



Flávio Gonçalves Martins

Determinação da velocidade de placas metálicas aceleradas por explosivo

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica
na Especialidade de Energia e Ambiente

Julho/2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Determinação da velocidade de placas metálicas aceleradas por explosivo

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Determination of metal plates velocity accelerated by explosive

Autor

Flávio Gonçalves Martins

Orientador

Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes

Júri

Presidente	Professor Doutor José Carlos Miranda Góis Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2017

“Quanto maior o nosso conhecimento, mais evidente fica a nossa ignorância”.

(John F. Kennedy)

1917-2017

À minha família

Agradecimentos

A realização da presente dissertação só foi possível graças à colaboração de pessoas que foram de extrema importância ao longo de todo o trabalho. Deste modo, apresento os meus sinceros agradecimentos.

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor Ricardo Mendes, pelo apoio incondicional, pela paciência, pela partilha de conhecimentos, sugestões, críticas. Um muito obrigado.

Agradeço ao Professor Doutor José Baranda por toda a ajuda disponibilizada na aprendizagem do programa *LS-DYNA 2D*, essencial na realização deste projeto.

Agradeço ao Professor Doutor Michael Murphy da *HYDROSOFT INTERNATIONAL* pela cedência a título gratuito, da licença do programa *LS-DYNA 2D*, utilizado no presente trabalho.

Agradeço ao meu colega de laboratório Mário Gonçalves, pela companhia e por toda a ajuda prestada sempre que necessitei.

Agradeço ao Senhor Fernando das oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica, pela construção da montagem experimental.

Agradeço a todos os meus amigos que me acompanharam ao longo de todo o meu percurso académico e que me proporcionaram momentos fantásticos que nunca vou esquecer.

Agradeço aos meus pais por todo o apoio, educação e carinho que sempre manifestaram comigo ao longo destes anos. Sem eles, nada disto era possível. À minha irmã por ser tão companheira e especial.

Agradeço a toda minha família em especial à minha tia e à minha avó pela constante preocupação demonstrada.

Por fim, agradeço profundamente à Patrícia por todo o apoio, amizade, compreensão e ajuda prestada. Certamente que sem a sua presença este projeto seria bem mais difícil. Obrigado por tudo.

Resumo

Este projeto tem como objetivo avaliar em termos numéricos, a evolução da velocidade da placa voadora em função da espessura do explosivo e da espessura da placa voadora, para configurações planas. A aceleração da placa voadora foi estudada para uma configuração lateral e frontal à onda de detonação. O software de simulação numérica utilizado foi *LS-DYNA 2D*, um código de elementos finitos, Lagrangeano, que permite a análise da resposta dinâmicas em sólidos bidimensionais. O modelo para a detonação do explosivo foi o *explosive Burn* com uma EoS JWLL. A equação de estado para a placa metálica foi a equação de *Grüneisen* associada ao modelo de comportamento *Johnson Cook* (JC). O estudo foi realizado com ANFO com uma espessura a variar entre 20 e 30 mm. A placa voadora, de cobre ou alumínio, variou entre 1 e 10mm. De uma maneira geral, nas configurações estudadas, observou-se uma diminuição da velocidade terminal com o aumento da espessura da placa voadora, enquanto que, aumentando a espessura do explosivo, a velocidade terminal aumentou. Os resultados numéricos para a velocidade terminal da placa voadora foram comparados com o modelo de *Gurney*. Em função da energia de *Gurney* do explosivo, associada a um estado de expansão, verificou-se uma concordância com os resultados numéricos obtidos. No caso de uma onda de detonação frontal, os resultados numéricos obtidos evidenciam a existência de uma onda de choque a refletir na placa metálica durante o processo de aceleração, por oposição ao processo de aceleração da placa por uma de detonação lateral onde parece não existir uma onda de choque. O estudo em causa é relevante no processo de soldadura por explosão de metais dissemelhantes, uma vez que neste processo é muito importante conhecer a evolução da velocidade da placa voadora até ao momento de colisão com a placa base.

Palavras-chave: Soldadura por explosão, Metais dissemelhantes, Configuração plana
Velocidade terminal, *Gurney*, *Burn* model, EoS JWLL, *LS-DYNA 2D*

Abstract

The purpose of this project is to evaluate numerically, the evolution of flying plate speed considering the thickness of the explosive and the thickness of flying plate in planar configuration. The acceleration of flying plate was studied from a lateral and frontal setting to the detonation wave. The numerical simulation software used was LS-DYNA 2D, a finite element code, Lagrangian, which allows the dynamic response analysis of two-dimensional solids. The model for the detonation of the explosive was the explosive Burn with a EoS JWL. The equation of State for metal plate was the Grüneisen equation associated the behavioral model Johnson Cook (JC). The study was conducted with ANFO, with a thickness ranging between 20 and 30 mm. The flying plate, copper or aluminum, ranged between 1 and 10 mm. In general, in the configuration studied, we observed a decrease in terminal velocity with the increasing of the thickness of flying plate, while increasing the thickness of the explosive, increased the terminal velocity. The numerical results for the terminal velocity of flying plate were compared with the Gurney model. Depending on the Gurney energy of the explosive, associated with the state of expansion, there has been an agreement with the numerical results obtained. In the case of a wave front detonation, the numerical results obtained demonstrate the existence of a shocking wave that reflects on metal plate during the accelerating process; on the other side, when it comes to the process of acceleration of a lateral detonation, it seems there is no shocking wave. The study in question is relevant in the welding process for dissimilar metal explosion, since this process is very important to know the evolution of the speed of the flying plate until the moment of collision with the base plate.

Keywords: Explosive welding, Dissimilar metals, Planar configuration, Terminal velocity, Gurney, Burn model, EoS JWL, LS-DYNA 2D

Índice

Índice de Figuras.....	vi
Índice de Tabelas.....	ix
Nomenclatura.....	x
Símbolos Gregos	xi
1. Introdução.....	1
1.1. Estado de arte.....	2
1.1.1. Soldadura por explosão.....	2
1.1.2. Explosivos	6
2. LS-DYNA 2D.....	12
2.1. Introdução	12
2.2. Programa LS-DYNA 2D	13
2.2.1. Maze.....	13
2.2.2. Dyna.....	17
2.2.3. Orion.....	18
3. Simulações numéricas de configuração plana e de detonação lateral.....	19
3.1. Enquadramento.....	19
3.2. Calibração do modelo numérico	20
3.3. Procedimento.....	22
3.3.1. Exemplo	22
3.4. Configuração Prillit A/Cu(OHFC).....	31
3.4.1. Descrição.....	31
3.4.2. Resultados	31
3.5. Configuração A-U-50/Cu(OHFC).....	35
3.5.1. Descrição.....	35
3.5.2. Resultados	35
3.6. Configuração A-U-50/AA 6082-T6.....	38
3.6.1. Descrição.....	38
3.6.2. Resultados	39
4. Simulações numéricas de configuração plana e de detonação frontal.....	48
4.1. Enquadramento.....	48
4.2. Calibração do modelo numérico	48
4.3. Procedimento.....	49
4.4. Configuração A-U-50/AA 6082-T6.....	50
4.4.1. Descrição.....	50
4.4.2. Resultados - Variação placa voadora.....	50
4.4.3. Resultados - Variação explosivo.....	52
4.4.4. Onda de choque.....	53
5. Validação dos resultados.....	55
Conclusões.....	59
Referências Bibliográficas.....	62
Anexo A.....	65

Anexo B.....	67
Anexo C.....	69
Anexo D.....	71
Anexo E.....	73
Anexo F.....	75
Anexo G.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Processo de soldadura por explosão numa configuração plana, adaptado de (Mousavi & Al-Hassani, 2005).....	2
Figura 1.2 Representação dos parâmetros da soldadura por explosão, (Mousavi & Al-Hassani, 2005).....	4
Figura 1.3 Representação esquemática do ângulo de colisão.....	4
Figura 1.4 Influência do rácio de explosivo na ligação alumínio/cobre, adaptado de (Gulenc, 2008).....	5
Figura 1.5 Comparação entre o processo de detonação e deflagração, adaptado de (Gois, 2016).....	7
Figura 1.6 Representação da curva de Hugoniot e a linha de Rayleigh.....	8
Figura 1.7 Evolução da pressão em função do tempo, adaptado de (Meyers, 1994).....	9
Figura 1.8 a) Configuração simétrica em forma de sandwich, b) Configuração simétrica em forma cilíndrica.....	10
Figura 1.9 a) Configuração simétrica em forma esférica, b) Configuração assimétrica em forma de sandwich de face aberta.....	11
Figura 2.1 Curvas velocidade $vs - vp$, (Asay & Shahinpoor, 1993).....	17
Figura 2.2 Fluxograma da metodologia de simulação do programa LS-DYNA 2D.....	18
Figura 3.1 Representação esquemática de uma configuração plana de detonação lateral.....	19
Figura 3.2 Comparação dos resultados da malha normal e da malha refinada.....	20
Figura 3.3 Comparação dos resultados para os 3 intervalos de armazenamento no Orion.....	21
Figura 3.4 Elementos seleccionados para o cálculo da velocidade de detonação.....	22
Figura 3.5 Evolução da pressão em função do tempo para os 3 elementos seleccionados.....	23
Figura 3.6 Representação esquemática dos elementos em estudo.....	24
Figura 3.7 Representação esquemática dos elementos internos.....	24
Figura 3.8 Curvas de velocidade para os elementos internos.....	25
Figura 3.9 Representação esquemática dos elementos externos.....	25
Figura 3.10 Curvas de velocidade para os elementos externos.....	26
Figura 3.11 a) Representação esquemática ângulo de expansão, b) Equação ângulo de expansão.....	27
Figura 3.12 Comparação das velocidades de Gurney com as curvas de velocidade para os elementos internos.....	28
Figura 3.13 Comparação das velocidades de Gurney com as curvas de velocidade para os elementos externos.....	28

