trabalho é realizado um estudo sobre o comportamento do cobre OFHC no processo de formação de um *Explosively Formed Projectile* (EFP) devido à boa combinação das propriedades procuradas. O material é caracterizado pelo modelo constitutivo de Johnson-Cook (parâmetros listados na tabela 2.1), e pela equação de estado de Gruneisen (parâmetros listados na tabela 2.2). As propriedades do material utilizadas na simulação numérica, e representadas nas tabelas 2.1 e 2.2, foram definidas por Johnson [28] e Jun Wu [10].

### 2.5.1.2 Ferro ARMCO<sup>®</sup>

O ferro puro da *American Rolling Mill Company* (ARMCO<sup>®</sup>) é uma das séries de ferro mais puras alguma vez produzidas. O processo de fabricação a que está sujeito causa a



Tabela 2.1: Propriedades dos materiais utilizados no modelo constitutivo de Johnson-Cook [28; 10; 8].

Propriedades	Cobre OFHC	Ferro ARMCO®	Tântalo	Aço 1006	Alumínio 6061-T6
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	8930	7890	16690	7896	2785
$G$ [GPa]	46,4	80	69	81,8	27,6
$A$ [GPa]	0,12	1	0,8	0,35	0,265
$B$ [GPa]	0,2	0,38	0,55	0,275	0,426
$C$	0,04	0,06	0,0575	0,022	0,015
$P_c$ [GPa]	129	164	150	180	—
$n$	0,15	0,31	0,4	0,36	0,34
$m$	0,55	0,55	0,44	1	1
$T_{fus}$ [K]	1360	1812	3293	1811	775
$T_0$ [K]	293	293	293	293	293
$\dot{\epsilon}_0$ [s <sup>-1</sup> ]	10000	10000	10000	10000	10000
$C_p$ [J/(kg K)]	383	452	135	452	875

Tabela 2.2: Parâmetros da EOS de Gruneisen referentes as propriedades dos materiais utilizados [10; 8; 46; 45].

Propriedades	Cobre OFHC	Ferro ARMCO®	Tântalo	Aço 1006	Alumínio 6061-T6
$C$ [m/s]	3940	3630	3400	4569	5328
$S_1$	1,49	1,8	1,17	1,49	1,338
$S_2$	0,00	0,00	0,074	0,00	0,00
$S_3$	0,00	0,00	-0,038	0,00	0,00
$\gamma_0$	1,99	1,81	1,6	2,17	2

remoção quase completa dos elementos indesejáveis resultando numa estrutura homogênea de ferrite pura com baixos níveis de carbono, oxigênio e nitrogênio. Este material apresenta uma boa combinação de qualidades tais como elevada densidade, calor específico, módulo de corte, entre outras, úteis para o processo de formação de um *Explosively Formed Projectile* (EFP). Na figura 2.3 estão representados dois exemplos de ferro ARMCO®.

O material é caracterizado pelo modelo constitutivo de Johnson-Cook (parâmetros listados na tabela 2.1), e pela equação de estado de Gruneisen (parâmetros listados na tabela 2.2). As propriedades do material utilizadas na simulação numérica foram definidas por Zhou [46] e Pappu [8].

### 2.5.1.3 Tântalo

O tântalo foi descoberto em 1802 na Suécia por Anders Ekeberg. Este metal é conhecido pela sua extrema resistência à corrosão. De facto, para temperaturas inferiores a 150 °C é quase completamente imune a ataques de ácidos. O tântalo é um metal escuro, com elevada densidade, ductilidade e condutividade, quer elétrica quer térmica, e de produção fácil [43]. Dos materiais utilizados para o projétil, este é o que apresenta uma temperatura de fusão mais elevada e maior densidade. O tântalo existe em duas fases cristalinas, as fases  $\alpha$  e  $\beta$ . A fase  $\alpha$  apresenta uma estrutura BCC e é caracterizada por ser uma fase mais dúctil e macia. A fase  $\beta$  apresenta-se mais rígida e frágil. É uma fase metaestável que se converte para  $\alpha$  quando aquecida a temperaturas entre 750 e 775 °C. Na figura 2.4 estão representados uma amostra e um exemplo de aplicação do tântalo.

O tântalo é caracterizado pelo modelo constitutivo de Johnson-Cook (parâmetros listados na tabela 2.1), em conjunto com a equação de estado de Gruneisen (parâmetros listados na tabela 2.2). As propriedades do material utilizadas na simulação numérica foram definidas por Pappu [8] e Vahedi [45].

### 2.5.2 Revestimento e Base

O revestimento e a base do EFP são dois componentes com um papel importante no contexto de formação de um EFP. Estes componentes permitem um maior controlo da intensidade e direção da onda de choque produzida pela detonação do HE. No contexto desta dissertação não é realizado um estudo dos materiais aplicados a estes componentes, tendo estes sido escolhidos pela sua utilização frequente noutros estudos semelhantes. É utilizado o aço 1006 e o alumínio 6061-T6 para o revestimento e base, respetivamente. Os materiais são caracterizados pelo modelo constitutivo de Johnson-Cook (parâmetros listados nas tabelas 2.1 e 2.1), e pela equação de estado de Gruneisen (parâmetros listados nas tabelas 2.2 e 2.2). As propriedades do material utilizadas na simulação numérica foram definidas por Pappu e Murr [8].

### 2.5.3 Explosivo

O material explosivo é uma substância reativa que contém uma grande quantidade de energia latente que, quando libertada subitamente, produz calor, luz, pressão e som. Este fenómeno é comumente designado por *explosão*. A energia armazenada nos explosivos pode ser apresentada de várias formas tais como, energia química (*e.g.* nitroglicerina, *etc.*), gás comprimido (*e.g.* cilindro de gás, lata de aerosol, *etc.*), ou mesmo energia nuclear (*e.g.* isótopos de urânio-235, plutónio-239, *etc.*). O material explosivo pode ser classificado de várias formas, entre elas consoante a velocidade a que os produtos expandem (HE e LE<sup>3</sup>), a sensibilidade a que os materiais reagem ao calor e à pressão (explosivos primários e secundários), pela forma física que apresentam, pela sua composição química, *etc.* [44]. No contexto dinâmico do processo de formação do EFP são utilizados materiais explosivos designados por HE. Isto implica que os produtos da detonação atinjam velocidades superiores à velocidade do som, como é o caso do TNT, RDX<sup>4</sup>,

---

<sup>3</sup>Do inglês *low explosives*.

<sup>4</sup>Do inglês Research Department X — designação química ciclotrimetilenotrinitramina.



(a) Placa de ferro ARMCO®.

(b) Blocos de ferro ARMCO®.

Figura 2.3: Exemplos da utilização do ferro ARMCO® [39].



(a) Amostra de tântalo.

(b) Disco de tântalo.

Figura 2.4: Representação de uma amostra e um exemplo de aplicação do tântalo [40; 41].

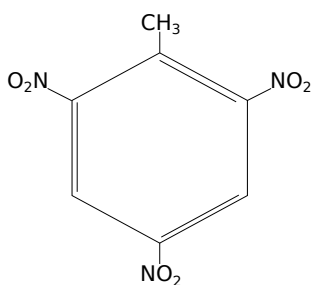
Comp B<sup>5</sup>, Octol (composição de HMX<sup>6</sup> e TNT), *etc.* [10; 8]. Nos pontos seguintes faz-se uma breve descrição dos métodos e parâmetros utilizados na modelação numérica dos explosivos.

### 2.5.3.1 TNT — Trinitrotolueno

O trinitrotolueno (TNT) foi preparado pela primeira vez em 1863 pelo alemão Julius Wilbrand [44] e foi utilizado originalmente como tintura amarela. O potencial do TNT como explosivo não foi aproveitado durante muitos anos devido à dificuldade de detonação, por ser um explosivo insensível. Nos dias de hoje o TNT tornou-se o explosivo mais comum para aplicações industriais e militares, chegando o seu rendimento explosivo a ser considerado como uma medida *standard* para outros explosivos. Foi a sua insensibilidade ao choque e fricção (reduzindo o risco de detonação acidental), assim como a eficácia em ambientes húmidos que o distinguiu de outros explosivos. Apesar de ser um explosivo muito conhecido, o TNT encontra-se geralmente em misturas explosivas que contêm uma percentagem variável de TNT e outros ingredientes. Algumas das misturas mais utilizadas no contexto da produção de EFP são:

- Comp B - Resulta de uma mistura de RDX e TNT.
- Octol - Resulta de uma mistura de HMX e TNT.

Um outro explosivo bastante usado nos EFP é a dinamite. É um erro comum dizer que TNT e dinamite são o mesmo. O dinamite é uma mistura explosiva baseada em nitroglicerina enquanto TNT é um composto químico específico (representado na figura 2.5(a)). Usando o TNT como medida *standard* da energia gerada pela explosão, a dinamite apresenta mais 60% de densidade energética que o TNT. Os materiais Comp B, Octol e



(a) Molécula de trinitrotolueno.



(b) Blocos de TNT.

Figura 2.5: Representação de uma molécula e de blocos de TNT [34].

Dinamite são utilizados como parâmetro de estudo no processo de formação de um EFP. No LS-Dyna<sup>TM</sup> os materiais explosivos são definidos como \*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN

<sup>5</sup>Do inglês *Composition B*.

<sup>6</sup>Explosivo energético de nitroamina, relacionado com o RDX.

em conjunto com a equação de estado de Jones-Wilkins-Lee (JWL), cujos parâmetros estão representadas nas tabelas 2.3 e 2.4, respetivamente. As propriedades do material utilizadas na simulação numérica foram definidas por Pappu [8] e Jun Wu [10].

Tabela 2.3: Parâmetros do material \*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN para os explosivos [8].

Explosivos	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$D$ [m/s]	$p_{CJ}$ [GPa]
Dynamite	1680	8800	37
Comp B	1717	7980	29,5
Octol	1821	8480	34,2

Tabela 2.4: Parâmetros EOS JWL referentes às propriedades dos explosivos em estudo [8].

Explosivos	$A$ [GPa]	$B$ [GPa]	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0$ [kJ/m <sup>3</sup> ]	$V_0$
Dynamite	852,4	18,02	4,55	1,3	0,38	8,5	1
Comp B	524,23	7,678	4,2	1,1	0,34	8,5	1
Octol	748,6	13,38	4,5	1,2	0,38	9,6	1

## 2.6 Desenvolvimento dos modelos

Nesta parte do trabalho é desenvolvido o modelo base para a análise do comportamento de um *Explosively Formed Projectile* (EFP). A correta definição dos parâmetros numéricos, como a geometria, a malha de elementos finitos, os graus de liberdade do sistema, o contacto entre partes, entre outros, é de extrema importância para qualquer modelo pois deles depende todo o desempenho da simulação numérica. A complexidade das interações dinâmicas entre os vários componentes do EFP constitui um desafio para a simulação numérica que requer um processo de modelação minucioso e muito dispendioso. Por este motivo, na realização de estudos deste carácter é geralmente criado um modelo simplificado que reproduz com alguma precisão o comportamento do dispositivo global. Nesta secção são descritos dois tipos de modelos base desenvolvidos: um modelo simplificado que apresenta simetria em dois planos e um modelo completo para o estudo de variáveis que apresentam assimetrias no dispositivo. Quer na modelação de cada parte quer na simulação do processo de formação de um EFP foi utilizado o programa de simulação numérica por elementos finitos LS-Dyna™.

### 2.6.1 Modelação das geometrias

O modelo geométrico do *Explosively Formed Projectile* (EFP) foi inicialmente proposto e desenvolvido por Jun Wu [10], apesar de, ao longo do estudo, ter sofrido alterações significativas. Este modelo, representado esquematicamente na figura 2.6, apresenta uma relação  $L/D \approx 1,07$ , com um disco (*liner*) de diâmetro  $D = 56$  mm, espessura  $e = 4$  mm, um raio de curvatura  $R = 120$  mm varrendo um ângulo  $\alpha = 29^\circ$ . O revestimento e a base

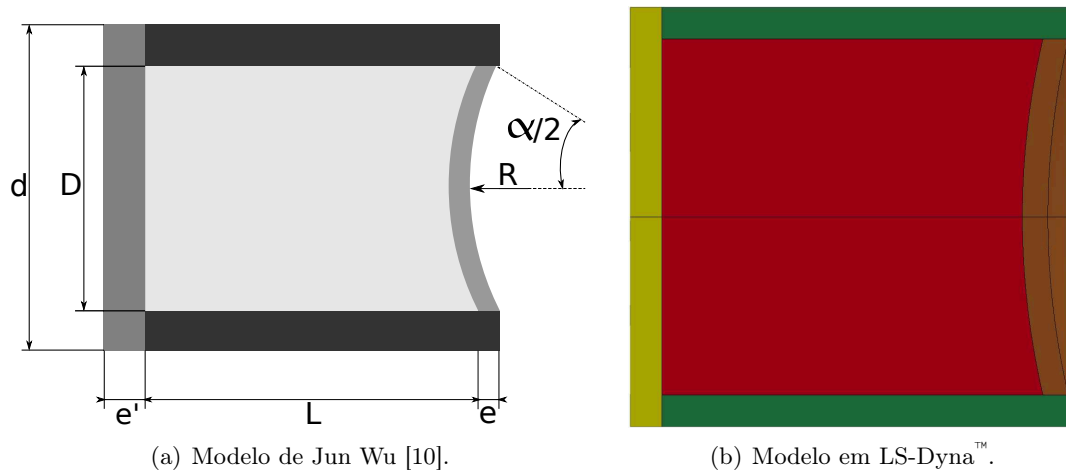


Figura 2.6: Representação do modelo utilizado por Jun Wu [10] e o modelo desenvolvido em LS-Dyna™.

apresentam uma espessura  $e' = 5$  mm sendo as suas restantes dimensões dependentes do explosivo em conjunto com o projétil.

### 2.6.2 Seleção da malha de elementos finitos

O grau de refinamento da discretização, isto é, da malha de elementos finitos, em conjunto com o tipo de elementos utilizados, são duas definições cruciais no desenvolvimento do modelo. Para maximizar o grau de confiança nos resultados numéricos obtidos procede-se à otimização das condições de ensaio. Com este procedimento pretende-se seleccionar, de entre malhas gradualmente mais refinadas, aquela que, previsivelmente, permite obter resultados mais precisos, sem que seja necessário recorrer a tempos de processamento computacional excessivo. O processo de otimização foi realizado quer para o explosivo quer para o projétil, pois este último está sujeito a grandes deformações e é necessário garantir um bom contacto entre ambos os componentes. Os processos de otimização (convergência) das malhas foram realizados tendo em vista duas vertentes: o número de elementos na superfície de contacto e o número de elementos em espessura, representados nas figuras 2.7 e 2.8. As características dos ensaios numéricos para caracterização das malhas estão indicadas na tabela 2.5. O processo de otimização permitiu definir a discretização final do projétil e do explosivo como tendo 100 elementos na direção radial com 4 elementos em espessura e 30 elementos na direção radial com 40 elementos em espessura, respetivamente. Tal se deve, principalmente, à necessidade de ter uma malha refinada na área de superfície do projétil devido à extensa deformação que sofre, e uma malha relativamente refinada no comprimento do explosivo de forma a obter uma propagação da onda de choque uniforme. Os elementos em espessura do projétil e a área de superfície do explosivo são parâmetros cuja influência na energia cinética do projétil se revelou menor, tendo se optado por um valor intermédio, possibilitando tempos de cálculos mais acessíveis à realização do trabalho.