Figura 3.14 a) Representação esquemática do elemento, b) Curva de deslocamento do elemento.....	29
Figura 3.15 Curvas deslocamento-velocidade.....	30
Figura 3.16 Representação esquemática dos elementos em estudo.....	31
Figura 3.17 Evolução da velocidade terminal nos 3 estados de expansão em função da espessura da placa voadora.....	32
Figura 3.18 Comparação dos resultados numéricos com as velocidades de Gurney.....	33
Figura 3.19 Evolução do ângulo de expansão em função da espessura da placa voadora..	33
Figura 3.20 Distância de aceleração em função da espessura da placa voadora.	34
Figura 3.21 Representação esquemática dos elementos estudados.....	35
Figura 3.22 Evolução da velocidade terminal nos 3 estados de expansão em função da espessura da placa voadora.....	36
Figura 3.23 Comparação dos resultados numéricos com as velocidades de Gurney.....	36
Figura 3.24 Evolução do ângulo de expansão em função da espessura da placa voadora..	37
Figura 3.25 Distância de aceleração em função da espessura da placa voadora.	37
Figura 3.26 Representação esquemática dos elementos estudados.....	38
Figura 3.27 Evolução da velocidade terminal nos 3 estados de expansão em função da espessura da placa voadora para 20 mm de explosivo.....	39
Figura 3.28 Evolução da velocidade terminal nos 3 estados de expansão em função da espessura da placa voadora para 25 mm de explosivo.....	40
Figura 3.29 Evolução da velocidade terminal nos 3 estados de expansão em função da espessura da placa voadora para 30 mm de explosivo.....	40
Figura 3.30 Comparação dos resultados numéricos com as velocidades de Gurney para 20 mm de espessura de explosivo.....	41
Figura 3.31 Comparação dos resultados numéricos com as velocidades de Gurney para 25 mm de espessura de explosivo.....	42
Figura 3.32 Comparação dos resultados numéricos com as velocidades de Gurney para 30 mm de espessura de explosivo.....	42
Figura 3.33 Evolução do ângulo de expansão em função da espessura da placa voadora..	43
Figura 3.34 Distância de aceleração em função da espessura da placa voadora.	44
Figura 3.35 Representação esquemática da localização da onda de detonação.....	45
Figura 3.36 Localização da onda de detonação em função do deslocamento da placa voadora para 20 mm de explosivo.....	46
Figura 3.37 Localização da onda de detonação em função do deslocamento da placa voadora para 25 mm de explosivo.....	46
Figura 3.38 Localização da onda de detonação em função do deslocamento da placa voadora para 30 mm de explosivo.....	47
Figura 4.1 Representação esquemática de uma configuração plana de detonação de topo.....	48

Figura 4.2 Representação esquemática dos elementos em estudo e a linha de detonação	49
Figura 4.3 Evolução da velocidade terminal nos 3 estados de expansão em função da espessura da placa voadora	50
Figura 4.4 Comparação dos resultados numéricos com as velocidades de Gurney	51
Figura 4.5 Evolução da velocidade de terminal nos 3 estados de expansão em função da espessura do explosivo	52
Figura 4.6 Comparação dos resultados numéricos com as velocidades de Gurney	53
Figura 4.7 Comportamento ondulatório provocado pela onda de choque para diferentes espessuras da placa voadora	54
Figura 4.8 Comportamento ondulatório provocado pela onda de choque para diferentes espessuras do explosivo	54
Figura 5.1 a) Representação esquemática de uma configuração cilíndrica, b) Comparação das curvas de expansão dos resultados simulados com os resultados do artigo	55
Figura 5.2 Representação esquemática da montagem experimental.....	56
Figura 5.3 Comparação das curvas de velocidade dos resultados experimentais com os resultados adquiridos.....	57
Figura 5.4 Representação esquemática da caixilharia	58
Figura G.1 Esquema genérico da caixilharia de 20 mm de espessura	77
Figura G.2 Esquema genérico da caixilharia de 25 mm de espessura	78

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Unidades programa LS-DYNA 2D	13
Tabela 3.1 Resultados velocidade de detonação	23
Tabela 3.2 Ângulo de expansão para os elementos internos	26
Tabela 3.3 Ângulo de expansão para os elementos externos	26
Tabela 3.4 Energia de Gurney para 3 estados de expansão.....	27
Tabela 3.5 Velocidades de Gurney para 3 estados de expansão	27
Tabela 3.6 Valores da distância de aceleração em função da espessura da placa voadora e do explosivo.....	44
Tabela 3.7 Valores obtidos relativos à localização da onda de detonação em função da placa voadora e do explosivo.....	47
Tabela A.1 Parâmetros modelo de Burn, Explosivos. (Sanchidrián et al., 2015).....	65
Tabela A.2 Parâmetros EoS JWL, Explosivos.(Sanchidrián et al., 2015).....	65
Tabela A.3 Parâmetros modelo de Johnson / Cook Elastic-Plastic, Placas metálica. (Birsan, Scutelnicu, & Visan, sem data; Fish, Fan, Monitor, & June, 2005; Sanchidrián et al., 2015).....	66
Tabela A.4 Parâmetros EoS Grüneisen, Placas metálicas.(Mohd Nor, 2016; Sanchidrián et al., 2015; Vignjevic, Campbell, Bourne, Matic, & Djordjevic, 2007)	66

NOMENCLATURA

V_d	Velocidade de detonação [m/s]
V_p	Velocidade de impacto [m/s]
V_c	Velocidade no ponto de colisão [m/s]
l	Distância [mm]
m	Massa da placa voadora [g]
c	Massa do explosivo [g]
R	Rácio de explosivo
E	Energia de Gurney [MJ/kg]
P	Pressão [$Mbar$]
P_{CJ}	Pressão de detonação CJ [$Mbar$]
T	Temperatura [K]
T_f	Temperatura de fusão [K]
T_a	Temperatura ambiente [K]
V	Volume relativo
V_{CJ}	Volume de detonação CJ
D	Velocidade de detonação [m/s]
D_{CJ}	Velocidade de detonação CJ [m/s]
t	Tempo [μs]
A	Constante EoS JWL
B	Constante EoS JWL
R_1	Constante EoS JWL
R_2	Constante EoS JWL

A	Parâmetro modelo de material Johnson Cook [MPa]
B	Parâmetro modelo de material Johnson Cook [MPa]
C	Parâmetro modelo de material Johnson Cook
m	Parâmetro modelo de material Johnson Cook
m	Parâmetro modelo de material Johnson Cook
G	Módulo de Rigidez [GPa]
E	Módulo de Young [GPa]
C_p	Capacidade térmica mássica [$J/(kg.K)$]
s_1	Coeficiente de declive da curva
s_2	Coeficiente de declive da curva
s_3	Coeficiente de declive da curva
C	Módulo de Rigidez
C	Valor da intersecção da curva ($v_s - v_p$)

Símbolos Gregos

β	Ângulo de expansão [$^\circ$]
ρ	Densidade [kg/m^3]
v_s	Velocidade de uma onda de choque [km/s]
v_p	Velocidade de uma partícula [km/s]
ω	Coeficiente de Grüneisen EoS JWL
$\dot{\epsilon}_0$	Taxa de deformação do material [$1/s$]
Γ	Coeficiente de Grüneisen EoS Grüneisen
a	Coeficiente de correção do volume de primeira ordem
δ	Espessura da zona de reação da detonação [m]

I. INTRODUÇÃO

Durante as duas Grandes Guerras mundiais observou-se que os estilhaços provenientes das explosões ficavam frequentemente soldados nos capacetes dos militares, bem como noutras estruturas metálicas. Tudo isto despertou o interesse da comunidade científica e em 1944, durante a 2ª Guerra Mundial, o processo de soldadura por explosão foi formalmente descoberto através de uma experiência realizada por *L. R. Carl*, que consistiu na soldadura de dois discos metálicos ligados a um detonador. Observou-se também que a interface apresentava um comportamento ondulado, (Marcos & Tremonti, 2000; Santos, 2013).

Desde então, muitos estudos foram desenvolvidos relativamente a este tema e nos dias de hoje, pode-se contextualizar a soldadura por explosão como um processo que ocorre no estado sólido obtido a partir da deformação plástica da superfície dos metais. Tendo isso em conta, contrariamente aos processos de soldadura tradicionais mais conhecidos, em que o princípio de união ocorre devido à fusão superficial dos metais a serem unidos, a soldadura por explosão é considerada um processo de soldadura por deformação.

O que caracteriza essencialmente esta técnica é a capacidade de soldar uma grande variedade de metais dissimilares para além de metais similares, ao contrário de outras técnicas tradicionais que só permitem a soldadura de metais similares. Graças aos desenvolvimentos nesta área, existe uma grande aposta da indústria química e nuclear neste tipo de soldadura, pelo que nos dias de hoje é possível soldar mais de 260 combinações de metais, (Durgutlu, Gülenç, & Findik, 2005; Findik, 2011). Salienta-se também, que, este método, é utilizado tanto para fins militares como para fins civis.

1.1. Estado de arte

1.1.1. Soldadura por explosão

Neste processo, para que ocorra a união das duas placas é necessário que haja uma carga explosiva que promova a aceleração da placa voadora (*flyer*) contra a placa base que se encontra estacionária. As placas colidem com um determinado ângulo, como é visível na figura que se segue.

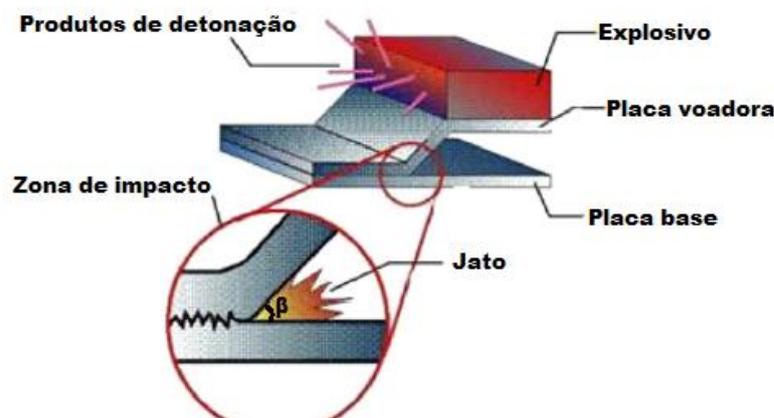


Figura 1.1 Processo de soldadura por explosão numa configuração plana, adaptado de (Mousavi & Al-Hassani, 2005).

Como referido anteriormente, este processo não necessita que haja a fusão dos metais a unir, utiliza antes a energia proveniente da carga explosiva para que ocorra a colisão. Trata-se de um processo em que não existe transferência de calor, uma vez que, tudo isto se desenrola num curto espaço de tempo, levando a que não exista praticamente aquecimento das placas. Ao contrário dos outros processos que envolvem a fusão dos materiais, neste caso, não existe uma zona termicamente afetada (ZTA) e por isso é possível soldar placas que apresentem espessuras bastante reduzidas, (Mousavi & Al-Hassani, 2005; Popoff & Casey, 1977).

O processo de soldadura por explosão pode ser dividido em 3 fases, (Mousavi & Al-Hassani, 2005):

- i. Detonação da carga explosiva – Fase onde ocorre a transferência da energia proveniente do explosivo para a placa voadora.
- ii. Deformação e aceleração da placa voadora – Ocorre a aceleração e deformação da placa voadora.
- iii. Colisão das placas – Etapa final onde se verifica a união a nível atômico dos materiais com a formação de ligações covalentes.

Para que sejam estabelecidas ligações com elevada qualidade é necessário ter em conta vários aspetos, nomeadamente as propriedades mecânicas e a espessura dos metais envolvidos, quer da placa voadora como da placa base e o tipo de explosivo, (Wronka, 2011). Convém também referir a importância da formação do jato, uma vez que se trata de uma condição essencial neste processo de soldadura. O jato tem o papel de remover as camadas de óxido formado nas superfícies de contacto, facilitando a ligação metalúrgica. De notar que a pressão deve ser elevada o suficiente para que sejam criadas as ligações interatómicas, (Akbari Mousavi & Al-Hassani, 2008). Também os parâmetros geométricos seleccionados no processo desempenham um papel criterioso na qualidade da junta. Estes, consistem nos seguintes pontos:

- i. V_d – Velocidade de detonação.
- ii. V_p – Velocidade de impacto.
- iii. V_c – Velocidade do ponto de colisão.
- iv. β – Ângulo de expansão.

Na figura seguinte encontram-se representados os parâmetros anteriormente descritos.

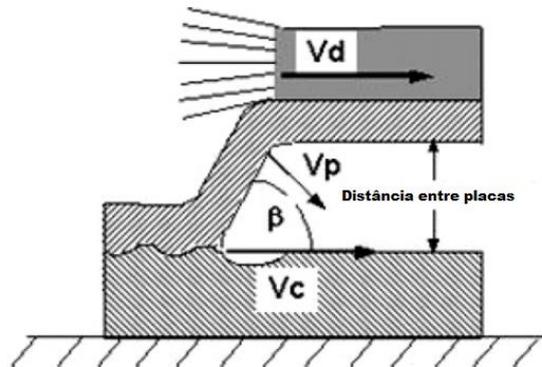


Figura 1.2 Representação dos parâmetros da soldadura por explosão, (Mousavi & Al-Hassani, 2005).

Muitas vezes o ângulo β é denominado como o ângulo de colisão porque o ângulo originado devido à expansão dos produtos de detonação é geometricamente igual ao ângulo formado no ponto de colisão. A figura 1.3 consiste numa representação esquemática do ângulo de expansão (β). Verifica-se também que o ângulo formado entre a componente vertical da velocidade de impacto, (V_z), e a velocidade de impacto, (V_p), é igual a β .

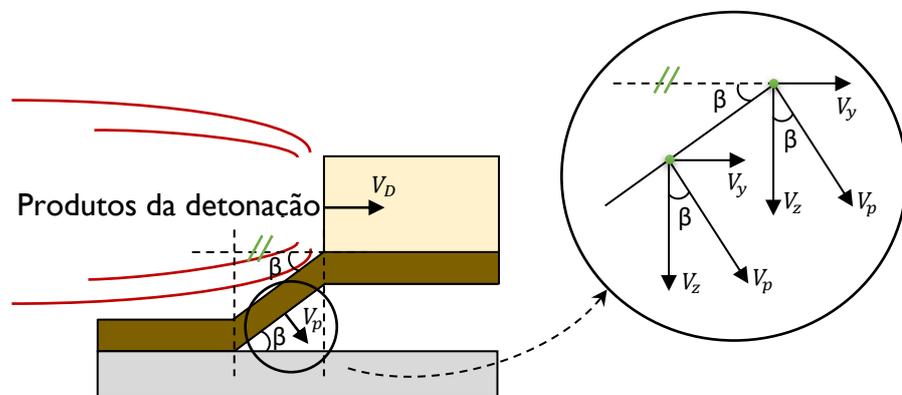


Figura 1.3 Representação esquemática do ângulo de colisão

A quantidade ou o rácio de explosivo (R) desempenha um importante papel na qualidade da junta soldada, sendo obtido através da equação que se segue.

$$R = \frac{c}{m} \tag{1.1}$$

Onde m representa a massa da placa voadora e c a massa da carga explosiva.

Na seguinte figura observa-se uma experiência realizada por (Gulenc, 2008) que consistiu em variar a carga explosiva, promovendo assim a variação de R , numa ligação alumínio/cobre.

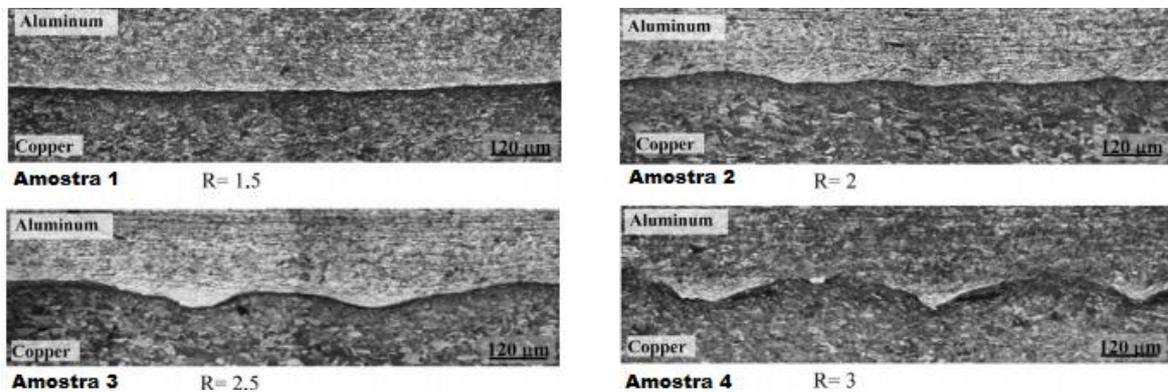


Figura 1.4 Influência do rácio de explosivo na ligação alumínio/cobre, adaptado de (Gulenc, 2008).

É visível que, quando o rácio de explosivo aumenta, a amplitude na interface de ligação aumenta, enquanto que, com a diminuição de rácio de explosivo, a interface de ligação torna-se praticamente lisa. Isto significa que com o aumento da massa de explosivo, a interface da ligação torna-se cada vez mais ondulada.

De acordo com Gulenc, a ondulação na interface melhora a qualidade da soldadura, bem como as propriedades mecânicas e a dureza dos materiais soldados. A velocidade de impacto (V_p) e a pressão também aumentam com o aumento do rácio de explosivo. A quantidade ou o rácio de explosivo também leva à formação de compostos intermetálicos enfraquecendo a ligação, (Gulenc, 2008; Wang, Beom, Sun, & Lin, 2011).

Convém referir que a distância entre as placas é um fator que deve ser tido em consideração, uma vez que influencia a qualidade da junta soldada. A placa voadora deve colidir com a placa base a uma velocidade próxima da velocidade de impacto terminal (V_p), cerca de 90 a 95% da velocidade, uma vez que o explosivo nestas condições, já não apresenta energia significativa para acelerar a placa o que significa que aceleração é praticamente 0, logo a força que o explosivo exerce sobre a placa voadora é nula ou insignificante. O objetivo passa, portanto, em aproveitar ao máximo a energia do explosivo.

Por fim, o ângulo de expansão (β) deve estar compreendido entre 5° e 25° para que haja a formação de um jato e para que este se mantenha estável, (Ghomi, 2009).

1.1.2. Explosivos

Nesta secção será dado a conhecer alguns aspetos importantes para uma melhor compreensão dos explosivos. Desde o seu aparecimento, estes são utilizados quer para fins civis como para fins militares, sendo por isso fundamental compreender e aperfeiçoar conhecimentos sobre a utilização dos explosivos, de forma a diminuir os riscos de acidentes.

Primeiramente, é necessário entender a diferença entre explosivos homogéneos e explosivos heterogéneos. Os explosivos homogéneos não apresentam imperfeições físicas que perturbem a onda de choque, os explosivos líquidos são um bom exemplo deste tipo de explosivos. Por sua vez, os explosivos heterogéneos são explosivos que apresentam algum tipo de imperfeição e/ou são constituídos por uma mistura de vários materiais que podem dificultar a propagação da onda de choque, causando irregularidades. A pólvora, as emulsões e os ANFOS são exemplos de explosivos heterogéneos, (Silva, 2006).