As malhas são compostas por elementos hexaédricos de oito nós com dois tipos de formulação: a formulação Euleriana, para a simulação do comportamento do explosivo; e

a formulação Lagrangiana, para os restantes componentes. As formulações lagrangiana e euleriana apresentam duas formas distintas de ver o campo de escoamento na dinâmica de fluídos e na deformação plástica. Do ponto de vista lagrangiano, o campo de escoamento é uma forma de ver o movimento de um fluído como o acompanhamento de uma parcela individual de fluído ao longo do tempo e do espaço, isto é, do ponto de vista numérico, a malha de elementos finitos deforma-se consoante as propriedades e forma geométrica a ela associada. Já do ponto de vista euleriano, o campo de escoamento é uma forma de ver o movimento de um fluído que se concentra numa zona específica no espaço através do qual o fluído atravessa, isto é, a malha de elementos finitos não sofre qualquer tipo de deformação, analisando simplesmente o comportamento associado às propriedades estabelecidas para a zona específica da malha [10; 52]. As formulações utilizadas permitem analisar o comportamento do EFP de uma forma menos dispendiosa computacionalmente sem que este afete significativamente os resultados obtidos. Estas são definidas através do cartão `*SECTION_SOLID` do LS-Dyna™. A possibilidade de ocorrência de instabilidades numéricas no projétil, resultantes da existência de modos de energia nula, são controladas através da ativação de um módulo de controlo de *hourglass*, incorporado no LS-Dyna™. Este módulo de controlo designa-se por `*CONTROL_HOURLASS`.

Tabela 2.5: Características dos ensaios numéricos realizados para otimização da malha.

Componente	Tipo de elemento	Número de Elementos			Número de Nós	DOF
		espessura	raio	total		
Projétil	Sólido	2	30	1000	1623	9189
		4	30	2000	2705	15315
		6	30	3000	3787	21441
		8	30	4000	4869	27567
		4	50	3600	4805	27315
		4	80	6000	7955	45315
		4	100	7600	10055	57315
Explosivo	Sólido	20	30	10000	11361	—
		40	30	20000	22181	—
		60	30	30000	33001	—
		80	30	40000	43821	—

Este tipo de análise explícita<sup>7</sup> refere-se ao método numérico utilizado para representar e resolver as derivadas do tempo nas equações de energia e momento. São escritas, para todos os elementos da malha, um sistema de equações algébricas explícitas no instante  $t+\Delta t$ . Cada equação é resolvida em função da incógnita do deslocamento dos nós do elemento. O incremento de tempo,  $\Delta t$ , entre dois nós deve ser menor que o tempo necessário para um sinal atravessar à velocidade do som no material, caso contrário resulta em erros computacionais e consequentemente em maus resultados. O intervalo

<sup>7</sup>Do inglês *explicit analysis*.

de tempo crítico,  $\Delta t_c$ , pode ser calculado da seguinte forma:

$$\Delta t_c = \frac{\Delta x}{c} = \frac{\Delta x}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}. \quad (2.12)$$

Em caso de segurança é utilizado um valor sempre bastante inferior ao  $\Delta t_c$  sendo estabelecido como *default* no LS-Dyna™ o valor  $0,9\Delta t_c$ .

### 2.6.2.1 Condições de fronteira

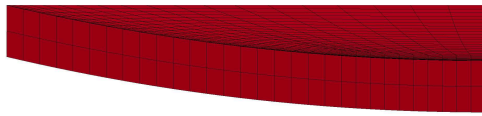
As condições de fronteira têm um papel crucial nas simulações numéricas pelo método dos elementos finitos. Estas condições estabelecem os graus de liberdade associados a um conjunto de nós, simplificando o sistema de equações. Nos modelos desenvolvidos, a utilização de condições de fronteira centrou-se no modelo simplificado, estabelecendo unicamente a relação de simetria dos planos  $xOy$  e  $yOz$  nos componentes do EFP, conforme representado na figura 2.9. No desenvolvimento do modelo completo não se verificou a necessidade de condições de fronteira devido à inexistência de planos de simetria e à utilização de uma malha com formulação euleriana no explosivo (não apresentando deslocamentos) o que permite o estudo de condições assimétricas de detonação e o voo do projétil como um corpo livre. Para o início da explosão é necessário atribuir uma condição de detonação. Para este propósito é utilizado o cartão `*INICIAL_DETONATION` do LS-Dyna™, através do qual é indicada a identificação do componente alvo e as coordenadas pretendidas para o ponto de detonação.

### 2.6.2.2 Contactos

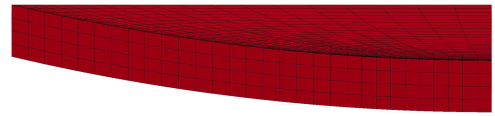
A definição da forma como cada componente envolvido na simulação interage quando em contacto com outros componentes é essencial e de extrema importância para o sucesso da modelação. Os algoritmos de contacto num impacto foram sempre uma capacidade importante do LS-Dyna™, sendo as suas interfaces definidas por dois lados, normalmente designados por *master* e *slave sides*. Cada um destes lados é composto por conjuntos de segmentos formado por três nós para os elementos tetraédricos e quatro nós para os elementos hexaédricos. No caso de estudo, é imediata a identificação das interações entre os componentes, nomeadamente a face de contacto entre o projétil e o explosivo, representada na figura 2.10, tendo estes sido simulados através do cartão `*CONTACT_SLIDING_ONLY` do LS-Dyna™. O algoritmo de contacto *sliding only* tem uma formulação baseada em segmentos que utilizam a lógica *slave segments-master segments*, em vez do tradicional *slave nodes-master segments* [47]. A principal utilidade deste contacto é o tratamento de interfaces em que os produtos de detonação de um HE atuam num material sólido. Este método consiste em cinco etapas [48]:

- Etapa 1: É calculada a massa por unidade de área (*areal density*),  $m/a$ , e pressão,  $p$ , em cada nó na superfície *slave*.
- Etapa 2: É definido o ponto de contacto para cada nó da superfície *master* e os valores de  $m/a$  e  $p$ , calculados na etapa anterior, são interpolados para os mesmos.
- Etapa 3: A distribuição da pressão é aplicada na superfície *master* para atualizar a sua aceleração.

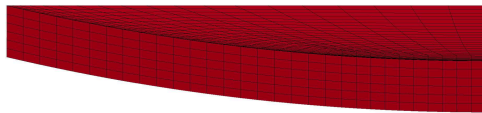




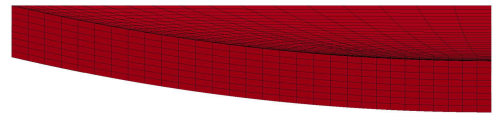
(a) Malha com 2 elementos em espessura.



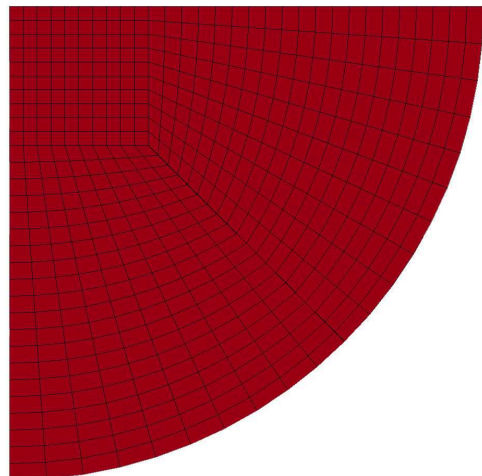
(b) Malha com 4 elementos em espessura.



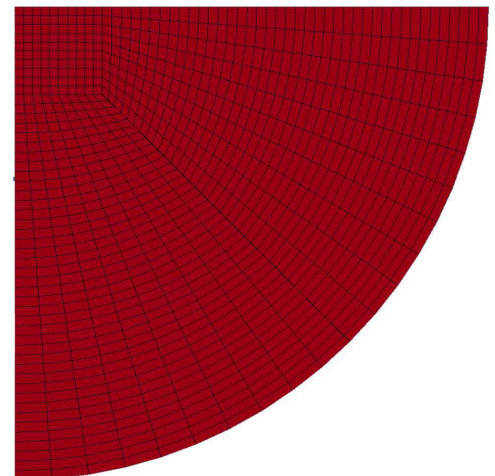
(c) Malha com 6 elementos em espessura.



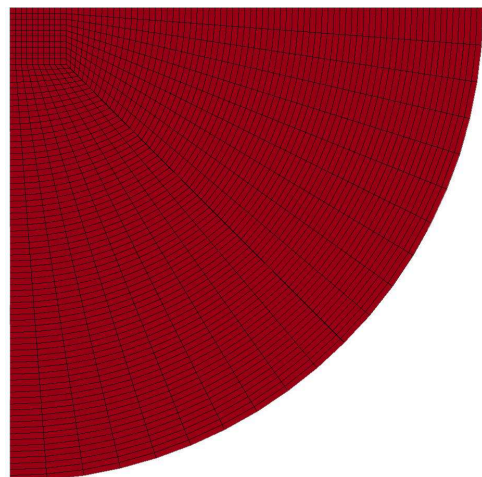
(d) Malha com 8 elementos em espessura.



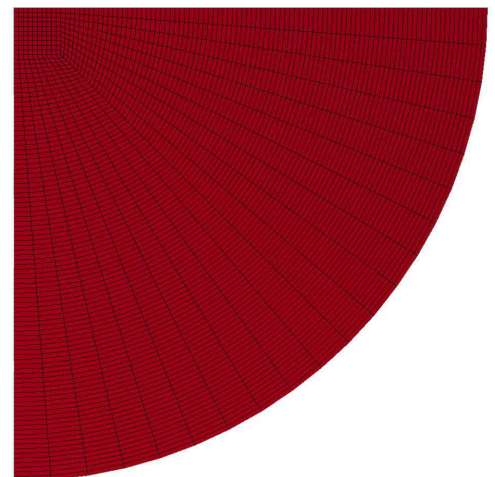
(e) Malha com 30 elementos na direção radial.



(f) Malha com 50 elementos na direção radial.



(g) Malha com 80 elementos na direção radial.



(h) Malha com 100 elementos na direção radial.

Figura 2.7: Representação das malhas de elementos finitos testadas para o projétil.

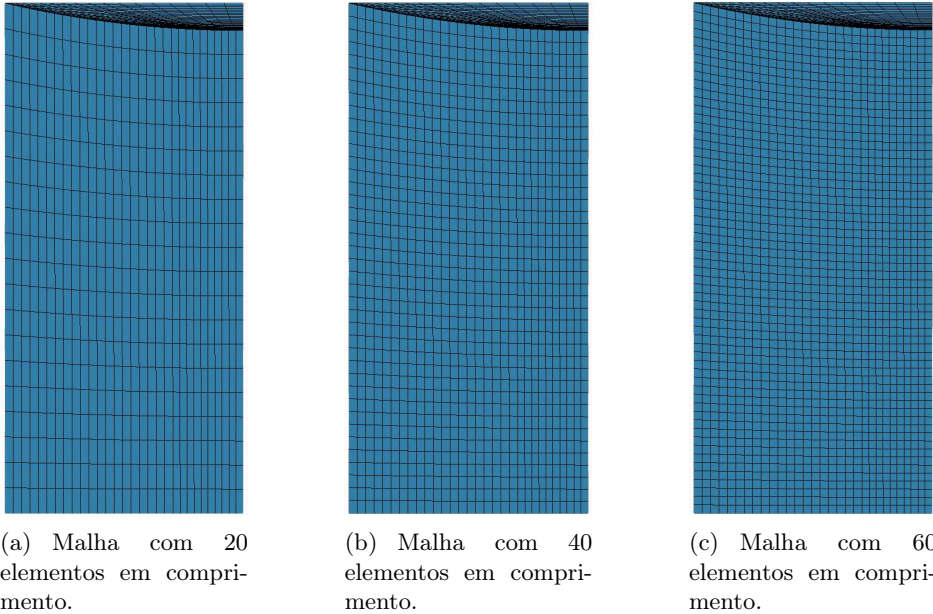


Figura 2.8: Representação das malhas de elementos finitos testadas para o explosivo.

- Etapa 4: A componente normal da aceleração em cada nó da superfície *master* é escalada pelo fator  $z$ , definido como,

$$z = \frac{m/a_{\text{master}}}{\sum m/a_{\text{slave}}}. \quad (2.13)$$

- Etapa 5: As componentes normais de aceleração e velocidade da superfície *slave* são restabelecidas de forma a garantir compatibilidade.

Este método atribui uma condição de fronteira entre as superfícies de contacto que as mantém unidas até que um determinado valor de tensão se desenvolva entre elas.

As simulações numéricas presentes neste trabalho são realizadas em duas fases. Numa primeira fase é simulado o processo de detonação em que é considerado o contributo de todos os componentes anteriormente mencionados, assim como o impacto da onda de choque no disco e a sua conseqüente aceleração e deformação. Esta fase corresponde, aproximadamente, aos primeiros 10  $\mu s$  após a detonação. Numa segunda fase, os efeitos do explosivo e revestimento são considerados desprezáveis, sendo apenas simulado o processo inicial de voo do projétil, a sua deformação e a estabilização da velocidade. Esta fase corresponde aproximadamente ao intervalo entre 10 e 400  $\mu s$  [10].

A avaliação da capacidade balística do projétil resultante é feita através de critérios relacionados com a energia cinética e forma final.

### 2.6.3 Referências dos ensaios numéricos

Devido à elevada quantidade de ensaios numéricos realizados ao longo de todo este trabalho, foi necessário recorrer a referências alfanuméricas para os designar, em concordância com a configuração de cada um. As referências iniciam-se sempre com uma letra maiúscula referente ao parâmetro em análise, de acordo com a tabela 2.6. Assim, cada ensaio

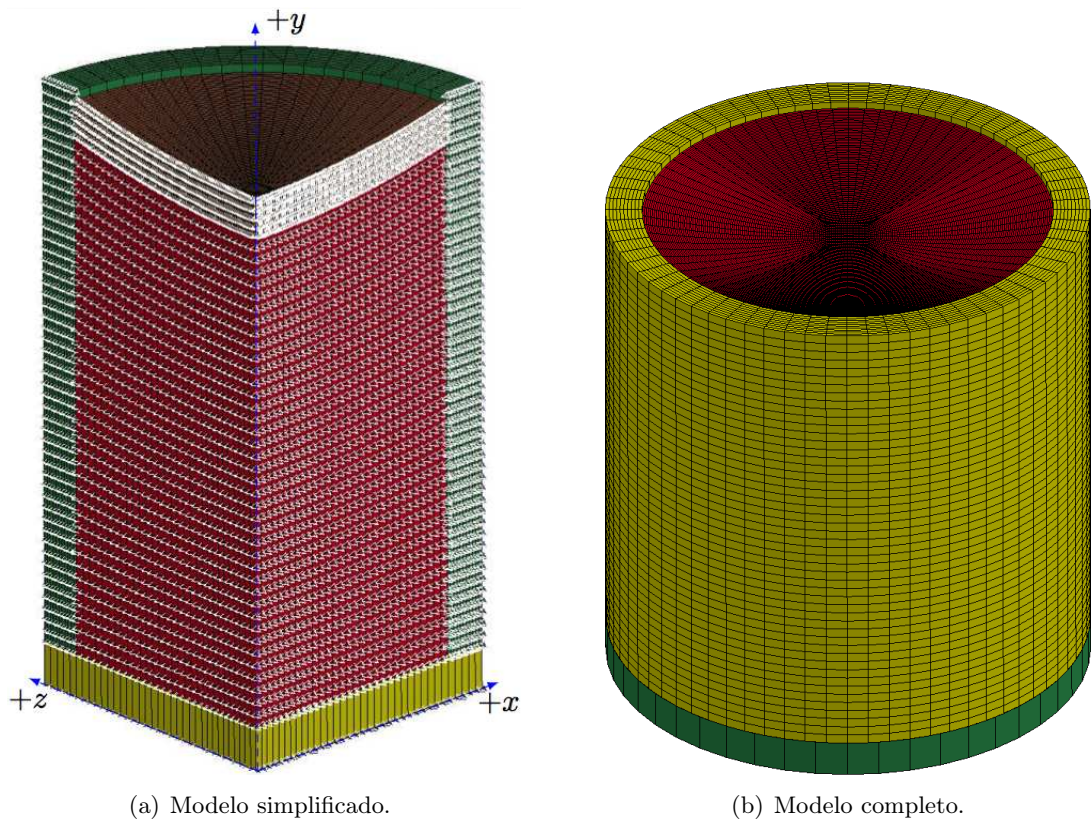


Figura 2.9: Representação das condições de fronteira atribuídas aos dois modelos.

de simulação numérica realizado será designado por uma sigla alfanumérica definida do seguinte modo:

$$PC - A - DD,$$

em que P é a sigla referente ao parâmetro em estudo (ver tabela 2.6), C representa o componente afetado pelo parâmetro em estudo e A diz respeito a qualquer sigla necessária para desambiguação, como por exemplo o material utilizado, uma condição do parâmetro, *etc.* Finalmente, DD é constituído por dois algarismos ou uma letra e um algarismo que definem qualquer parâmetro dimensional necessário para caracterizar o ensaio. A título de exemplo, a referência MP-C designa uma simulação realizada para estudar o efeito do material utilizado para o projétil. Nesta análise foi utilizado o cobre e não existem parâmetros dimensionais, isto é, são utilizadas as dimensões base definidas anteriormente.