A explosão é uma reação química onde ocorre libertação de energia, obtendo-se como produtos, gases que se encontram a elevadas pressões. Ao analisar a velocidade na frente da reação pode-se caracterizar a explosão em dois grupos: deflagração e detonação. A detonação consiste numa reação química em que a frente de reação propaga-se com uma celeridade superior à celeridade do som nesse material, enquanto que a deflagração é precisamente o contrário, a frente de reação propaga-se com uma celeridade inferior à celeridade do som nesse material. Consequentemente, a detonação encontra-se num regime supersónico, enquanto que a deflagração num regime subsónico, (Gois, 2016; Silva, 2006).

A transição deflagração-detonação é possível quando na frente de reação ocorre um aumento da turbulência e da pressão no material fresco, promovendo uma aceleração relativamente à frente subsónica. Na figura 1.4 observam-se as diferenças entre a detonação e deflagração.

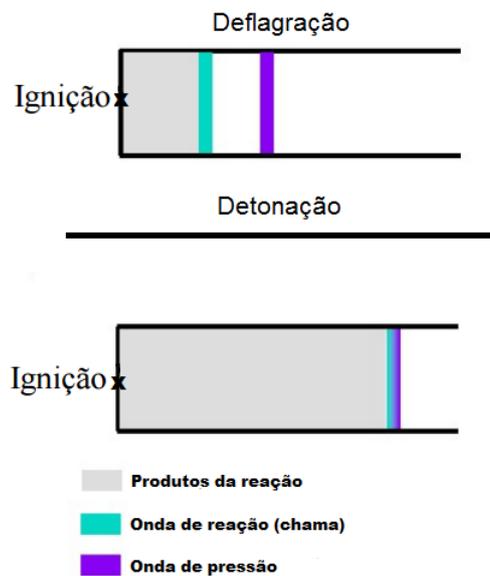


Figura 1.5 Comparação entre o processo de detonação e deflagração, adaptado de (Gois, 2016)

1.1.2.1. Curva de Hugoniot

As equações de conservação de massa e de momento envolvem parâmetros de choque, como a velocidade da partícula e a velocidade de choque. A equação de energia permite relacionar três grandezas termodinâmicas, a energia (e), a pressão (P) e a densidade (ρ), mas existe uma outra equação que permite usar na mesma estas três grandezas, chamada de equação de estado, EoS, que é descrita como relação pressão-volume, $P = P(v)$, (Silva, 2006).

A análise que se segue foca-se unicamente nas três grandezas termodinâmicas anteriormente descritas, ou seja, na equação de estado e na equação de energia.

É de notar que o material, após a passagem da onda de choque, atinge um estado de equilíbrio, tanto a equação de estado como a equação de energia têm de ser satisfeitas, o que resulta numa relação pressão-volume única para o material em causa. Esta relação é descrita como a curva de *Hugoniot* e representa todos os estados de equilíbrio que são possíveis de atingir por parte do material após a passagem da onda de choque. Convém referir que não se trata do “caminho” de uma partícula do material durante a compressão.

Em síntese, a curva de *Hugoniot* permite caracterizar todos os possíveis estados que o material pode atingir a partir do estado inicial, após a passagem da onda de choque, (Mendes, 2000; Silva, 2006). A curva de *Hugoniot* típica é apresentada na figura 1.5.

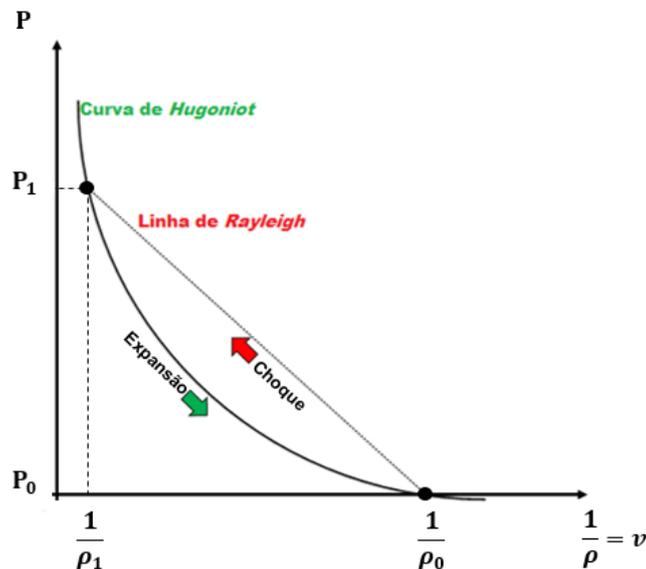


Figura 1.6 Representação da curva de *Hugoniot* e a linha de *Rayleigh*

Pela figura anterior pode-se dizer que a linha de *Rayleigh* é uma reta segmentada pelo estado inicial (P_0, v_0) e pelo estado final (P_1, v_1) e refere-se à condição de descontinuidade devido à onda de choque. Na prática, o material sofre um choque que eleva a sua pressão do estado inicial (P_0, v_0) para o estado final (P_1, v_1) .

Através da figura 1.5, também é possível calcular a energia do material que corresponde à área que se encontra abaixo da linha de *Rayleigh* delimitada pelo estado inicial (P_0, v_0) e pelo estado final (P_1, v_1) . Uma vez que, a pressão inicial pode ser desprezada se comparada com os valores obtidos no estado final, a energia total obtida pelo material é resultado da compressão por choque.

Quando o material se encontra no estado de pressão (P_1, v_1) ocorre um processo de descarga para o ambiente através de uma onda de expansão que apresenta semelhanças com a curva de *Hugoniot*, por isso, de igual modo, a energia dissipada pelo material corresponde à área que se encontra abaixo da curva de *Hugoniot* delimitada pelo estado inicial (P_0, v_0) e estado final (P_1, v_1) .

Pode-se concluir, que a energia final no material corresponde á área entre a reta de *Rayleigh* e a curva de *Hugoniot* provocando o aquecimento do material, (Mendes, 2000).

1.1.2.1. Teoria de Chapman-Jouguet e de Zeldovitch-Neuman-Doring

A teoria de *Chapman-Jouguet* (CJ) tem como função prever e caracterizar as variáveis da detonação estável e baseia-se exclusivamente nas características energéticas do explosivo ignorando a cinética das reações químicas. Está teoria permitiu concluir que a compressão do explosivo e a sua transformação química em produtos de detonação ocorrem simultaneamente no interior da onda choque. Este modelo é chamado de “zona de reação zero” uma vez que não considera uma zona de reação finita nem nenhuma perturbação que afete a frente da onda de detonação estável, (Silva, 2006).

Ao contrário do modelo anterior, o modelo físico desenvolvido por *Zeldovitch, Neuman e Doring* (ZND) considera uma zona de reação. Esta teoria indica que a onda de detonação apresenta uma zona de reação bem definida, que o explosivo é comprimido devido a passagem da onda de choque e que a decomposição química ocorre na zona de reação. A figura 1.6. é ilustrativa e permite entender melhor este modelo, (Mendes, 2000).

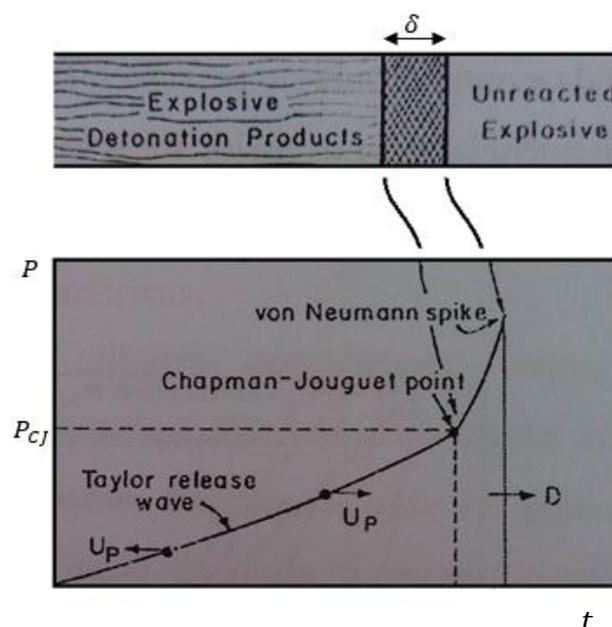


Figura 1.7 Evolução da pressão em função do tempo, adaptado de (Meyers, 1994)

É possível observar a zona de reação finita, onde tem lugar a reação química. O primeiro contacto com a onda de choque provoca um pico de pressão que tem o nome de *Von Neuman*. No fim da zona de reação, o material encontra-se a uma pressão e temperatura que definem o ponto *Chapman Jouguet* o mesmo pode ser calculado intersectando a linha e *Rayleigh* com a curva *Hugoniot-P* produtos de detonação. A onda de arrasto que se segue tem o nome de onda de *Taylor*, (Mendes, 2000).

Em suma, a teoria termodinâmica de *Chapman Jouguet* (CJ) é utilizada em estudos relativos à detonação de explosivos e assume que o processo de detonação é instantâneo. Já a teoria *Zeldovitch, Neuman e Doring* (ZND) apresenta uma zona de reação finita.

1.1.2.1. Modelo de Gurney

Um dos parâmetros que influencia a caracterização de um explosivo é a capacidade de aceleração dos produtos da detonação e pode ser descrita através do modelo de *Gurney*. *Ronald Gurney*, na década de 1940, verificou que a energia química dos explosivos é convertida em energia cinética dos produtos de detonação e dos fragmentos do confinamento, possibilitando assim, chegar ao valor da velocidade máxima (velocidade terminal) dos materiais acelerados pelo explosivo. Este processo leva a um aumento gradual de expansão dos produtos da detonação o que provoca um aumento do volume,

Foram desenvolvidas equações para geometrias cilíndricas, esféricas e cónicas, mas também para geometrias assimétricas. De seguida são apresentados desenhos esquemáticos de alguns casos e as respetivas equações que permitem calcular a velocidade terminal.

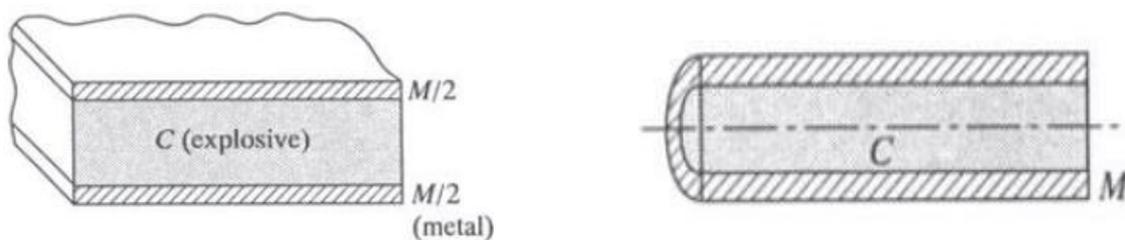


Figura 1.8 a) Configuração simétrica em forma de sandwich, b) Configuração simétrica em forma cilíndrica

$$\frac{v}{\sqrt{2E}} = \left[\frac{M}{C} + \frac{1}{3} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1.2)$$

$$\frac{v}{\sqrt{2E}} = \left[\frac{M}{C} + \frac{1}{2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1.3)$$



Figura 1.9 a) Configuração simétrica em forma esférica, b) Configuração assimétrica em forma de sandwich de face aberta

$$\frac{v}{\sqrt{2E}} = \left[\frac{M}{C} + \frac{3}{5} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1.4)$$

$$\frac{v}{\sqrt{2E}} = \left[\frac{\left(1 + 2\frac{M}{C}\right)^3 + 1}{6\left(1 + \frac{M}{C}\right)} + \frac{M}{C} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1.5)$$

Em que:

- C – Massa da carga explosiva;
- M – Massa do material acelerado, placa voadora;
- v – Velocidade da placa acelerada;
- E – Energia de Gurney;
- $\sqrt{2E}$ – Constante de Gurney / Velocidade de Gurney, expressa em $\frac{mm}{\mu s}$;

No estudo dos explosivos, a densidade volúmica e a energia de Gurney são tidas em consideração como indicadores que permitem caracterizar a capacidade de um explosivo, (Knorr, Loidl, & Kjems, 1981).

Para o cálculo da velocidade terminal da placa voadora, através do modelo de Gurney, é necessário ter em conta o estado de expansão dos produtos de detonação, uma vez que, para cada estado de expansão é associado uma energia de Gurney, E , que permite o cálculo da velocidade de terminal.

As velocidades terminais da placa voadora quando calculadas por este modelo, muitas vezes são denominadas de velocidades de Gurney.

2. LS-DYNA 2D

2.1. Introdução

A soldadura é um processo passível de ser estudado por via experimental, contudo, com o avanço tecnológico, a utilização de programas informáticos que permitam obter informação fiável sobre as características de detonação dos explosivos, tornou-se mais vantajoso permitindo poupar tempo e dinheiro. O conhecimento das propriedades dos materiais é essencial para que os dados obtidos pelos programas sejam o mais realistas possíveis. Convém referir, que independentemente dos bons resultados que possam ser retirados dos programas de simulação, o estudo experimental nunca deve ser ignorado, (LSTC, 2017).

Neste projeto, o programa utilizado chama-se *LS-DYNA2D* versão duas dimensões, desenvolvido pela *Livermore Software Technology Corporation* (LSTC). Trata-se de um programa de simulação multifísica que permite a análise da resposta em sólidos a duas dimensões, tendo por base o método dos elementos finitos, ou seja, o programa executa um procedimento numérico com o objetivo de determinar resultados cada vez mais aproximados subdividindo a geometria do material em pequenos elementos, permitindo assim, tornar o problema mais simples de ser processado. O programa apresenta uma vasta área de aplicações, de salientar os exemplos mencionadas na lista que se segue, (LSTC, 2017).

- Construção civil – Plataformas offshore, design de pavimentos;
- Engenharia biomédica – Válvulas cardíacas;
- Engenharia automóvel – Testes de colisão;
- Indústria eletrónica – Design de componentes eletrónicos;
- Equipamentos desportivos – capacetes, bolas de golfes, tacos de basebol, tacos de golfes;

2.2. Programa LS-DYNA 2D

O conteúdo seguinte procura explicar, de forma sucinta, o funcionamento do programa. Será dado a conhecer as principais características deste software de simulação numérica, destacando sobretudo os aspetos relacionados especificamente com a detonação de explosivos.

Na tabela 2.1. são apresentadas as grandezas usadas no decorrer do projeto e as respetivas unidades que o programa de simulação *LS-DYNA 2D* utiliza.

Tabela 2.1 Unidades programa *LS-DYNA 2D*

	Simbologia	Unidade
Distância	l	cm
Tempo	t	μs
Pressão	P	Mbar
Densidade	ρ	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Velocidade	D	$\frac{\text{cm}}{\mu\text{s}}$

O software encontra-se estruturalmente dividido em 3 programas, *Maze*, *Dyna* e *Orion*, cada uma com uma função específica. A abordagem ao programa deve seguir a sequência anteriormente mencionada. Cada uma destas partes será devidamente explorada na secção seguinte.

2.2.1. Maze

O processo de análise de engenharia, inicia-se com a descrição física do problema em estudo. O primeiro passo a tomar consiste na construção do desenho geométrico a duas dimensões que é feito pela diretoria *Maze*. Tudo isto é preparado num arquivo de entrada que reúne todas as informações necessárias para o trabalho em causa. Trata-se de um arquivo de texto, (.txt), aberto com o programa bloco de notas, que posteriormente é lido

no programa *Maze*. Após a leitura é gerado um ficheiro com o nome de *mazout* que depois será utilizado pelo *Dyna*, (Hallquist, 1996)

A informação inserida no bloco de notas, arquivo de texto, divide-se em 3 fases, o próximo passo consiste numa descrição resumida da informação de cada fase.

2.2.1.1. Primeira fase

A primeira fase consiste na definição de todos os parâmetros geométricos necessários para o problema. Definidos os parâmetros, prossegue-se com a fixação de todos os pontos do desenho geométrico que posteriormente serão utilizados na formação das linhas. A última etapa resulta na construção e identificação das partes integrantes, onde também é estabelecida a malha, isto é, o número de elementos constituintes de cada parte. Todo este procedimento é executado através de comandos disponíveis no manual *Maze*, onde também é disponibilizada uma explicação muito mais abrangente e elucidativa.

2.2.1.2. Segunda fase

Nesta fase, para além de se definir as interfaces e as condições fronteira, são estabelecidos os comandos que serão posteriormente utilizados no *Dyna* e no *Orion*, como a título de exemplo, o instante de paragem do programa, o passo nos intervalos dos cálculos do *Dyna*, o intervalo de armazenamento de dados no *Orion* e o intervalo de armazenamento de dados, caso seja necessário imprimir.

É de referir também que nesta fase são fornecidos comandos que eliminam todos os elementos que apresentem volumes negativos ou iguais a zero, assim como os comandos que eliminam elementos que atingem o intervalo no cálculo do *Dyna*.

Relativamente ao caso específico dos explosivos, é estabelecida também a localização e o tipo de iniciação da detonação.

2.2.1.1. Terceira fase

Na terceira e última fase são identificados os materiais a utilizar na simulação numérica. Existe uma base de dados, disponível nos manuais do programa, com vários materiais, previamente definidos, que podem ser utilizados pelo programa. Todavia, muitos materiais não se encontram na base de dados o que leva a que seja necessário identificar para cada caso, o modelo do material e equação de estado associada. A lista dos modelos dos materiais e as equações de estado podem ser consultadas no manual *Maze*, por isso, é importante que haja um conhecimento prévio sobre cada material em estudo. O programa *LS-DYNA 2D* possibilita guardar novos materiais na base de dados para que futuramente possam ser usados. No caso específico deste projeto, os materiais utilizados não se encontram pré-definidos.

O processo de choque do explosivo e a expansão dos produtos de detonação, curva de *Hugoniot*, pode ser empiricamente descrito através do modelo de *Burn* que será seguidamente abordado. Para isso é necessário definir certos parâmetros:

- i. D – Velocidade de detonação.
- ii. P_{CJ} – Pressão *Champam Jouguet*.
- iii. ρ – Densidade.

A equação *JWL* é uma equação de estado empírica, usualmente utilizada para descrever a curva de *Hugoniot* dos produtos de detonação dos explosivos e é dada pela seguinte fórmula, (Hallquist, 1996; Lee, Finger, & Collins, 1973)

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (2.1)$$

Sendo P a pressão, V o volume relativo, ω o coeficiente de Grüneisen e A, B, R_1, R_2 constantes.

Todas as simulações numéricas realizadas neste capítulo, o comportamento do explosivo será definido através do modelo de *Burn* e a EoS associada é a *JWL*. Os parâmetros serão introduzidos de acordo com as indicações dos manuais do programa *LS-DYNA 2D*.

Vários modelos são usados hoje em dia em processos de simulação numérica para descrever empiricamente o comportamento dos metais, no entanto, de acordo com *Zhang et al*, o modelo *Johnson-Cook* é o mais utilizado uma vez que analisa certos aspetos separadamente, como a taxa de deformação, o endurecimento por deformação e o amaciamento térmico. É descrito pela seguinte equação, (Hallquist, 1996):

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\varepsilon}^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{amb}}{T_{fusão} - T_{amb}} \right)^m \right] \quad (2.2)$$

Em que $\bar{\sigma}$ é a tensão, T a temperatura, $T_{fusão}$ a temperatura de fusão, T_{amb} a temperatura ambiente, $\dot{\bar{\varepsilon}}$ a taxa de deformação plástica equivalente, $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ a taxa de deformação plástica equivalente de referência, $\bar{\varepsilon}$ a tensão plástica equivalente e A, B, C, m, n são parâmetros dos materiais.