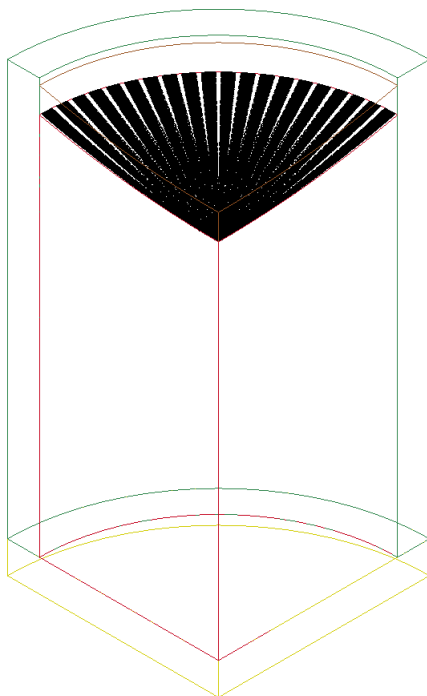


Figura 2.10: Representação do contacto entre o projétil e o explosivo.

Tabela 2.6: Parâmetros estudados no processo de formação de um EFP e respetivas siglas.

<b>Parâmetro de estudo</b>	<b>Sigla</b>
Materiais dos componentes	M
Espessura do disco	E
Detonação do explosivo	D

## Capítulo 3

# Modelos de estudo

Neste capítulo são descritos os métodos e procedimentos utilizados na realização das análises numéricas. Os modelos numéricos são definidos de acordo com cada variável em estudo, através da utilização do software LS-Dyna<sup>™</sup>.

---

No contexto da balística existem parâmetros tais como, por exemplo, a geometria, o tipo de detonação, os materiais, entre outros, que influenciam a capacidade de penetração do *Explosively Formed Projectile* (EFP). A compreensão da influência de cada um destes parâmetros na forma e na energia do projétil resultante permite a otimização do EFP de acordo com o tipo de alvo a atingir. Neste trabalho são estudadas as influências dos materiais, da espessura do disco (*liner*), do número e posicionamento relativo dos detonadores e da relação  $L/D$  de um EFP. Estes parâmetros são avaliados através de modelos numéricos especificamente desenvolvidos para estudar o efeito de cada conjunto de variáveis. Nas secções que se seguem são apresentadas as metodologias e procedimentos adotados para cada modelo desenvolvido na análise dos parâmetros mencionados

### 3.1 Análise dos materiais utilizados no modelo

As propriedades dos materiais que constituem o *Explosively Formed Projectile* (EFP) são muito importantes quer no contexto da dinâmica da formação do projétil quer na eventual eficácia de penetração dos alvos, como já foi anteriormente referido. Este modelo de análise tem como objetivo definir um conjunto padrão de materiais a utilizar no EFP de forma a garantir a maximização da capacidade balística, dentro dos parâmetros utilizados. Neste contexto, é realizada a análise dos vários materiais descritos no capítulo anterior quer para o projétil quer para o explosivo. O modelo numérico utilizado nesta análise foi o modelo simplificado, devido à existência de simetria geométrica. São também utilizados os parâmetros de controlo associados ao modelo simplificado, assim como os parâmetros geométricos definidos anteriormente. É considerado um único ponto de detonação no centro da base do explosivo. A constituição dos modelos desenvolvidos no âmbito da análise dos materiais que constituem o projétil encontra-se representada na tabela 3.1.

Os modelos desenvolvidos foram analisados em duas fases: a primeira fase corresponde



ao estudo do comportamento dos materiais utilizados para definir o projétil. Nesta fase, o explosivo utilizado foi a dinamite. A segunda fase corresponde ao estudo do comportamento dos materiais explosivos, utilizando o cobre como projétil.

Tabela 3.1: Descrição dos modelos desenvolvidos para a análise do comportamento dos materiais no processo de formação de um EFP

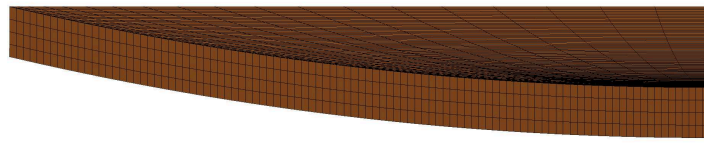
Modelo	Fase	Materiais utilizados			
		Projétil	Explosivo	Revestimento	Base
MP-T	Fase 1	Tântalo	Dinamite		
MP-F		Ferro	Dinamite		
MP-C/ME-D	Comum	Cobre	Dinamite	Aço 1006	Alumínio 6061-T6
ME-O	Fase 2	Cobre	Octol		
ME-C		Cobre	CompB		

### 3.2 Análise do efeito da espessura do projétil

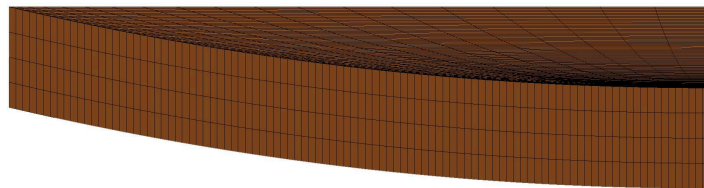
Os parâmetros geométricos de um *Explosively Formed Projectile* (EFP) foram sempre um fator de grande destaque e influência em estudos deste âmbito. Johnson [1], Weimann [3] e Carleone [5] foram alguns dos investigadores que realizaram estudos no contexto geométrico de um EFP. O modelo de análise definido nesta secção tem como objetivo estabelecer uma relação aproximada entre a velocidade final do projétil e a sua espessura inicial, de forma a determinar uma espessura otimizada para os parâmetros de estudo utilizados. Neste contexto são realizadas alterações nos parâmetros geométricos do disco, de forma a analisar a influência da espessura do projétil. Os parâmetros geométricos utilizados nesta análise estão representados na tabela 3.2.

Como foi referida anteriormente, a existência de simetria no modelo em estudo permite a utilização de um modelo simplificado. São utilizados os parâmetros de controlo definidos anteriormente, assim como os parâmetros geométricos dos restantes componentes, e os materiais (Cobre e Dinamite) definidos na análise intermédia do modelo de análise anterior.

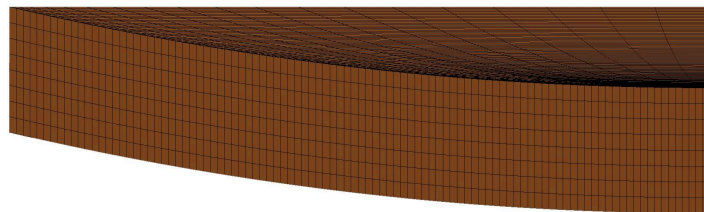
No desenvolvimento dos modelos foram consideradas duas vertentes de análise: a espessura constante e a variação linear da mesma. Na abordagem de espessura constante foram definidos cinco valores de espessura de uma gama de valores compreendida entre 1 e 20% do diâmetro do disco. Os modelos dos projéteis com espessura constante estão representados na figura 3.1. Na segunda abordagem são considerados dois casos possíveis de variação linear: (i) espessura máxima no centro do disco e (ii) espessura máxima no bordo do disco. O valor máximo de espessura nesta vertente é definido através de um valor intermédio da gama de valores constantes utilizados de forma a garantir um ponto de comparação entre as duas abordagens. Os modelos dos projéteis com espessura variável estão representados na figura 3.2.



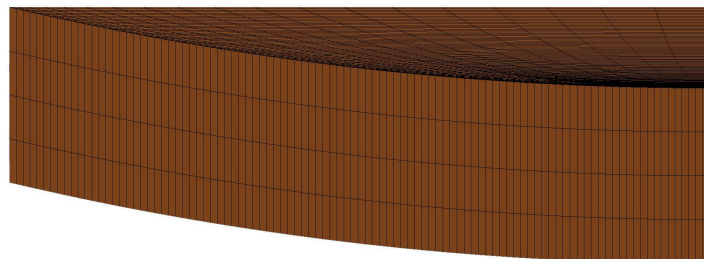
(a) Espessura de 2 mm.



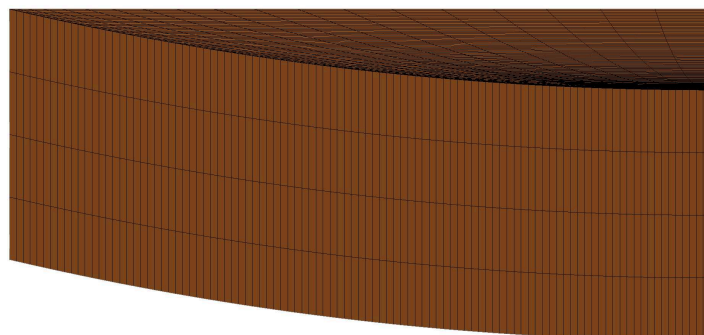
(b) Espessura de 4 mm.



(c) Espessura de 5 mm.

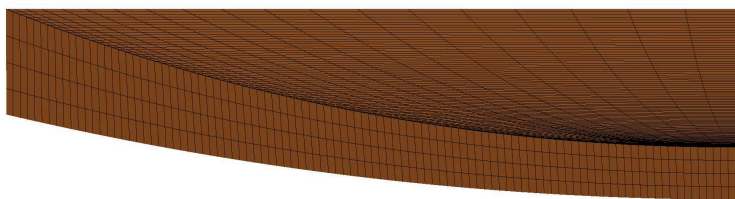


(d) Espessura de 7 mm.

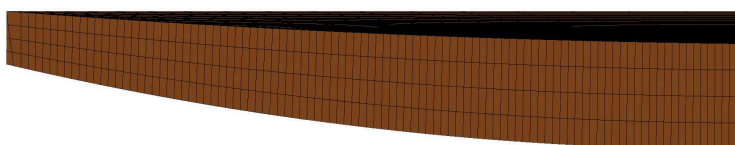


(e) Espessura de 10 mm.

Figura 3.1: Representação dos modelos dos discos (*liners*) com espessura constante.



(a) centro 2 mm e bordo 4 mm



(b) centro 4 mm e bordo 2 mm

Figura 3.2: Representação dos modelos dos discos (*liners*) com espessura variável.Tabela 3.2: Modelos desenvolvidos para a análise do efeito da espessura do disco (*liner*).

Modelo	Tipo de Espessura	Espessura [mm]
EP-C-02	Constante	2
EP-C-04		4
EP-C-05		5
EP-C-07		7
EP-C-10		10
EP-V-B2	Variável	4 (centro)
		2 (bordo)
EP-V-B4		2 (centro)
		4 (bordo)

### 3.3 Análise do efeito dos parâmetros de detonação

O tipo e posição do (ou dos) ponto(s) de detonação utilizada influencia todo o processo de libertação da energia armazenada nos explosivos e, conseqüentemente, o processo de formação de um *Explosively Formed Projectile* (EFP). O modelo de análise aqui apresentado tem como objetivo estudar o efeito da variação dos parâmetros de detonação. Neste contexto, o estudo é realizado tendo em vista dois parâmetros: a posição em relação ao centro da base do explosivo e o número de detonadores utilizados. Foram utilizados cinco



conjuntos de análise com diferentes números de detonadores. Cada um destes conjuntos foi sujeito a diferentes posições em relação ao centro da base do explosivo. Os parâmetros utilizados na análise estão representados na tabela 3.3.

Este estudo apresenta modelos com e sem simetria, tendo sido utilizado o modelo simplificado para modelos com número par de detonadores (modelos simétricos) e o modelo completo para os restantes. É utilizado o cobre e a dinamite, como foi definido anteriormente, assim como um projétil com  $e = 4$  mm e os parâmetros de controlo associados a cada modelo. É considerada uma detonação síncrona para todos os modelos analisados, não tendo sido introduzido atrasos entre múltiplas detonações. Na figura 3.3 estão representados os esquemas de detonação utilizados nas análises.

No capítulo seguinte são apresentados e discutidos os resultados obtidos para os modelos de análise anteriormente mencionados. Os resultados são interpretados tendo em conta a velocidade, a massa e conseqüente energia cinética e a forma geométrica final do projétil.

Tabela 3.3: Modelos desenvolvidos para a análise dos parâmetros de detonação.

Modelos	Número de detonadores	Distância ao centro [mm]	Espaçamento angular entre detonadores [°]
DE-1-05		5	
DE-1-15	1	15	—
DE-1-25		25	
DE-2-05		5	
DE-2-15	2	15	180
DE-2-25		25	
DE-3-05		5	
DE-3-15	3	15	120
DE-3-25		25	
DE-4-05		5	
DE-4-15	4	15	90
DE-4-25		25	
DE-5-05		5	
DE-5-15	5	15	72
DE-5-25		25	

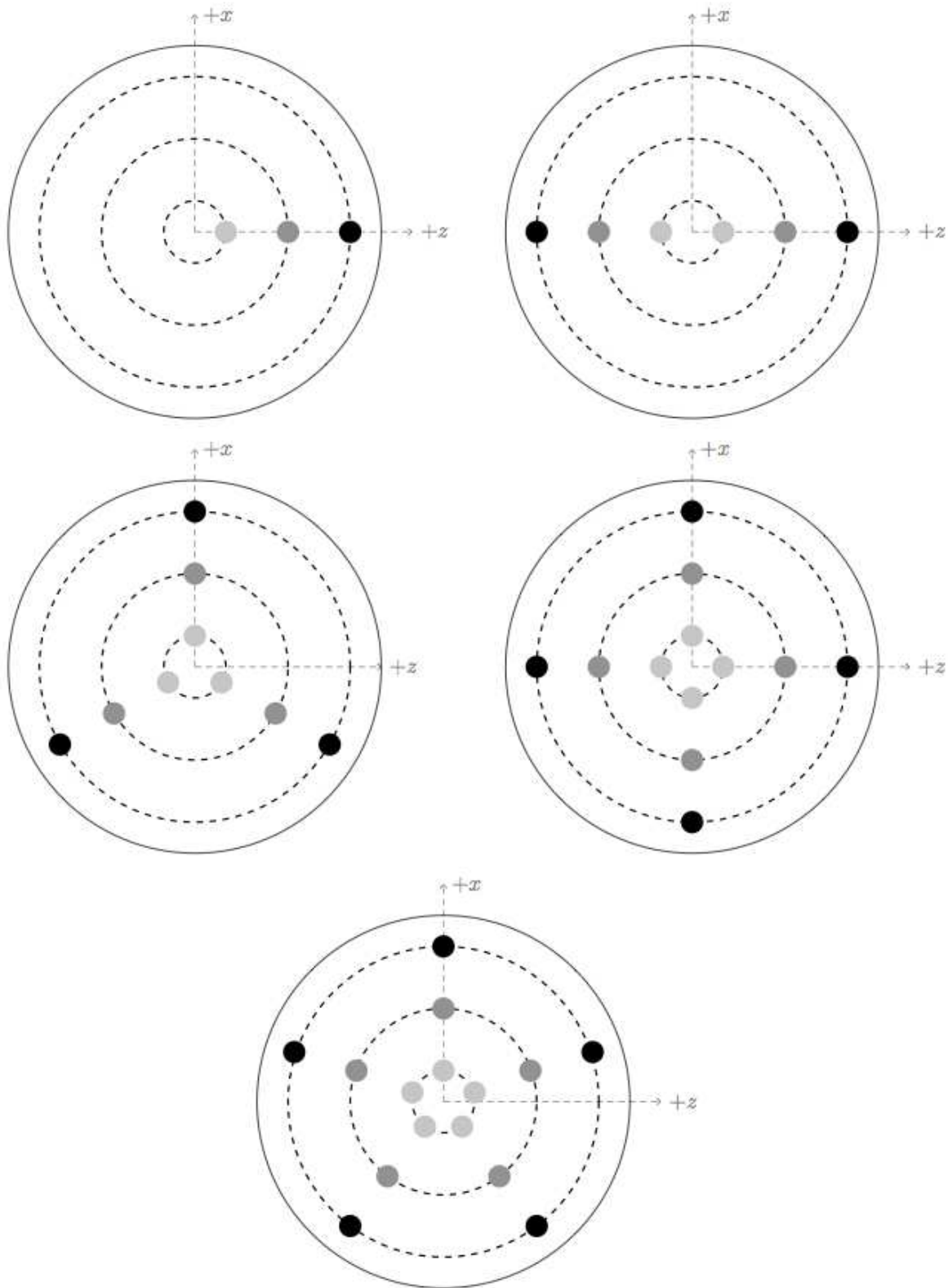


Figura 3.3: Representação dos esquemas de detonação definidos na tabela 3.3.