O primeiro termo da equação refere-se ao endurecimento por deformação, o segundo termo refere-se à taxa de deformação (viscosidade) e o terceiro é relativo ao amaciamento térmico, (Zhang, Outeiro, & Mabrouki, 2015).

Definido o modelo do material, é necessário proceder com a identificação de uma equação de estado que permita obter a relação pressão-volume. A equação *Mie-Grüneisen* pode ser aplicada. É utilizada tanto para materiais expandidos como para materiais comprimidos, sendo que para materiais comprimidos é dada pela seguinte fórmula.

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + 1 - \frac{\Gamma_0}{2} \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\Gamma_0 + a\mu)E \quad (2.3)$$

Onde:

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (2.4)$$

Onde C corresponde ao valor da intersecção da curva velocidade da onda de choque vs. velocidade da partícula ($v_s - v_p$), S_1, S_2, S_3 são coeficientes de declive da curva ($v_s - v_p$), Γ_0 é o coeficiente de Grüneisen, α é o coeficiente de correção do volume de primeira ordem e E a energia. A equação define o excesso de compressão μ em que ρ_0 indica o valor da densidade inicial e ρ a densidade após a compressão, (Hallquist, 1996).

Na figura 2.1 observam-se várias curvas velocidade da onda de choque vs. velocidade da partícula ($v_s - v_p$) de diferentes materiais. O objetivo da figura passa por contextualizar os parâmetros anteriormente mencionados. Todas as curvas ficam definidas pela seguinte equação.

$$v_s = C + S_1 v_p + S_2 v_p^2 + S_3 v_p^3 \quad (2.5)$$

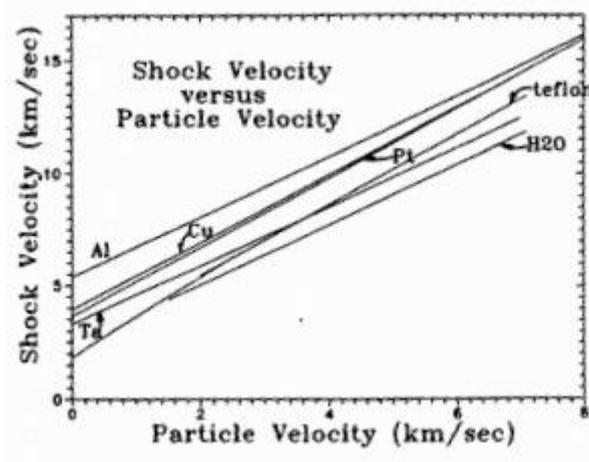


Figura 2.1 Curvas velocidade $v_s - v_p$, (Asay & Shahinpoor, 1993).

2.2.2. Dyna

Após a introdução de toda a informação necessária no *Maze*, a diretoria do *Dyna* tem como função realizar os cálculos numéricos no caso em estudo, gerando um conjunto de ficheiros onde apresenta a informação respetiva de cada instante temporal analisado. É gerado um ficheiro com o nome *d2plot* que será posteriormente utilizado na leitura no *Orion*, (Hallquist, 1996).

2.2.3. Orion

O pós-processador *Orion* permite visualizar o comportamento da simulação, analisar as variáveis do processo e exportar os dados. Todo este procedimento é feito com recurso a uma linha de comandos que se encontra disponível no manual *Orion*, por isso, de extrema importância consultar previamente o manual, de modo a um melhor entendimento, (Hallquist & L.Levatin, 1882).

O programa *LS-Dyna 2D* é um software simples com uma grande margem de aplicação. No entanto, como qualquer outro programa, é necessário que exista alguma prática sobretudo para compreender melhor as funcionalidades, e para isso, é fundamental utilizar os manuais. O estudo de exemplos anteriores é também uma ótima ferramenta no processo de aprendizagem do programa.

Nunca é demais salientar que toda a análise previamente desenvolvida foi orientada para o projeto em estudo. O fluxograma que se segue procura explicar a metodologia do programa de simulação *LS-Dyna*.

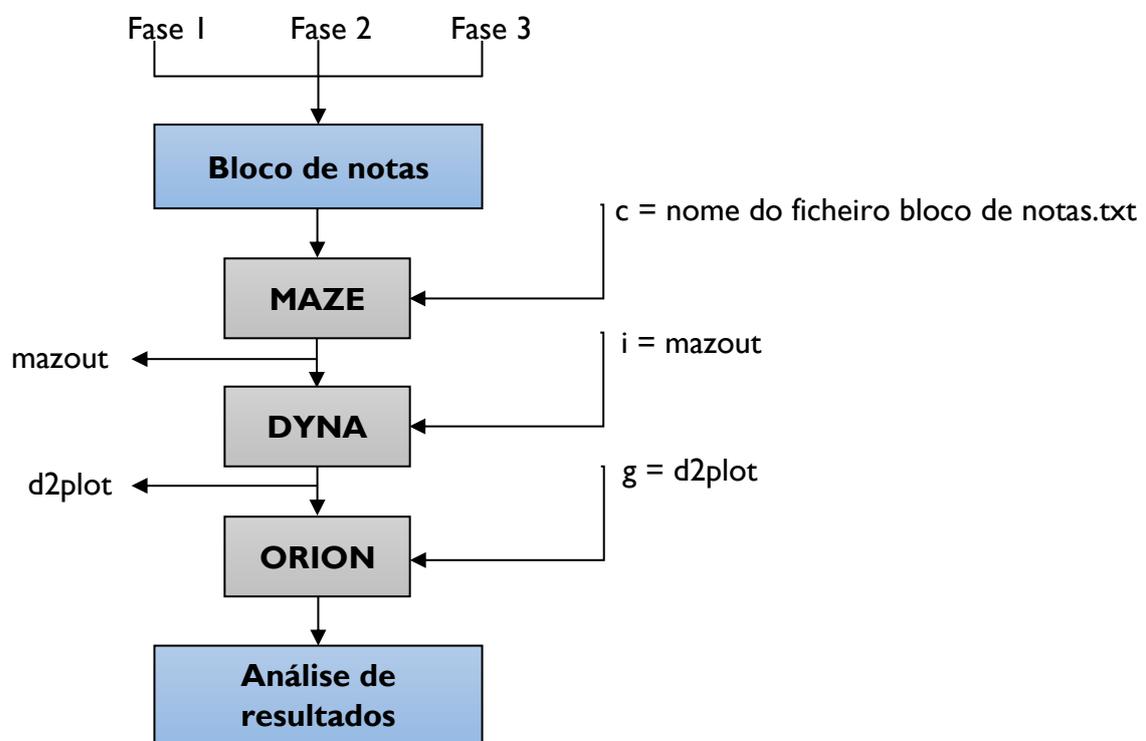


Figura 2.2 Fluxograma da metodologia de simulação do programa *LS-DYNA 2D*

3. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE CONFIGURAÇÃO PLANA E DE DETONAÇÃO LATERAL

3.1. Enquadramento

O capítulo seguinte tem como principal objetivo analisar a velocidade terminal adquirida pela placa voadora quando sujeita a uma aceleração provocada pelo processo de expansão rápida dos gases da detonação. Também será apresentada uma comparação entre os resultados obtidos através das simulações numéricas com o modelo de *Gurney* e procurar-se-á entender o efeito da espessura da placa voadora na velocidade terminal. Outros aspetos serão juntamente abordados ao longo deste capítulo.

Os explosivos utilizados nas simulações são ANFOS (*Ammonium Nitrate – Fuel Oil*), uma mistura heterogénea com uma base em nitrato de amónio. De notar que, devido à sua lenta reação, apresentam um comportamento de uma detonação não ideal em comparação com outros explosivos.

O estudo procedido incide sobre os seguintes metais: cobre (OHFC) e liga de alumínio Al-6082

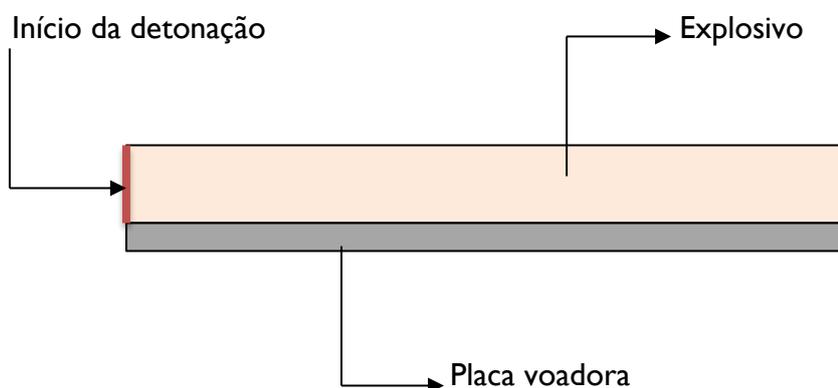


Figura 3.1 Representação esquemática de uma configuração plana de detonação lateral

3.2. Calibração do modelo numérico

Todas as simulações numéricas realizadas apresentam uma configuração plana em que, a detonação se inicia lateralmente em forma de linha tal como demonstra a figura 3.1. O comprimento do explosivo e da placa voadora é de 250 mm em todas as simulações.

Para definir o comportamento quer do explosivo quer da placa voadora foram utilizados os modelos que se encontram referenciados na secção 2.1.2 *Dyna*.

A definição da malha é um critério fundamental que influencia os resultados obtidos em programas de simulação numérica. Por isso, o procedimento que se segue consiste em variar a malha (número de elementos) tanto para o explosivo como para a placa voadora com o objetivo de determinar a malha ideal a usar em todas as simulações.