## Capítulo 4

# Resultados e Discussão

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nas simulações numéricas, realizadas em LS-Dyna<sup>™</sup>, do estudo dos materiais utilizados, da variação da espessura do projétil e do número e posicionamento dos detonadores num EFP. Os resultados de interesse no âmbito da capacidade de penetração do projétil resultante são confrontados e avaliam-se as diferenças obtidas para os distintos modelos.

---

### 4.1 Análise da energia cinética dos projéteis obtidos

#### 4.1.1 Para os diferentes materiais estudados

Os resultados obtidos são apresentados e discutidos nos parágrafos que se seguem. A variação da velocidade do *Explosively Formed Projectile* (EFP) em função do tempo para diferentes tipos de materiais que constituem o projétil e o explosivo, no âmbito do primeiro modelo de análise, estão representadas nos gráficos das figuras 4.1 e 4.2, respetivamente. A velocidade é medida em ambos os gráficos representados sendo possível verificar um pico de velocidade nos primeiros instantes, entre 6 e 10  $\mu s$ , que corresponde ao impacto dos produtos da explosão no disco. Os instantes seguintes, entre 10 e 400  $\mu s$ , correspondem a uma fase de grande deformação do projétil e também a uma estabilização da velocidade, atingindo a velocidade final perto do instante  $t = 400 \mu s$ . Através da análise da figura 4.1 e dos dados da tabela 4.1, referentes aos materiais utilizados no projétil, verifica-se que o projétil de cobre apresenta uma velocidade final e energia cinética significativamente superior quando comparado com os de ferro ou tântalo. O conjunto de propriedades apresentado pelo cobre, como a elevada ductilidade e densidade, assim como a forma que o material se comporta em condições de impacto, levam a que este material tenha a capacidade ideal para formar um EFP com elevada capacidade de penetração (*i.e.* elevada energia cinética). Na figura 4.3 estão representadas as formas finais dos projéteis de cobre, ferro e tântalo. Nesta figura pode verificar-se que o projétil de cobre apresenta uma geometria deformada mais fluída, ao contrário do tântalo que apresenta um grau de deformação global significativamente menor.

Da análise dos resultados do gráfico da figura 4.2 e dos dados da tabela 4.1, referentes aos materiais explosivos, verifica-se que a dinamite tem uma influência mais relevante na configuração do projétil resultante. A elevada velocidade dos produtos da explosão e a capacidade energética do material explosivo tornam a dinamite a escolha ideal, entre os

materiais estudados.

Consequentemente, face aos resultados obtidos e analisados sobre os vários materiais utilizados neste estudo é possível determinar que o conjunto cobre-dinamite é o ideal, de acordo com os parâmetros considerados.

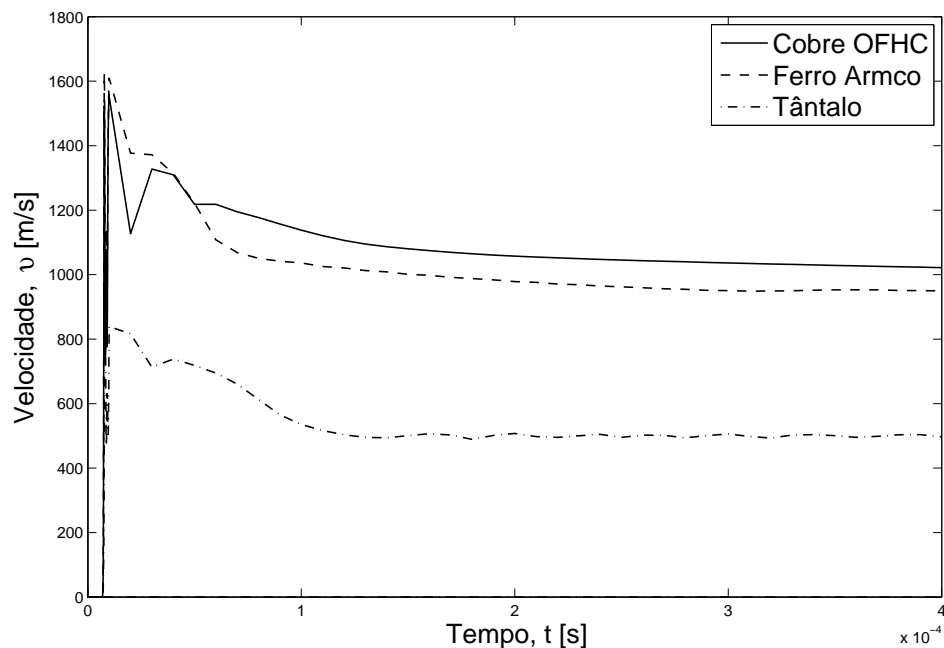


Figura 4.1: Evolução da velocidade dos projéteis para os diferentes materiais que o constituem.

Tabela 4.1: Resultados obtidos para os diferentes materiais estudados.

Modelo	Massa inicial do projétil [kg]	Velocidade final obtida [m/s]	Energia cinética [kJ]
MP-T	0,1667	496,8	20,57
MP-F	0,0788	949,5	35,52
MP-C/ME-D	0,0892	1021,8	46,57
ME-O	0,0892	887,5	35,13
ME-C	0,0892	730,1	23,77

#### 4.1.2 Para as diferentes espessuras estudadas

O estudo do comportamento do EFP em função da espessura do projétil, para as condições de análise consideradas, permite a maximização da energia cinética através da otimização da massa e da velocidade do projétil, resultando numa melhor capacidade de

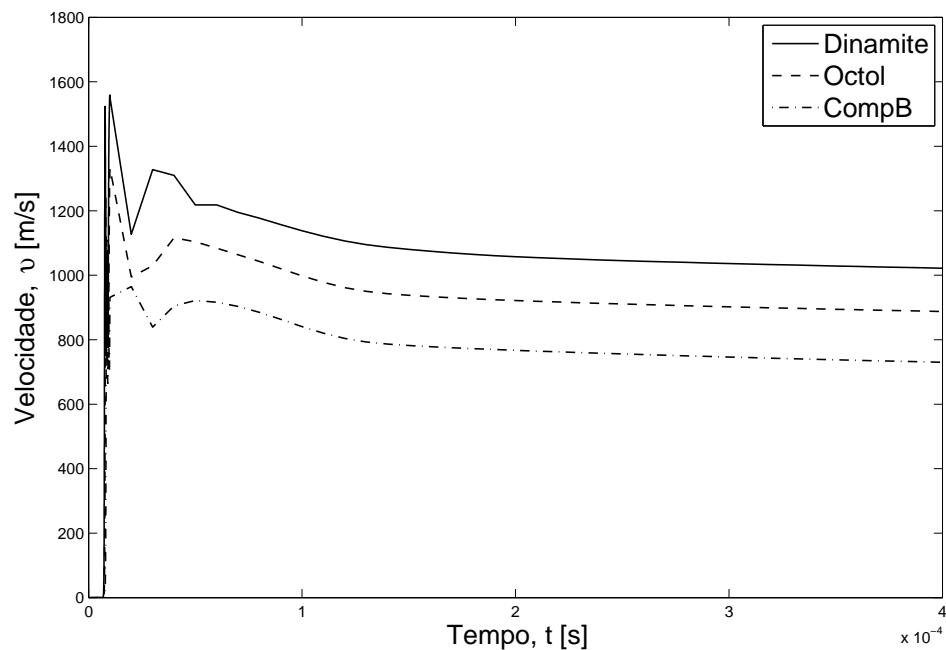


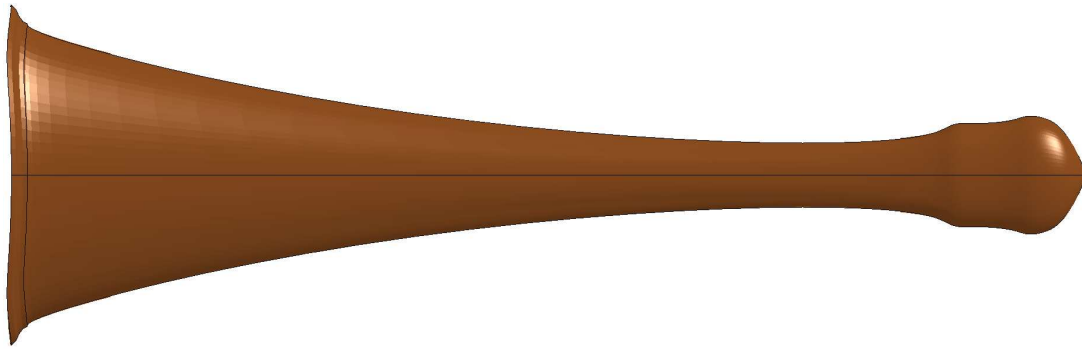
Figura 4.2: Evolução da velocidade dos projéteis (cobre) para os diferentes materiais explosivos em estudo.

penetração.

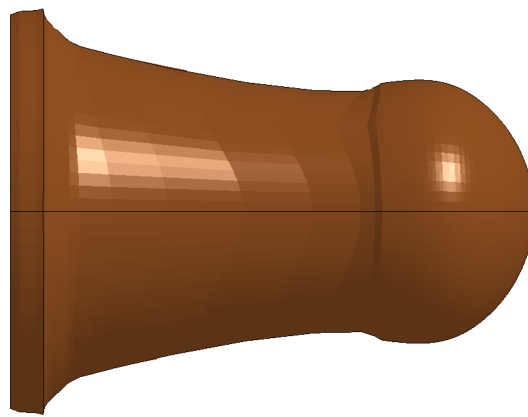
Os resultados da variação da velocidade em função do tempo obtidos para os diferentes modelos deste estudo estão representados nos gráficos das figuras 4.4 e 4.5. Verifica-se em ambos os gráficos um comportamento similar ao anteriormente descrito, com um valor máximo de velocidade a ocorrer nos instantes iniciais, seguido de uma estabilização até aproximadamente  $t = 400 \mu\text{s}$ . Ao analisar o gráfico da figura 4.4, observa-se o aumento da velocidade com a diminuição da espessura inicial do disco. Esta relação entre a espessura inicial e a velocidade não apresenta um comportamento linear. Neste contexto foi desenvolvida uma equação analítica com base na aproximação de potência dos dados obtidos que permita obter a velocidade final de acordo com a espessura inicial do disco para os parâmetros numéricos utilizados. A aproximação de potência foi escolhida utilizando o critério do menor erro quadrático. A equação analítica desenvolvida tem a seguinte forma genérica:

$$v_e = k_1 e^{-\alpha}. \quad (4.1)$$

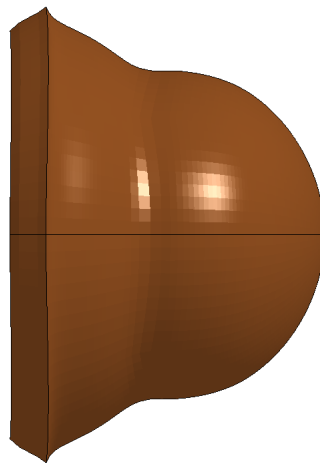
Os parâmetros  $k_1$  e  $\alpha$  são constantes do conjunto de materiais utilizados e tomam os valores estabelecidos na tabela 4.2 para os materiais que constituem o modelo utilizado. O valor da espessura (constante) é representado por  $e$  e a velocidade resultante por  $v$ . Através desta equação é possível determinar analiticamente a espessura necessária consoante o tipo de alvo e a velocidade pretendida, dentro dos parâmetros geométricos e materiais utilizados. A aproximação obtida pela equação 4.1 e os pontos utilizados na sua definição estão representados no gráfico da figura 4.6.



(a) Projétil de cobre.



(b) Projétil de ferro.



(c) Projétil de tântalo.

Figura 4.3: Configuração dos projéteis no instante  $t = 400 \mu s$ .

Tabela 4.2: Parâmetros constantes dos materiais para a equação 4.1.

$k_1$	$\alpha$
4172	1.049

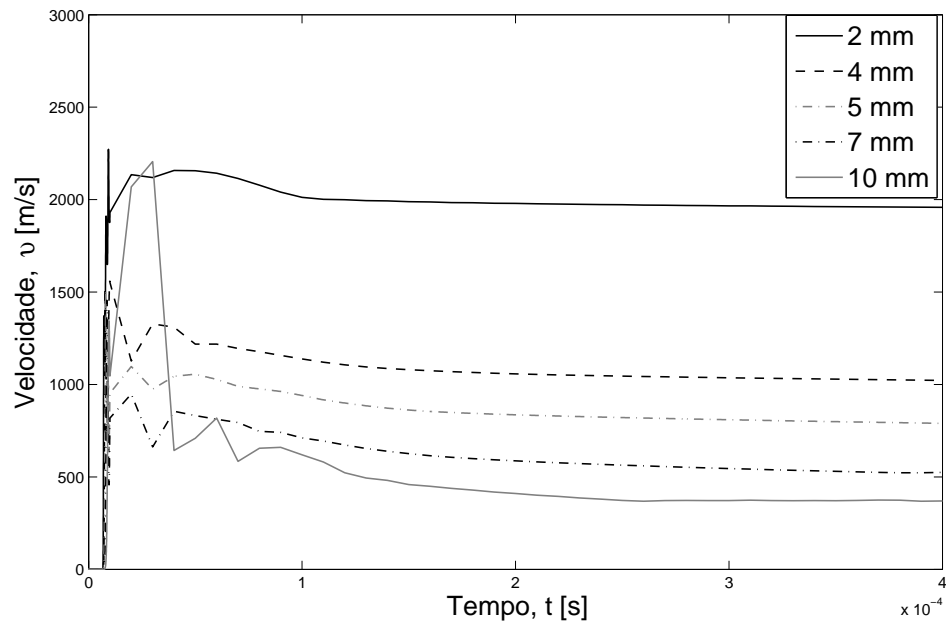


Figura 4.4: Evolução da velocidade dos projéteis (cobre) com espessura constante.

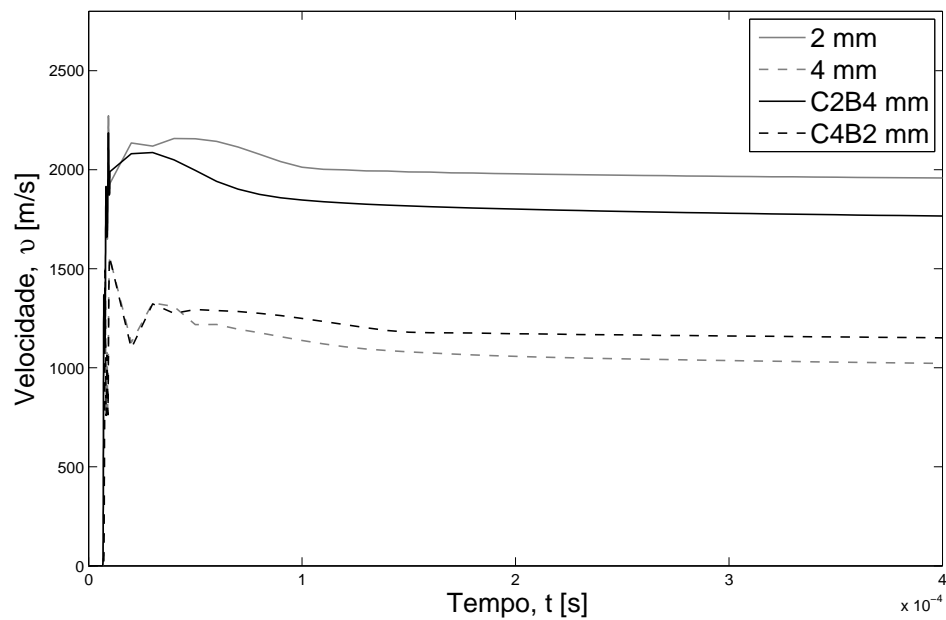


Figura 4.5: Evolução da velocidade dos projéteis (cobre) com espessura variável, comparativamente aos de espessura constante equivalente.