O estudo foi realizado recorrendo a uma simulação numérica PrillitA/Cobre de geometria plana em que o explosivo apresenta 25 mm de espessura e 250 mm de comprimento e a placa voadora apresenta 3 mm de espessura e 250 mm de comprimento. O parâmetro utilizado como base de estudo para a definição da malha foi a curva de velocidade da placa voadora. Convém referir que a simulação PrillitA/Cobre será abordada seguidamente em detalhe. Foram definidas duas amostras de estudo, a primeira com o nome de malha normal em que o explosivo apresentava 1 elemento/mm e a placa voadora 2 elementos/mm, enquanto que na segunda amostra denominada de malha refinada o explosivo apresentava 2 elementos/mm e a placa voadora 4 elementos/mm. Na figura seguinte são apresentados os resultados obtidos.

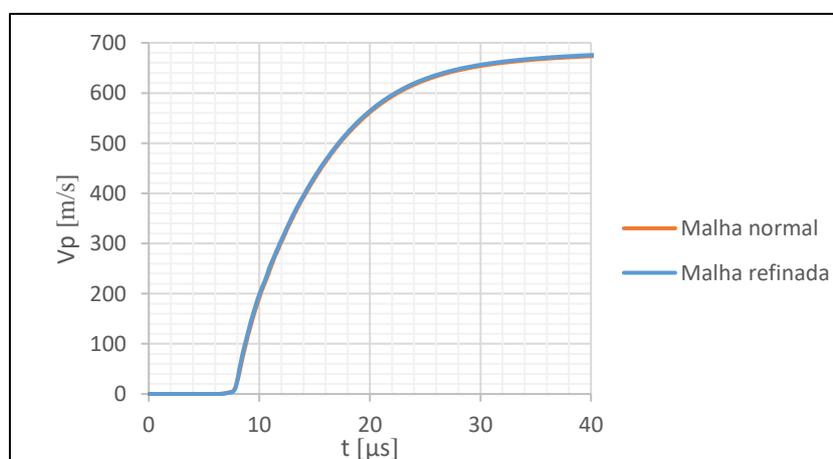


Figura 3.2 Comparação dos resultados da malha normal e da malha refinada

Como se pode observar, o comportamento da curva da velocidade é extremamente semelhante utilizando tanto a malha normal como a malha refinada, pelo que, extrapolando com base nos resultados anteriores, todas as simulações futuramente apresentadas neste capítulo têm definido um explosivo com uma malha de 1 elemento/mm e uma placa voadora com uma malha de 2 elementos/mm, uma vez que, o processo de simulação numérico se torna mais rápido utilizando uma malha menos refinada.

Por fim, foi necessário definir o intervalo de armazenamento de dados utilizado no *Orion*. Para isso, tal como na definição da malha, a configuração Prillit A/Cobre com uma placa voadora de 3 mm foi utilizada como base de estudo e o parâmetro avaliado foi as curvas de velocidade. A figura que se segue apresenta 3 intervalos de armazenamento, 25 ns, 50 ns e 100 ns.

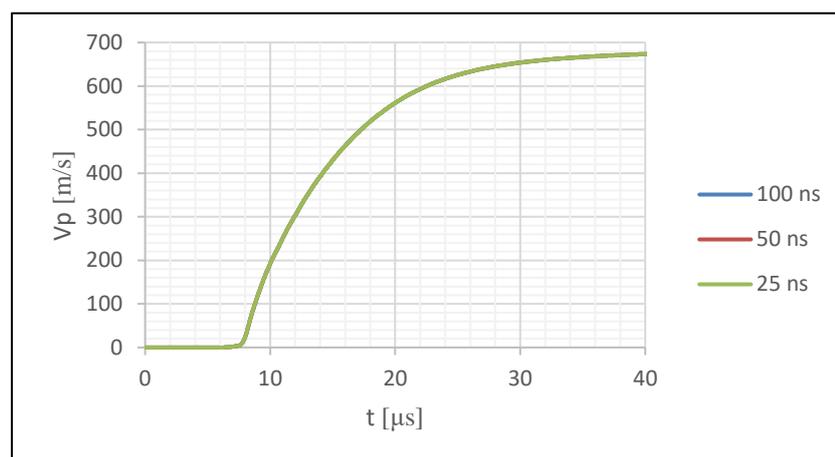


Figura 3.3 Comparação dos resultados para os 3 intervalos de armazenamento no *Orion*

Como se pode verificar pelo comportamento das curvas, os resultados obtidos demonstram semelhanças entre os intervalos. Tendo isto em conta, selecionou-se o intervalo de 100 ns para a realização das simulações, o que permite uma maior simplificação do processamento da informação.

3.3. Procedimento

Para a realização deste projeto, o trabalho desenvolvido incidiu sobre um modelo repetitivo que se estendeu para todas as espessuras analisadas das diferentes configurações.

Será apresentado um exemplo ilustrativo, de modo a explicar o procedimento desenvolvido para cada espessura. Os resultados das restantes espessuras de cada configuração encontram-se disponíveis em anexo.

Mais uma vez, a configuração Prillit A/Cobre (OHFC) com uma placa voadora de espessura 3 mm será utilizada a título de exemplo.

3.3.1. Exemplo

3.3.1.1. Velocidade de detonação

A velocidade de detonação (D) foi calculada através do método dos elementos. Ao proceder-se à identificação dos elementos no programa que se encontrem na mesma linha de explosivo, consegue-se saber a distância entre eles e recorrendo ao gráfico pressão-tempo é possível calcular a evolução da pressão para cada elemento selecionado, obtendo-se assim a velocidade de detonação.

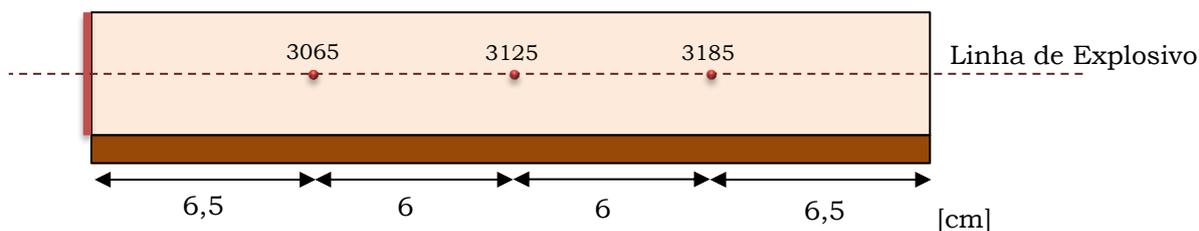


Figura 3.4 Elementos selecionados para o cálculo da velocidade de detonação

Na figura 3.5 observa-se a evolução da pressão para os elementos em causa, devido à passagem da onda de choque.

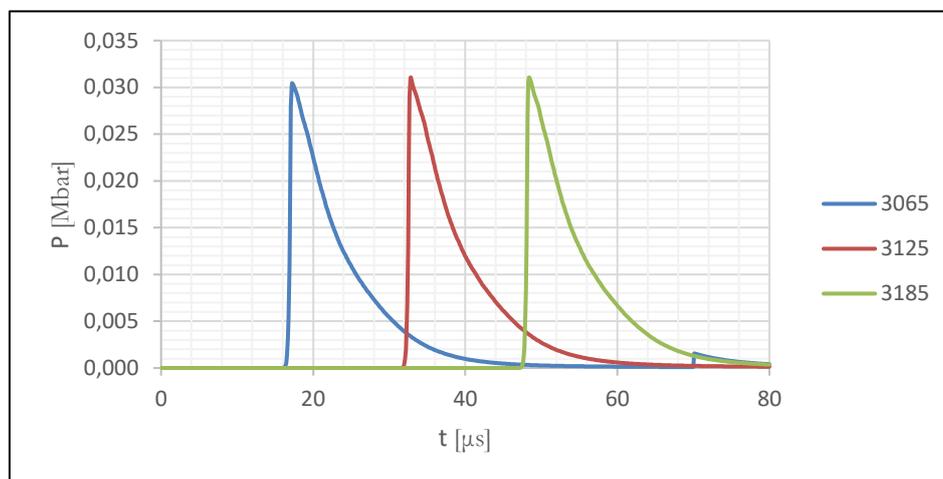


Figura 3.5 Evolução da pressão em função do tempo para os 3 elementos selecionados

Os picos observáveis em cada elemento correspondem ao primeiro contacto que os elementos têm com a onda de choque, permitindo assim, não só identificar a pressão máxima a que os elementos estão sujeitos, como também saber o instante temporal da passagem da onda de choque.

Na tabela 3.1 encontram-se os resultados da velocidade de detonação.

Tabela 3.1 Resultados velocidade de detonação

Elementos	d[cm]	$\Delta t[\mu s]$	v[cm/ μs]	v[m/s]
3065-3125	6	15,6130	0,3843	3842,95
3125-3185	6	15,4960	0,3872	3871,97

De acordo com Sanchidrián et al, a velocidade de detonação da Prillit é 3854 m/s. Os resultados obtidos numericamente são bastante semelhantes.

3.3.1.1. Velocidade terminal

O estudo da velocidade terminal incidiu sobre os elementos internos – em contacto com o explosivo, e externos – em contacto com a placa base, que se encontram nas superfícies da placa voadora. Na figura 3.6 é apresentado um esquema onde são identificados todos os elementos escolhidos bem como as distâncias entre eles.