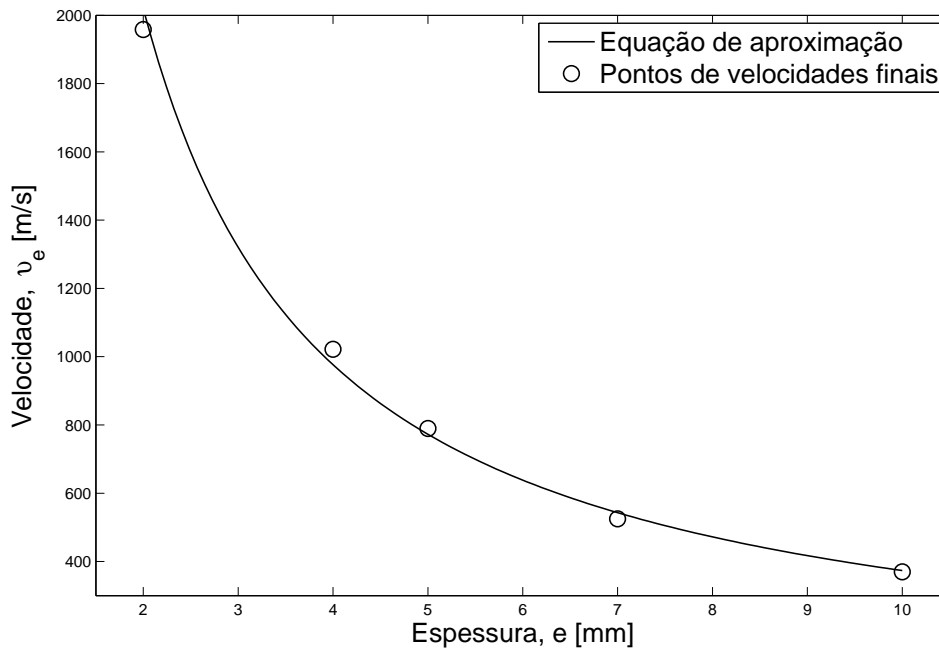


Figura 4.6: Aproximação da velocidade final em função da espessura do projétil.

Conforme referido anteriormente, a zona central do disco é sujeita ao impacto dos produtos da explosão antes da periferia do disco. É esta energia transferida para o disco que lhe confere a aceleração e deformação necessárias para formar o projétil. Nos modelos com espessura variável foi possível verificar a importância e a influência da espessura no centro do disco. Ao comparar os dois modelos de espessura variável verifica-se existir uma clara vantagem para projéteis obtidos a partir de discos com espessura mais reduzida no centro do disco, pois permite obter velocidades muito superiores para massas semelhantes, conforme se pode verificar pelos resultados apresentados na tabela 4.3. Ao comparar os modelos de espessura variável com os modelos equivalentes de espessura constante, de 2 e 4 mm, pode concluir-se que existe uma relação entre a espessura do centro do disco e a velocidade resultante. Ao analisar os resultados destes modelos, representados no gráfico da figura 4.5, verifica-se que pequenas alterações no volume dos bordos dos projéteis (discos) permitem otimizar a sua energia cinética.

### 4.1.3 Para os diferentes parâmetros de detonação estudados

O estudo do comportamento do *Explosively Formed Projectile* (EFP) quando produzido recorrendo a diferentes números de detonadores e distâncias radiais permite uma melhor compreensão das ondas de choque desenvolvidas e de como estas influenciam o seu processo de formação. Os resultados da variação da velocidade em função do tempo para os diferentes parâmetros de detonação estudados estão representados nos gráficos das figuras 4.7 a 4.9. Ao analisar estes resultados, verifica-se um aumento da velocidade final do projétil com o aumento do número de detonadores, assim como com o aumento da



Tabela 4.3: Resultados obtidos para as diferentes espessuras estudadas.

Modelo	Massa [kg]	Velocidade final [m/s]	Energia cinética [kJ]
EP-C-02	0,0446	1958,1	85,50
EP-C-04	0,0892	1021,8	46,57
EP-C-05	0,1115	789,8	34,78
EP-C-07	0,1561	524,9	21,50
EP-C-10	0,2231	369,9	15,26
EP-V-B2	0,0661	1151,3	43,81
EP-V-B4	0,0655	1766,0	102,14

distância dos detonadores ao centro do explosivo. No gráfico da figura 4.7 pode observar-se uma particularidade entre as curvas de 3 e 4 pontos de detonação, tendo o primeiro resultado numa velocidade final superior ao segundo. No gráfico da figura 4.8, que corresponde a uma distância de 15 mm do centro, deixa de se verificar esta situação. Ao analisar os resultados da velocidade lateral para o caso da variação da posição de um único ponto de detonação, representado no gráfico da figura 4.10, verifica-se um aumento da velocidade lateral do projétil com a proximidade do ponto de detonação ao bordo do explosivo. Observa-se também que, para uma distância de 15 mm do centro do explosivo, o projétil apresenta-se mais instável no voo devido às oscilações da velocidade lateral. Em termos vetoriais, o aumento da componente lateral da velocidade leva à diminuição da componente no sentido do disparo e, conseqüentemente, a uma diminuição da energia cinética e precisão do projétil.

Com o aumento do número de detonadores, assim como com o aumento da distância dos mesmos ao centro do explosivo, verifica-se também um crescente desenvolvimento de aletas na forma final do projétil. Segundo Carleone [5], o desenvolvimento de aletas confere ao projétil uma maior estabilidade no voo, permitindo desta forma atingir alvos a uma maior distância e com maior precisão. Nas figuras 4.14 e 4.15 estão representadas as vistas de topo das formas finais dos projéteis obtidos no estudo dos parâmetros de detonação.

Com base nos resultados obtidos, e de forma semelhante ao estudo do efeito da variação da espessura do projétil, propõe-se uma equação de aproximação (relação de potência) que determina a velocidade final do projétil em função do número de detonadores, assim como da distância destes ao centro da base do explosivo dentro dos parâmetros estudados. A equação proposta tem a seguinte forma genérica:

$$v_d = k_2 n^\gamma. \quad (4.2)$$

As constantes  $k_2$  e  $\gamma$  têm em conta um conjunto de parâmetros como os materiais e geometrias utilizadas, variando de acordo com a distância dos detonadores ao centro da base do explosivo.  $v_d$  e  $n$  correspondem à velocidade final e ao número de detonadores, respetivamente. Na tabela 4.4 encontram-se definidos os parâmetros da equação 4.2 de acordo com os resultados obtidos das simulações numéricas. A aproximação obtida pela equação 4.2 e os pontos utilizados na sua definição estão representados no gráfico da figura 4.11.

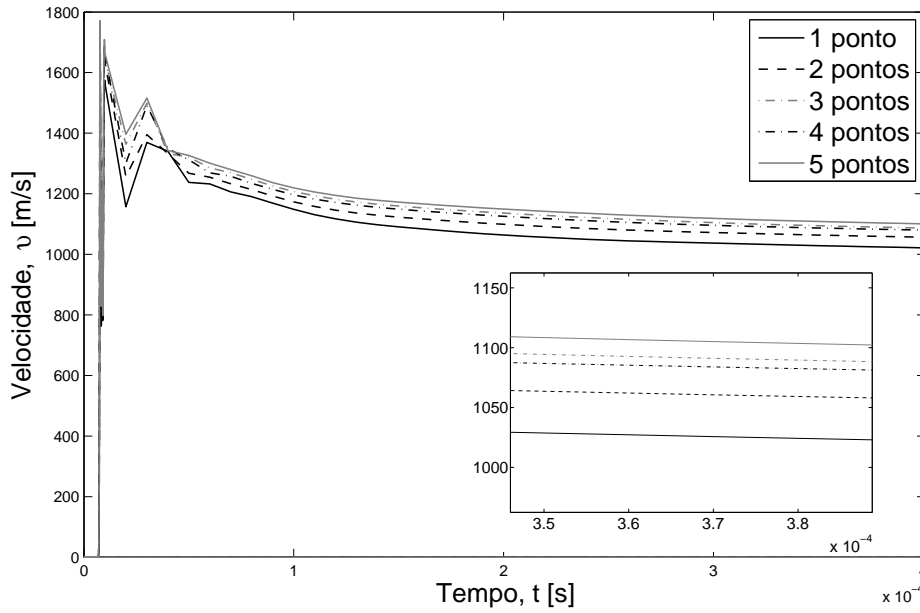


Figura 4.7: Evolução da velocidade do projétil para múltiplos pontos de detonação, distanciados 5 mm ao centro do EFP.

Tabela 4.4: Constantes da equação 4.2.

Distância [mm]	$k_2$	$\gamma$
5	1023,80	0,0448
15	1007,30	0,1536
25	959,67	0,2428

Ao analisar as constantes da equação 4.2, representadas na tabela 4.4, observa-se a diminuição do valor de  $k_2$  e o aumento do valor do  $\gamma$  com o aumento da distância radial (ao centro) dos detonadores. Nas figuras 4.12 e 4.13 estão representados os comportamentos lineares estabelecidos para os coeficientes. Estas aproximações lineares representadas tomam a seguinte forma:

$$k_2(d) = 1045 - 3.21d \quad (4.3)$$

e

$$\gamma(d) = (9.9d - 1.43) \times 10^{-3}. \quad (4.4)$$

As equações de aproximação linear estabelecidas para ambos os coeficientes vêm generalizar a distância radial dos detonadores da equação 4.2, que se encontra limitada às distâncias de 5, 15 e 25 mm. Desta forma é feita uma reformulação da equação 4.2 da

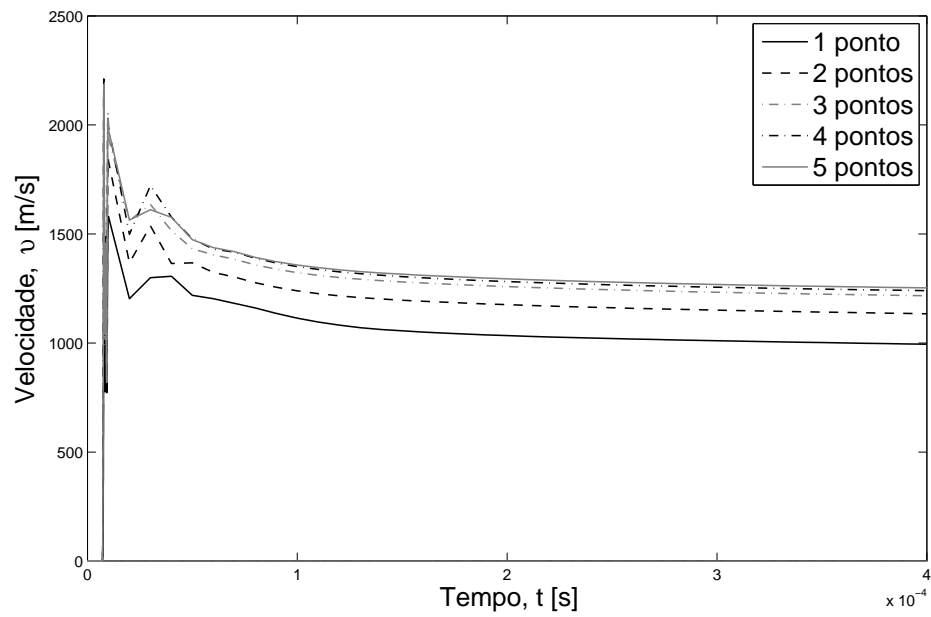


Figura 4.8: Evolução da velocidade do projétil para múltiplos pontos de detonação, distanciados 15 mm ao centro do EFP.

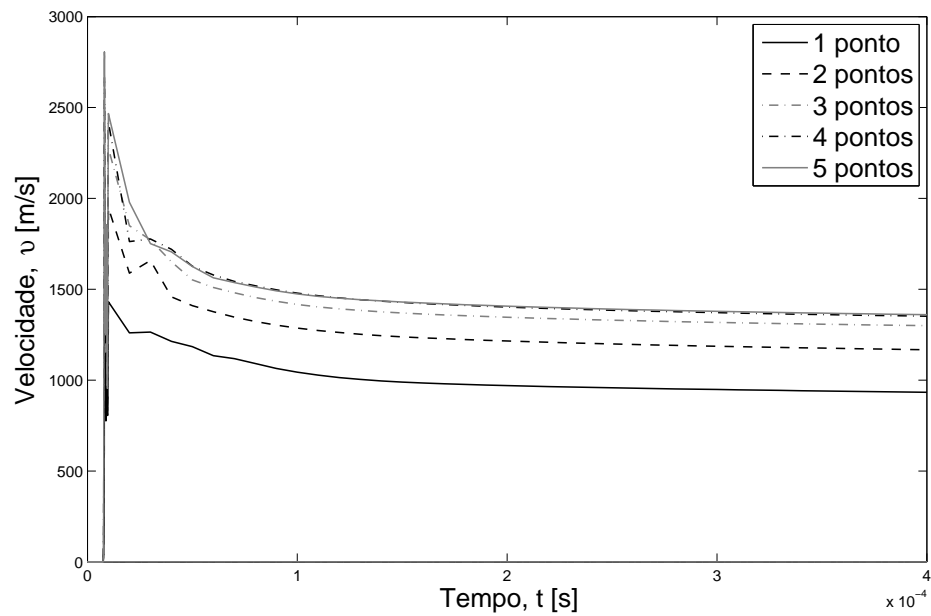


Figura 4.9: Evolução da velocidade do projétil para múltiplos pontos de detonação, distanciados 25 mm ao centro do EFP.

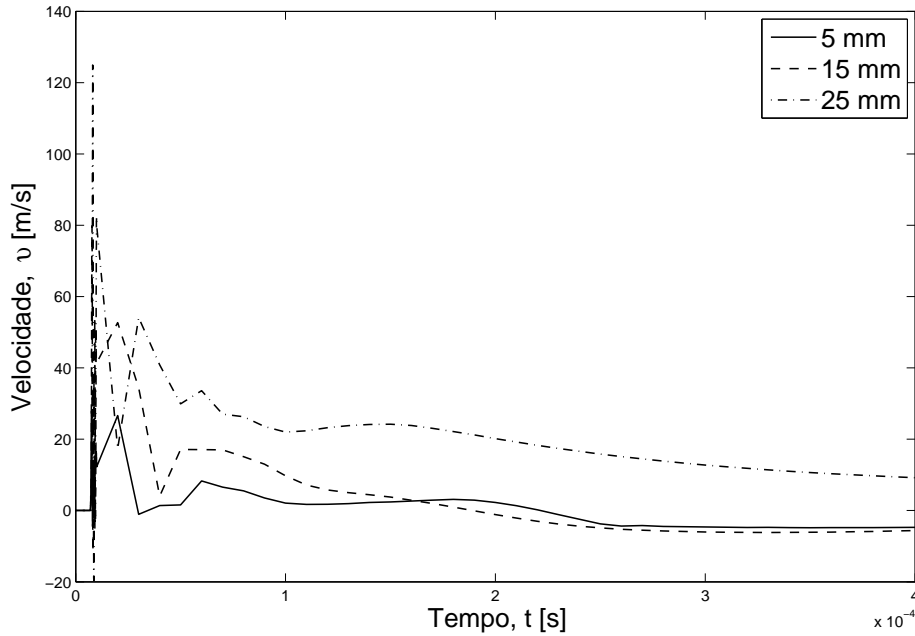


Figura 4.10: Evolução da velocidade lateral do projétil para um único ponto de detonação, para diferentes distâncias ao centro do EFP.

seguinte forma:

$$v_d = k_2(d)n^{\gamma(d)}. \quad (4.5)$$

Esta nova equação permite prever, de uma forma aproximada, a velocidade resultante do projétil em função do número de detonadores e da distância radial dos mesmos.

Tendo em vista a generalização das equações 4.1 e 4.2, definiu-se uma equação que contabiliza os parâmetros de espessura do projétil, número de pontos de detonação e distância dos mesmos ao centro do explosivo, definidos nas equações anteriores. Para isso foi necessário a introdução do parâmetro  $v_r$ , que permite contabilizar apenas a contribuição dos múltiplos pontos de detonação, caso estes existam. Assim, a equação toma a seguinte forma:

$$v = v_e + (v_d - v_r). \quad (4.6)$$

A parcela  $(v_d - v_r)$  contabiliza apenas o contributo do tipo de detonação, assumindo valor zero para um ponto de detonação central, negativo para a descentralização de um único ponto de detonação e positivo para múltiplos pontos. Ao substituir os parâmetros  $v_e$  e  $v_d$  pelas equações 4.1 e 4.2, respetivamente, obtém-se

$$v = k_1 e^{-\alpha} + \left[ k_2(d)n^{\gamma(d)} - v_r \right], \quad (4.7)$$

em que  $v_r$  toma o valor de referência 1024,2 m/s, de forma a garantir o comportamento global descrito.

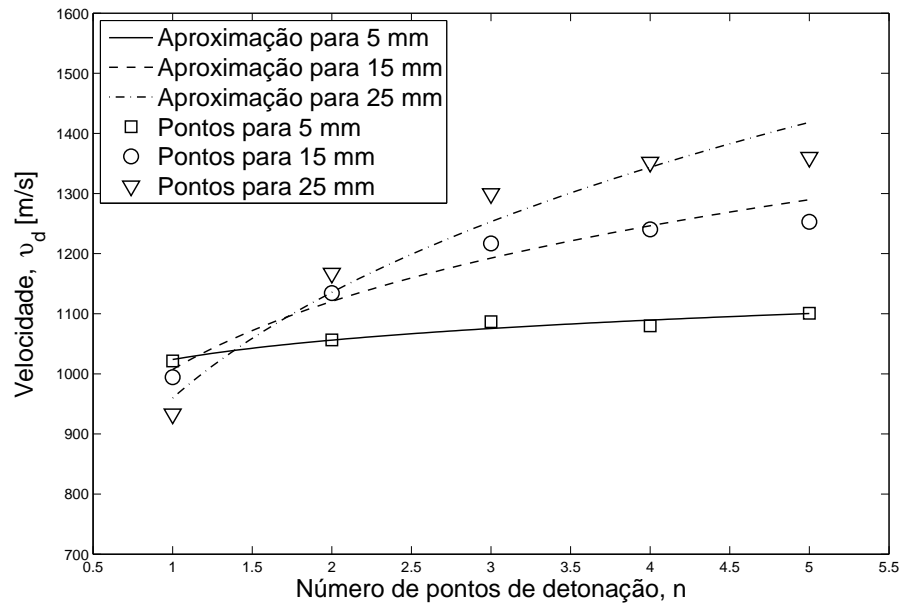


Figura 4.11: Representação do comportamento da equação 4.2 e dos pontos utilizados na sua definição.

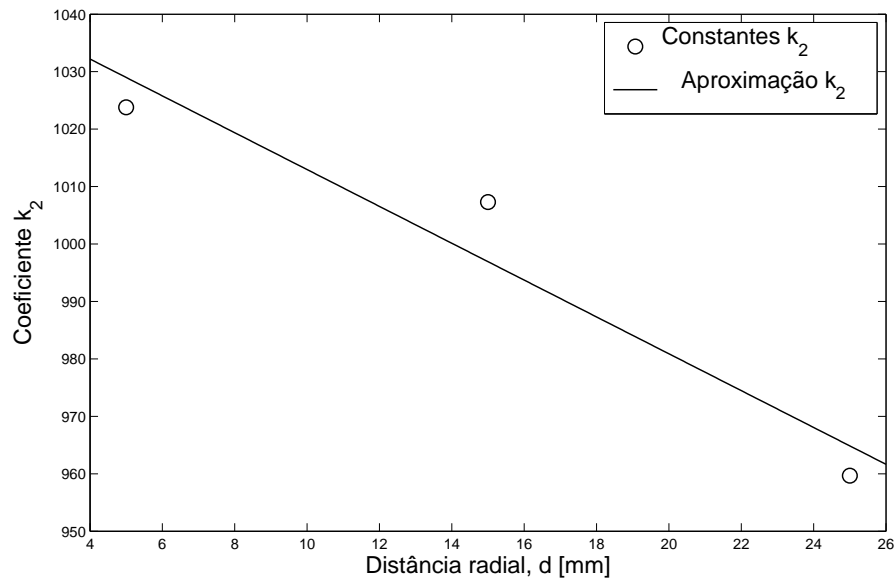


Figura 4.12: Evolução da constante  $k_2$  da equação 4.2 com a distância radial dos detonadores.

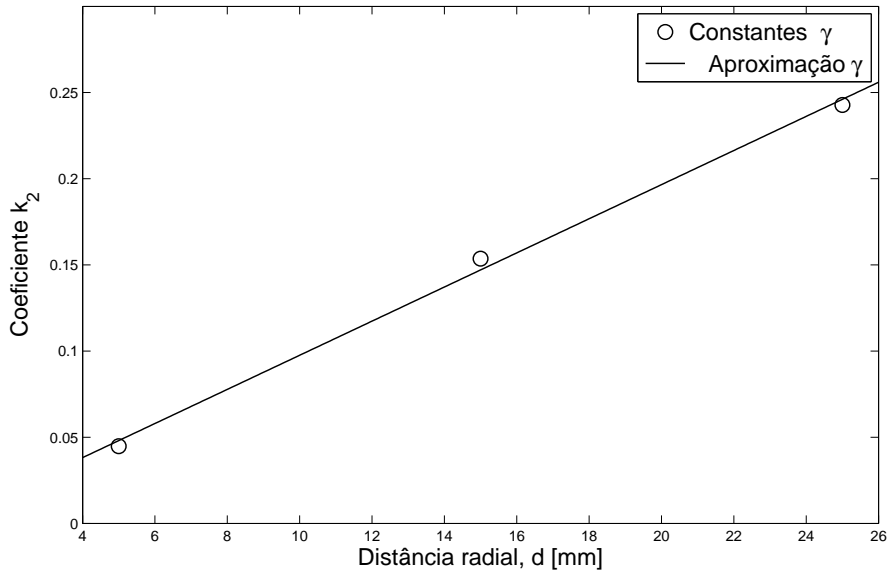


Figura 4.13: Evolução da constante  $\gamma$  da equação 4.2 com a distância radial dos detonadores.

## 4.2 Configuração final dos projéteis obtidos

A configuração geométrica e dimensão final do projétil influencia o seu comportamento quer durante o voo quer no impacto. Nesta secção são analisados e discutidos os resultados obtidos relativamente aos parâmetros dimensionais dos projéteis para os diferentes casos de estudo. Os resultados obtidos são comparados entre os diferentes casos de uma forma adimensional através dos coeficientes  $e^*$  e  $\beta$ , definidos da seguinte forma:

$$e^* = \frac{P}{e_i} \quad (4.8)$$

e

$$\beta = \frac{L}{D}. \quad (4.9)$$

$P$ ,  $L$  e  $D$  correspondem aos parâmetros dimensionais representados na figura 4.16 e o parâmetro  $e_i$  corresponde à espessura inicial do disco. Estas relações representadas permitem analisar de uma forma genérica a distribuição de massa do projétil tendo como objetivo maximizar a concentração na zona correspondente à ponta do projétil. Como já foi mencionado na secção 4.1, o projétil de cobre apresenta uma forma geométrica final mais fluída do que o de ferro ou tântalo. Mesmo não sendo uma área de estudo neste trabalho, a aerodinâmica de um EFP é beneficiada por este tipo de geometria, assim como pela formação de aletas [5].

Na tabela 4.5 estão representados os resultados dimensionais obtidos para os diferentes materiais em estudo. Neste contexto, o cobre é o único dos materiais utilizados no projétil com um valor de  $e^*$  superior a 1, ou seja, é o único material que apresenta um aumento da espessura na ponta do projétil. Este apresenta também um valor de

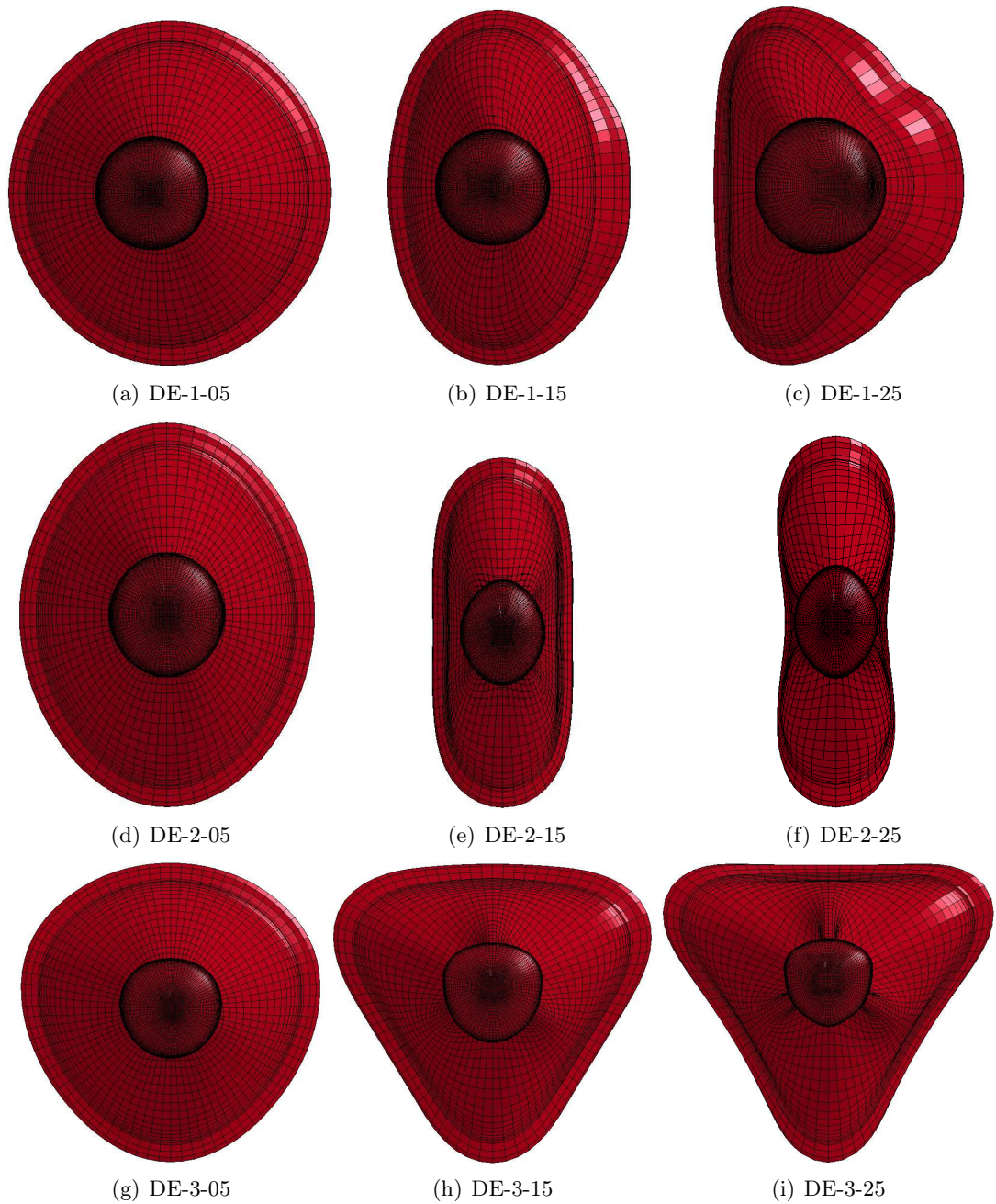


Figura 4.14: Vista de topo dos projéteis obtidos com 1, 2 e 3 pontos de detonação.

$\beta$  superior aos restantes materiais devido ao aumento significativo do comprimento  $L$  e uma pequena diminuição do calibre,  $D$ .

Para o caso de estudo dos materiais explosivos verifica-se, através da análise dos resultados representados na tabela 4.5, que todos os projéteis de cobre resultantes da detonação dos diferentes materiais explosivos apresentam um coeficiente  $e^*$  superior a 1, correspondendo o valor máximo à dinamite. Este apresenta também um fator  $\beta$  superior aos restantes materiais apesar de estes valores serem relativamente próximos. Mais uma



Figura 4.15: Vista de topo dos projéteis obtidos com 4 e 5 pontos de detonação.

vez, é possível concluir que, quer num contexto dimensional quer em termos de energia cinética, o conjunto dos materiais constituído pelo cobre e dinamite apresentam as melhores características entre os materiais estudados.

Tabela 4.5: Resultados dos parâmetros geométricos do projétil referentes ao estudo dos materiais.

Modelo	$L$ [mm]	$D$ [mm]	$P$ [mm]	$e^*$	$\beta$
MP-F	69,74	35,22	3,56	0,89	1,98
MP-T	33,30	34,86	3,63	0,91	0,96
MP-C/ME-D	233,35	25,84	8,84	2,21	9,03
ME-O	187,38	28,12	6,61	1,65	6,66
ME-C	127,82	31,20	5,23	1,31	4,10

Ao analisar os resultados obtidos para o estudo da influência da espessura do projétil é possível observar, para o caso de espessura constante, um aumento do valor de  $e^*$  à medida que aumenta a espessura inicial do disco, ao contrário do  $\beta$  que diminui de forma acentuada. A evolução de ambos os coeficientes está representada no gráfico da figura 4.17. Constatou-se que o projétil com 2 mm de espessura apresenta um compri-



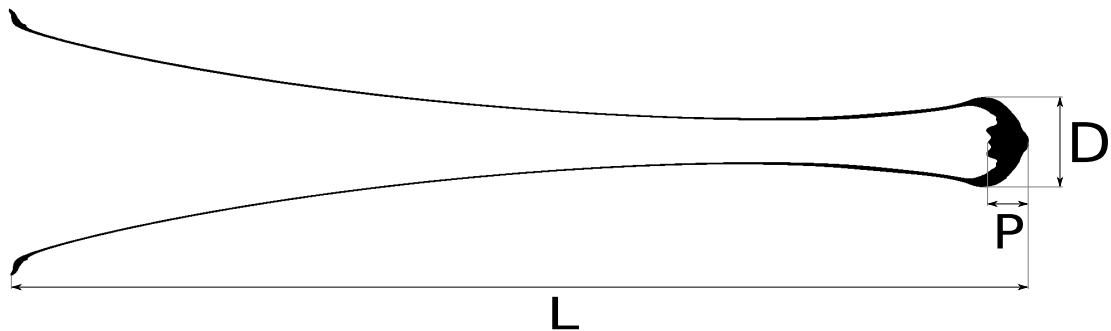


Figura 4.16: Representação de um EFP em corte e as variáveis utilizadas na avaliação geométrica dos projéteis.

mento  $L$  eventualmente excessivo. Tal se deve às limitações do modelo numérico quanto ao módulo de dano do modelo constitutivo de Johnson-Cook que não é considerado nas análises, desta forma não é possível garantir que o projétil não fratura na zona em que se verifica uma espessura mínima. Estabeleceu-se que o valor do coeficiente  $\beta$  não deve ultrapassar o obtido para o projétil com 2 mm de espessura. Ao comparar os resultados entre a configuração geométrica e a energia cinética, é possível concluir que o coeficiente  $\beta$  apresenta um intervalo ótimo,  $9 < \beta < 27$ , correspondendo aos valores obtidos para as análises de 4 e 2 mm, respetivamente. Para um disco (*liner*) com espessura variável pode considerar-se a exceção ao intervalo ótimo de  $\beta$ , apenas para valores inferiores ao  $\beta$  mínimo em que a energia cinética do projétil seja superior à energia cinética do projétil correspondente ao valor mínimo de  $\beta$ . O mesmo se pode verificar para o modelo de espessura variável, EP-V-B2, que apresenta um baixo valor de  $\beta$  mas uma energia cinética elevada. Já o modelo EP-V-B4 apresenta um valor de  $\beta$  demasiado elevado, devido ao elevado comprimento do projétil e ao seu reduzido calibre. Através do intervalo definido para  $\beta$  e da maximização do coeficiente  $e^*$  pretende-se definir um intervalo ótimo de relações geométricas de forma a maximizar a capacidade de penetração do projétil resultante. Neste contexto, e tendo em consideração as conclusões retiradas na análise da energia cinética dos casos em estudo, é possível concluir que o disco deve apresentar uma espessura inicial entre 4 e 7% do valor do diâmetro.

Conforme foi referido anteriormente, os parâmetros de detonação de um EFP têm uma grande influência significativa na configuração geométrica apresentada pelo projétil assim como na formação (ou não) de aletas. Ao analisar os dados representados na tabela 4.7 e no gráfico da figura 4.18 verifica-se um aumento gradual de ambos os coeficientes,  $e^*$  e  $\beta$ , com o aumento da distância dos detonadores ao centro do explosivo, à exceção do modelo com um único ponto de detonação. Verifica-se também que o modelo DE-4-25 apresenta os valores máximos para ambos os coeficientes. Porém, o valor de  $\beta$  apresenta-se fora do intervalo ótimo estabelecido anteriormente, devido ao reduzido calibre do projétil. O modelo DE-5-25 é o que apresenta a melhor relação dimensional de entre os modelos estudados, estando entre os intervalos considerados, e influenciando a formação de aletas no projétil resultante, podendo-se concluir que este modelo apresenta o melhor conjunto de parâmetros de detonação.

Tabela 4.6: Resultados obtidos para os parâmetros geométricos do projétil referentes ao estudo da influência da espessura do projétil.

<b>Modelo</b>	$L$ [mm]	$D$ [mm]	$P$ [mm]	$e^*$	$\beta$
EP-C-02	555,75	20,12	4,05	2,03	27,62
EP-C-04	233,35	25,84	8,84	2,21	9,03
EP-C-05	165,80	27,89	14,22	2,84	5,95
EP-C-07	90,86	29,32	19,28	2,74	3,10
EP-C-10	71,75	49,08	39,74	3,97	1,46
EP-V-B2	216,16	33,64	9,71	2,43	6,43
EP-V-B4	534,64	14,86	3,96	1,98	35,98

Tabela 4.7: Parâmetros geométricos do projétil, referentes ao estudo da influência da espessura do projétil.

<b>Modelo</b>	$L$ [mm]	$D$ [mm]	$P$ [mm]	$e^*$	$\beta$
DE-1-05	239,25	25,00	9,21	2,30	9,57
DE-1-15	236,32	24,89	9,39	2,35	9,49
DE-1-25	220,12	24,31	9,01	2,25	9,05
DE-2-05	253,12	23,97	9,49	2,37	10,56
DE-2-15	291,20	19,84	11,19	2,80	14,68
DE-2-25	315,87	17,35	12,23	3,06	18,21
DE-3-05	264,59	24,15	10,29	2,57	10,96
DE-3-15	321,86	20,26	11,93	2,98	15,89
DE-3-25	367,13	16,78	13,90	3,48	21,89
DE-4-05	262,41	24,06	10,23	2,56	10,90
DE-4-15	333,21	18,47	14,20	3,55	18,04
DE-4-25	391,94	14,08	16,18	4,05	27,83
DE-5-05	269,40	24,02	10,56	2,64	11,22
DE-5-15	341,88	19,34	13,17	3,29	17,68
DE-5-25	390,27	16,48	13,59	3,40	23,69

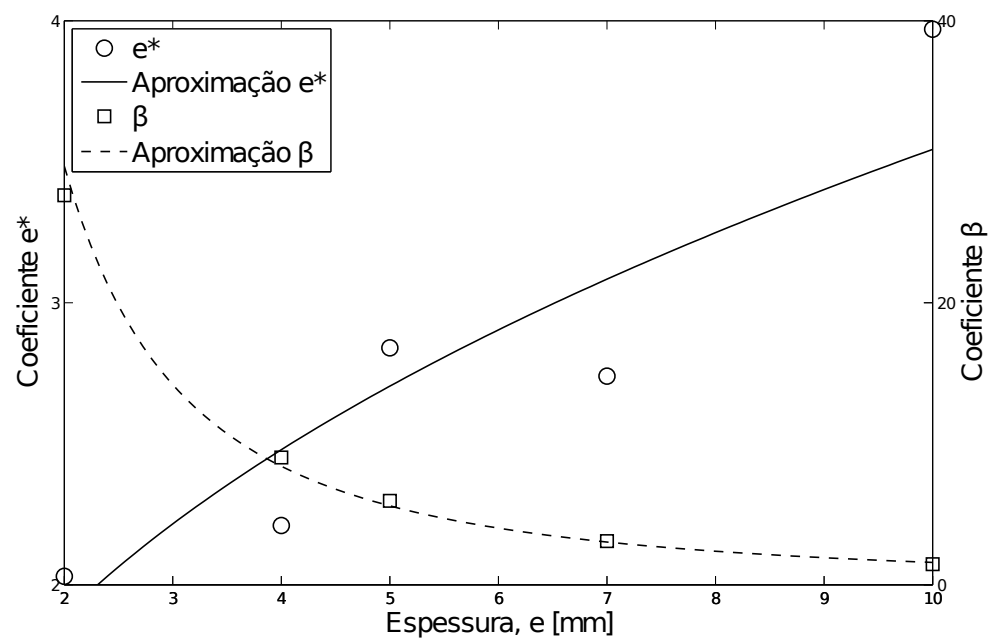


Figura 4.17: Evolução dos coeficientes  $e^*$  e  $\beta$  em função da espessura (constante) do disco.

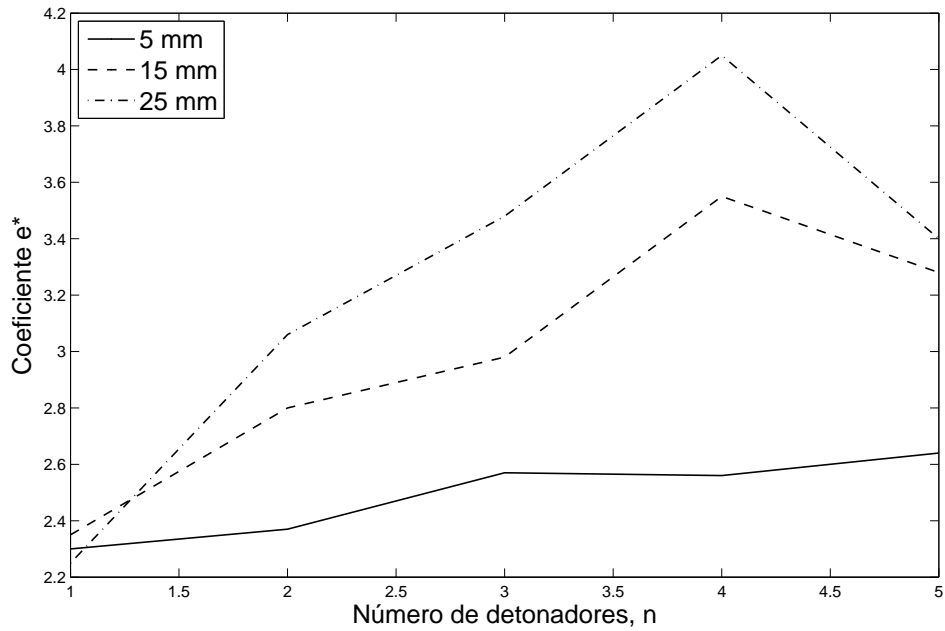
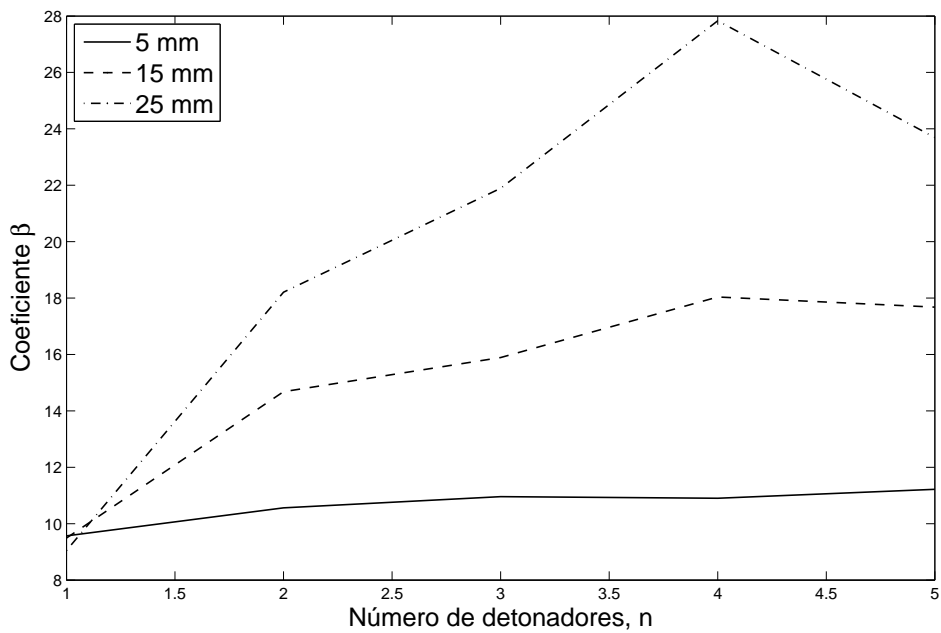
(a) Coeficiente  $e^*$ .(b) Coeficiente  $\beta$ .

Figura 4.18: Representação da evolução dos coeficientes  $e^*$  e  $\beta$  em função do número de detonadores.

Parte III

Considerações Finais



## Capítulo 5

# Considerações finais

Neste capítulo são apresentadas as conclusões gerais e são discutidos os resultados obtidos na realização deste trabalho. São ainda apresentados alguns conceitos para trabalhos futuros no âmbito deste trabalho

---

### 5.1 Conclusões

O objetivo principal do trabalho que aqui se apresenta consistiu em avaliar o efeito da configuração de um *Explosively Formed Projectile* (EFP) no processo de formação do projétil e, conseqüentemente, na sua capacidade balística.

A primeira fase desta dissertação focou-se na avaliação da influência dos materiais utilizados nos diferentes componentes que constituem o EFP, nomeadamente o projétil e o explosivo. Neste âmbito, estudou-se o comportamento do cobre OFHC, do ferro puro ARMCO<sup>®</sup>, do tântalo como projéteis, assim como o comportamento da Dinamite, do Octol e do Comp B como materiais explosivos através do modelo simplificado do EFP, desenvolvido em LS-Dyna<sup>™</sup>.

Os resultados obtidos nas simulações numéricas realizadas mostram que, em termos de velocidade final e conseqüente energia cinética dos materiais utilizados como projéteis, o cobre mostrou ser o mais vantajoso, registando uma velocidade final máxima quando comparada com as obtidas pelo tântalo e pelo ferro. Este último apresenta uma pequena diferença em termos de velocidade final. Porém, devido à diferença de densidade dos materiais, representa uma diferença significativa em termos de energia cinética. Já no caso dos materiais explosivos utilizados, os resultados das simulações numéricas realizadas mostram que, em termos de energia cinética, é a dinamite o material explosivo mais vantajoso, produzindo o projétil com a energia cinética mais elevada.

Em termos de capacidade de penetração, é importante, além da quantidade de energia cinética, a configuração final do projétil resultante. Em situações de impacto é essencial a concentração da massa do projétil num ponto único, levando à concentração da energia transmitida ao alvo e, conseqüentemente, ao aumento da capacidade de penetração. Neste âmbito, determinaram-se os coeficientes  $\beta$  e  $e^*$  que correspondem à relação entre calibre/comprimento e à relação de aumento da espessura central do projétil, respetivamente. Neste contexto, observou-se que o conjunto cobre-dinamite apresenta a melhor relação entre os dois coeficientes com  $e^*$  mais elevado de entre os materiais considerados,

assim como o  $\beta$ .

A segunda fase desta dissertação consistiu na avaliação de parâmetros geométricos do EFP, nomeadamente o estudo do efeito da variação da espessura do disco (*liner*) no projétil resultante. Neste âmbito, estudou-se o comportamento do EFP para diferentes espessuras do disco, constantes e variáveis segundo o raio, através do modelo simplificado do EFP, desenvolvido com o LS-Dyna™.

Os resultados obtidos nas simulações numéricas realizadas mostram que, com o aumento da massa do projétil e para uma mesma relação  $L/D$  do explosivo, a velocidade final do projétil diminui à medida que a sua massa aumenta. Em termos de velocidade final e, conseqüentemente, energia cinética, observou-se que a espessura ótima de um EFP deve estar compreendida entre os resultados obtidos para os ensaios de 2 e 4 mm, isto é, de uma forma generalizada, a espessura deve estar contida entre 4 e 7 % do diâmetro inicial do disco. Para o caso do disco com espessura variável ao longo do raio, os resultados obtidos mostram que existe uma relação entre a espessura central do disco e a velocidade final obtida, verificando-se ser vantajoso ter espessuras centrais mais reduzidas, pois resultam em velocidades finais superiores para uma massa semelhante e, conseqüentemente, maior quantidade de energia cinética. No contexto da avaliação da energia cinética do projétil, foi formulada uma equação analítica que permite prever a velocidade final do projétil em função da espessura constante do disco, segundo os parâmetros e materiais utilizados.

Em termos de configuração final do projétil, determinou-se um intervalo ótimo para o valor de  $\beta$ ,  $9 < \beta < 27$ , através da relação entre o diâmetro do disco e a espessura inicial (4 a 7%) e do declive máximo observado no gráfico da evolução do parâmetro  $\beta$ . Para o caso dos discos com espessura variável ao longo do raio, observou-se que o projétil com espessura central superior apresenta vantagem sobre o projétil com espessura central reduzida. Isto deve-se ao elevado calibre e aumento da espessura central do primeiro, ao contrário do calibre reduzido, elevado comprimento e aumento mínimo da espessura central observado no segundo caso.

A terceira parte desta dissertação incidiu-se na avaliação do efeito dos parâmetros de detonação, nomeadamente o número de detonadores e a distância destes ao centro do explosivo. Neste sentido, realizaram-se simulações numéricas do processo de formação do EFP com múltiplos detonadores e fez-se variar a distância ao centro do explosivo utilizando ambos os modelos, completo e simplificado, desenvolvidos através do LS-Dyna™. De facto, observaram-se melhorias significativas nos resultados obtidos nas simulações numéricas à medida que se aumentou o número de detonadores. O mesmo aconteceu quando se aumentou a sua distância radial, com a exceção do caso de detonação com um único ponto. Observou-se também um crescente desenvolvimento de aletas assim como um desenvolvimento das configurações obtidas de acordo com o número de detonadores e do seu posicionamento, com o aumento da distância radial. Em termos de energia cinética, o EFP com cinco pontos de detonação a 25 mm de distância radial revelou o mais vantajoso apresentando a máxima velocidade final para a mesma massa de projétil.

No contexto da avaliação da energia cinética e, da mesma forma que na fase anterior, foi desenvolvido um modelo analítico que permite prever a velocidade final do projétil em função do número de detonadores e da distância radial dos mesmos para a configuração utilizada. Este modelo analítico apresenta algumas limitações, sendo a mais relevante a consideração de uma detonação síncrona, isto é, considera-se que a detonação do explosivo ocorre no mesmo instante para todos os detonadores. Em termos de configuração



final do projétil, observou-se um crescente aumento dos coeficientes,  $\beta$  e  $e^*$ , com o aumento quer do número de detonadores quer da distância radial, verificando-se apenas uma exceção entre quatro e cinco pontos de detonação que, apesar de muito próximos, o primeiro modelo apresenta coeficientes superiores. Tendo em conta o reduzido calibre observado no modelo de quatro pontos de detonação e o valor  $\beta$  fora do intervalo ótimo estabelecido, considerou-se que o modelo com cinco pontos de detonação e 25 mm de distância radial é o mais vantajoso, em termos de energia cinética e da configuração final.

No contexto geral desta dissertação, foi formulado um modelo analítico final que contabiliza a espessura do disco assim como o número de detonadores e a distância radial segundo os materiais e configurações utilizadas. Este modelo permite prever a energia cinética resultante, podendo esta ser otimizada, em conjunto com o intervalo de espessura estabelecido (4 a 7% do diâmetro do disco), de acordo com o alvo. Da mesma forma que os modelos analíticos anteriores, também este apresenta as limitações da configuração, dos materiais e do sincronismo dos detonadores.

## 5.2 Trabalhos futuros

Neste trabalho foi estudado o efeito da configuração de um *Explosively Formed Projectile* (EFP) no processo de formação do projétil e na sua capacidade balística. Na realização deste trabalho foram estudadas três vertentes da configuração de um EFP (materiais, espessura do projétil e parâmetros de detonação), para além das considerações feitas a nível numérico tais como, por exemplo, o refinamento da malha, o tipo de elementos, os modelos constitutivos, entre outros, dos quais continuam vertentes por explorar. Neste contexto são apresentados e propostas algumas das possibilidades de trabalho futuro:

- Estudar o efeito de novos materiais e definir os novos parâmetros associados aos modelos analíticos;
- Estudar o efeito do ar na evolução da velocidade do projétil;
- Estudar o efeito de parâmetros geométricos tais como, por exemplo, a relação  $L/D$ , a curvatura do disco, diferentes formas geométricas, entre outros;
- Estudar o impacto de um EFP num alvo balístico.



# Lista de Tabelas

2.1	Propriedades dos materiais utilizados no modelo constitutivo de Johnson-Cook [28; 10; 8]. . . . .	25
2.2	Parâmetros da EOS de Gruneisen referentes as propriedades dos materiais utilizados [10; 8; 46; 45]. . . . .	25
2.3	Parâmetros do material *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN para os explosivos [8]. . . . .	29
2.4	Parâmetros EOS JWL referentes às propriedades dos explosivos em estudo [8]. . . . .	29
2.5	Caraterísticas dos ensaios numéricos realizados para otimização da malha.	31
2.6	Parâmetros estudados no processo de formação de um EFP e respectivas siglas. . . . .	36
3.1	Descrição dos modelos desenvolvidos para a análise do comportamento dos materiais no processo de formação de um EFP . . . . .	38
3.2	Modelos desenvolvidos para a análise do efeito da espessura do disco ( <i>liner</i> ). . . . .	40
3.3	Modelos desenvolvidos para a análise dos parâmetros de detonação. . . . .	41
4.1	Resultados obtidos para os diferentes materiais estudados. . . . .	44
4.2	Parâmetros constantes dos materiais para a equação 4.1. . . . .	46
4.3	Resultados obtidos para as diferentes espessuras estudadas. . . . .	49
4.4	Constantes da equação 4.2. . . . .	50
4.5	Resultados dos parâmetros geométricos do projétil referentes ao estudo dos materiais. . . . .	56
4.6	Resultados obtidos para os parâmetros geométricos do projétil referentes ao estudo da influência da espessura do projétil. . . . .	58
4.7	Parâmetros geométricos do projétil, referentes ao estudo da influência da espessura do projétil. . . . .	58



# Lista de Figuras

1.1	Valores estatísticos entre 2005 e 2010 de (a) número de ataques com IED e (b) baixas resultantes desses ataques [21]. . . . .	4
1.2	Representação esquemática das forças que atuam no projétil durante o voo [35]. . . . .	7
1.3	Esquema representativo dos componentes de um EFP. . . . .	9
1.4	Esquema representativo do processo de formação de um EFP (Laboratório de Pesquisa da Força Aérea (AFRL), <i>Global Security</i> , desenhado por Hulteng e Treible [36]). . . . .	9
2.1	Representação esquemática da metodologia de análise típica de um problema recorrendo ao método dos elementos finitos (MEF) [19]. . . . .	19
2.2	Exemplos de aplicação do cobre [37; 38]. . . . .	24
2.3	Exemplos da utilização do ferro ARMCO <sup>®</sup> [39]. . . . .	27
2.4	Representação de uma amostra e um exemplo de aplicação do tântalo [40; 41]. . . . .	27
2.5	Representação de uma molécula e de blocos de TNT [34]. . . . .	28
2.6	Representação do modelo utilizado por Jun Wu [10] e o modelo desenvolvido em LS-Dyna <sup>™</sup> . . . . .	30
2.7	Representação das malhas de elementos finitos testadas para o projétil. . . . .	33
2.8	Representação das malhas de elementos finitos testadas para o explosivo. . . . .	34
2.9	Representação das condições de fronteira atribuídas aos dois modelos. . . . .	35
2.10	Representação do contacto entre o projétil e o explosivo. . . . .	36
3.1	Representação dos modelos dos discos ( <i>liners</i> ) com espessura constante. . . . .	39
3.2	Representação dos modelos dos discos ( <i>liners</i> ) com espessura variável. . . . .	40
3.3	Representação dos esquemas de detonação definidos na tabela 3.3. . . . .	42
4.1	Evolução da velocidade dos projéteis para os diferentes materiais que o constituem. . . . .	44
4.2	Evolução da velocidade dos projéteis (cobre) para os diferentes materiais explosivos em estudo. . . . .	45
4.3	Configuração dos projéteis no instante $t = 400 \mu s$ . . . . .	46
4.4	Evolução da velocidade dos projéteis (cobre) com espessura constante. . . . .	47
4.5	Evolução da velocidade dos projéteis (cobre) com espessura variável, comparativamente aos de espessura constante equivalente. . . . .	47
4.6	Aproximação da velocidade final em função da espessura do projétil. . . . .	48
4.7	Evolução da velocidade do projétil para múltiplos pontos de detonação, distanciados 5 mm ao centro do EFP. . . . .	50

---

4.8	Evolução da velocidade do projétil para múltiplos pontos de detonação, distanciados 15 mm ao centro do EFP. . . . .	51
4.9	Evolução da velocidade do projétil para múltiplos pontos de detonação, distanciados 25 mm ao centro do EFP. . . . .	51
4.10	Evolução da velocidade lateral do projétil para um único ponto de detonação, para diferentes distâncias ao centro do EFP. . . . .	52
4.11	Representação do comportamento da equação 4.2 e dos pontos utilizados na sua definição. . . . .	53
4.12	Evolução da constante $k_2$ da equação 4.2 com a distância radial dos detonadores. . . . .	53
4.13	Evolução da constante $\gamma$ da equação 4.2 com a distância radial dos detonadores. . . . .	54
4.14	Vista de topo dos projéteis obtidos com 1, 2 e 3 pontos de detonação. . . . .	55
4.15	Vista de topo dos projéteis obtidos com 4 e 5 pontos de detonação. . . . .	56
4.16	Representação de um EFP em corte e as variáveis utilizadas na avaliação geométrica dos projéteis. . . . .	57
4.17	Evolução dos coeficientes $e^*$ e $\beta$ em função da espessura (constante) do disco. . . . .	59
4.18	Representação da evolução dos coeficientes $e^*$ e $\beta$ em função do número de detonadores. . . . .	60

# Bibliografia

- [1] G. R. Johnson. Dynamic analysis of explosive-metal interaction in three dimensions. *Journal of Applied Mechanics*, 48-1:30-35, 1981.
- [2] S. K. Yiu. Proceedings of the Eighth International Symposium in Ballistics, Orlando FL, p. VI-41, 1984.
- [3] K. Weimann, K. Doenngsfeld. Modeling, testing, and analysis of EFP performance as a function of confinement. in: *Proceedings of the 12th International Symposium on Ballistics*, Arlington, VA, 1990.
- [4] D. Bender, J. Carleone. Tactical Missile Warheads, Volume 155 de Progress in Astronautics and Aeronautics. *American Institutr of Aeronautics and Astronautics*, 1993.
- [5] D. Bender, J. Carleone. Method and apparatus for providing a explosively formed penetrator having fins. *United States Patent*, n.° 5365852, Nov. 22, 1994
- [6] A. Blache, Di.K.Weimann. Generation of Different Detonation Wave Contours. *16th Symposium on Ballistics*, San Francisco, 1996.
- [7] C.A. Weickert, P.J. Gallagher, Ogive-nosed, finned, explosively-formed projectiles, in: *Proceedings of the 16th International Symposium on Ballistics*, San Francisco CA, Sept. 23-28, 1996.
- [8] S. Pappu, L. E. Murr. Hydrocode and microstructural analysis of explosively formed penetrators. *Journal of Materials Science*, 37:233-248, 2002.
- [9] G. R. Johnson, R. A. Stryk. Some considerations for 3D EFP computations. *International Journal of Impact Engineering*, 32:1621-1634, 2006.
- [10] Jun Wu, Jingbo Liu, Yixin Du. Experimental and numerical study on the flight and penetration properties of explosively-formed projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 34:1147-1162, 2007.
- [11] Weibing Li, Xiaoming Wang, Wenbin Li. The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator. *International Journal of Impact Engineering*. 37:414-424, 2010.
- [12] J. van Bree, W. Duvalois, P. Somogy. in Proceedings of the 16th International Symposium on Ballistics (American Defense Preparedness Association, 1996) Vol. 2: Exterior Ballistics, Warhead Mechanism, p. 575.

- 
- [13] G. Pelosi. The finite-element method, Part I: R. L. Courant : Historical Corner. *Antennas and Propagation Magazine*, 49:180-182, 2007.
- [14] E. Stein. Olgierd C. Zienkiewicz, a pioneer in the development of the finite element method in engineering science. *Steel Construction 2*, 4:264-272, 2009.
- [15] M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin, L. Topp. Stiffness and deflection analysis of complex structures. *Journal of Aeronautical Sciences*, 23, 1956.
- [16] R. W. Clough. Early history of the finite element method from the view point of a pioneer. *International Journal for Numerical Methods in Engineering Fracture Mechanics*, 60:283-287, 2004.
- [17] M. P. Henriques. Modelação numérica/analítica da performance balística de alvos metálicos. *Universidade de Aveiro*, 2008.
- [18] C. R. Lopes. Spalling e DoP em alvos metálicos — Estudos analíticos e numéricos. *Universidade de Aveiro*, 2009.
- [19] F. Teixeira-Dias, J. Pinho-da-Cruz, R. A. Valente, R. J. Sousa. Método dos Elementos Finitos, Técnicas de Simulação Numérica em Engenharias. *ETEP-Edições Técnicas e Profissionais*, 2010.
- [20] A. H. Cordesman, M. Allison, J. Lemieux. IED Metrics for Afghanistan January 2004 — September 2010. *Center for Strategic & International Studies*, November 11, 2010.
- [21] Craig Whitlock. Number of U.S. casualties from roadside bombs in Afghanistan skyrocketed from 2009 to 2010. *The Washington Post*, January 25, 2011.
- [22] J. Pinto. Avaliação do Comportamento Mecânico de Blindagens Balísticas. *Instituto Superior Técnico de Lisboa*, Setembro, 2009.
- [23] D. Kennedy. History of the shaped charge effect, The first 100 years, *Defence Technology Support Services*, CA, 1990.
- [24] William Walters. A Brief History of Shaped Charges, *24th International Symposium on Ballistics*, 1:3-10, New Orleans, LA, September 2008. Done
- [25] W.P. Walters, J.A. Zukas. Fundamentals of Shaped Charges, *John Wiley & Sons inc.*, pp. 12-13, New York, 1989.
- [26] M.E. Backman and W. Goldsmith. The mechanics of penetration of projectiles into targets. *International Journal of Engineering Science*, 16-1:1-99, 1978.
- [27] J.A. Zukas, T. Nicholas, T. Swift, L.B. Greszczuk, D.R. Curran. Impact dynamics. *John Wiley & Sons*, New York, 1982.
- [28] G. Johnson, W. Cook. A constitutive model and data for metal subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, 541-547, 1983.



- [29] J. Lemaitre, J.L. Chaboche. Mechanics of solid materials. *Cambridge University Press*, 1990.
- [30] P. Perrot. A to Z of Thermodynamics. *Oxford University Press*, 1998.
- [31] M. Vulitsky. Ship structures subjected to high explosive detonation, *7th International LS-Dyna users conference*, 6:27-34, 2002.
- [32] G. A. Christou, L. R. Young, R. Goel, A. P. Vechart, Antoine Jerusalem. Shock attenuation of PMMA sandwich panels filled with soda-lime glass beads: A fluid-structure interaction continuum model simulation. *International Journal of Impact Engineering*, 47:48-59, 2012.
- [33] T. Hussain, D.G. McCartney, P.H. Shipway. Impact phenomena in cold-spraying of titanium onto various ferrous alloys. *Surface & Coatings Technology*, 205:5021-5027, 2011.
- [34] Armamento de combate. <http://armamentodecombate.blogspot.pt/2009/12/tnt-trinitrotolueno.html>, visitado a 20 de Maio de 2012.
- [35] Grace Under Pressure. <http://graceunderpressure2011.blogspot.pt/2012/03/kid-in-hall-said-ive-got-bullet-issue.html>, visitado a 12 de Junho de 2012.
- [36] Aerei Militari Forum. <http://www.aereimilitari.org/forum/topic/13375-efp-lince>, visitado a 13 de Junho de 2012.
- [37] Piyush Steel. <http://www.piyushsteel.co.in/copper-circles.html>, visitado a 13 de Junho de 2012.
- [38] Cambridge-Lee Industries, LLC. <http://www.hellotrade.com/cambridge-lee-industries/product.html>, visitado a 13 de Junho de 2012.
- [39] AK Steel. <http://www.aksteel.eu/en/1-products/0-ingot-iron>, visitado a 13 de Junho de 2012.
- [40] ATI Wah Chang. <http://www.atimetals.com/businesses/business-units/wahchang/products/Pages/Tantalum-Tungsten-Vanadium.aspx>, visitada a 13 de Junho de 2012.
- [41] Hi-Res Images of Chemical Elements. <http://images-of-elements.com/tantalum.php>, visitado a 13 de Junho de 2012.
- [42] G. Langford. Microstructures. *Massachusetts Institute of Technology*, Cambridge, MA, 1966
- [43] M. Colakis, M. J. Masello. Tantalum. *Classical Mythology & More: A Reader Workbook*, 2007.
- [44] G. I. Brown .Explosives: History With A Bang. *The History Press*, 2011.

- 
- [45] K. Vahedi, N. Khazraiyani. Numerical Modeling of Ballistic Penetration of Long Rods into Ceramic/Metal Armors. *8th International LS-Dyna Users Conference: Drop/Impact Simulations*, 14:39-50, 2004.
- [46] C. E. Zhou, G. R. Liu, K. Y. Lou. Three-Dimensional penetration simulation using smoothed particle hydrodynamics. *International Journal of Computational Methods*, 4:671-691, 2007.
- [47] G. Johnson, R. Stryk. Symmetric contact and sliding interface algorithms for intense impulsive loading computations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190:4531-4549, 2001.
- [48] J. Hallquist. LS-Dyna™ Theory Manual. *Livermore Software Technology Corporation*, March 2006.
- [49] M. L. Wilkins. Calculations of Elastic Plastic Flow. *Meth. Comp. Phys.*, 3:211-263, 1964.
- [50] E. D. Giroux. HEMP User's Manual. *Lawrence Livermore National Laboratory*, University of California, Rept. UCRL-51079, 1973.
- [51] P. A. Urtiew, B. Hayeo. Parametric study of the dynamic JWL-EOS for detonation products. *Fizika Goreniya i Vzryva*, Vol. 27, 4:126-137, 1991.
- [52] LS-Dyna™ support. <http://www.dynasupport.com/howtos/material/eulerian-method-basics>, visitado a 25 de Março de 2012.