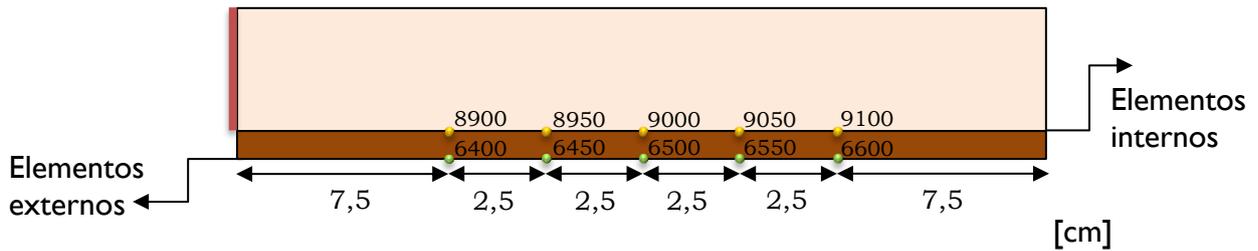


Figura 3.6 Representação esquemática dos elementos em estudo

Como já foi anteriormente explicado, a placa voadora colide com a placa base num determinado ângulo. A velocidade da placa apresenta uma componente y e uma componente z . A equação 3.1 permite calcular a velocidade da placa.

$$V_p = \sqrt{V_y^2 + V_z^2} \tag{3.1}$$

O programa possibilita o cálculo de cada uma das componentes, contudo, por uma questão de relevância, é unicamente apresentado neste projeto a velocidade V_p . Seguidamente são expostos os resultados tanto para dos elementos internos e externos relativos a este exemplo.

3.3.1.1.1. Elementos internos

O cálculo da velocidade em cada elemento apresentado da figura seguinte. Os resultados obtidos encontram-se na figura 3.8.

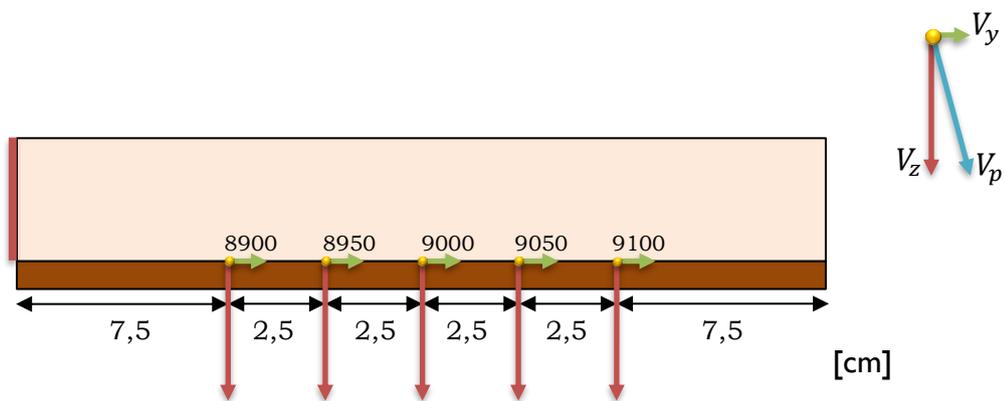


Figura 3.7 Representação esquemática dos elementos internos

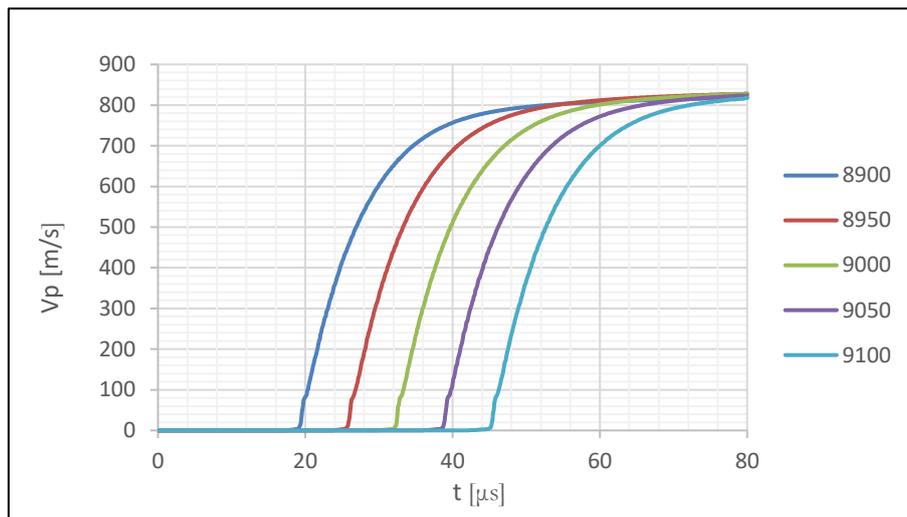


Figura 3.8 Curvas de velocidade para os elementos internos

3.3.1.1.2. Elementos externos

Relativamente aos elementos externos, foi igualmente calculado a velocidade da placa para os elementos que se encontram no esquema da figura 3.9. Os resultados estão expostos na figura 3.10.

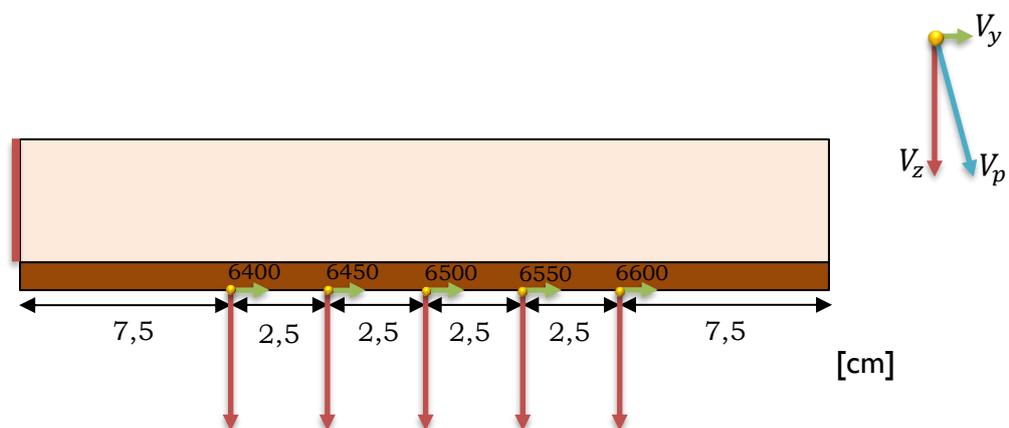


Figura 3.9 Representação esquemática dos elementos externos

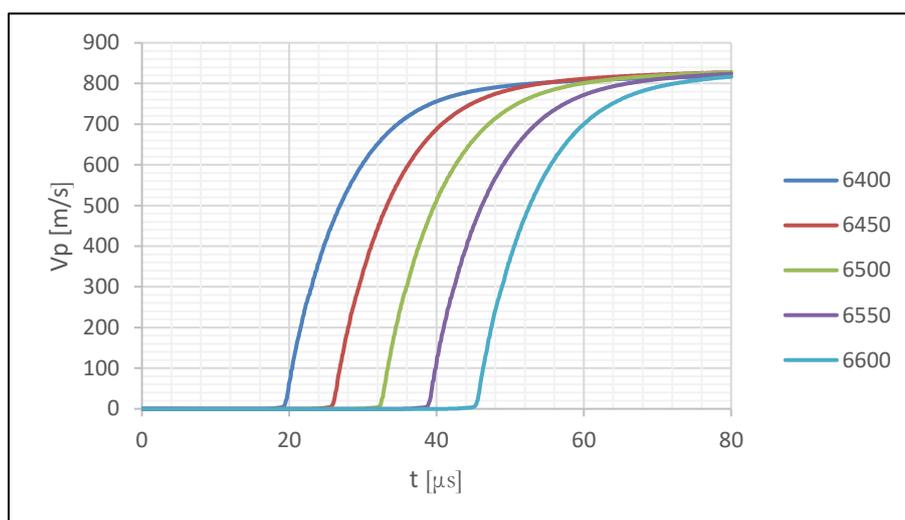


Figura 3.10 Curvas de velocidade para os elementos externos

3.3.1.2. Ângulo de expansão

Como se sabe, a colisão da placa voadora ocorre com um determinado ângulo que é igual ao ângulo de expansão dos produtos da detonação. Este parâmetro foi também alvo de estudo com o objetivo de entender o comportamento em função da espessura da placa voadora. Em seguida são apresentados os resultados para a espessura de 3 mm, tanto para os elementos internos como para os elementos externos.

3.3.1.2.1. Elementos internos

Tabela 3.2 Ângulo de expansão para os elementos internos

β [°]				
Elementos				
8900	8950	9000	9050	9100
5,12	5,41	5,51	5,58	5,71

3.3.1.2.2. Elementos externos

Tabela 3.3 Ângulo de expansão para os elementos externos

β [°]				
Elementos				
6400	6450	6500	6550	6600
4,98	5,36	5,53	5,64	5,75

Todos os elementos, internos e externos, apresentam valores semelhantes.

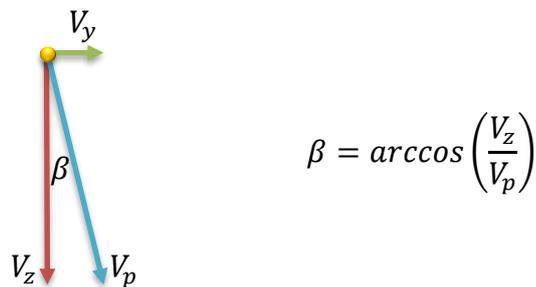


Figura 3.11 a) Representação esquemática ângulo de expansão, b) Equação ângulo de expansão

3.3.1.3. Modelo de Gurney

O programa de simulação numérica permitiu, como mencionado anteriormente, calcular a velocidade da placa voadora e conseqüentemente a velocidade terminal. A análise que se segue tem como objetivo comparar as velocidades terminais obtidas pelo programa com o modelo de *Gurney* para diversos estados de expansão. De acordo com o artigo realizado por Sanchidrián et al. (2015), selecionaram-se 3 estados de expansão. Na tabela 3.4 encontram-se definidos os estados de expansão e a energia associada a cada um.

Tabela 3.4 Energia de *Gurney* para 3 estados de expansão

Energia de <i>Gurney</i> [MJ/kg]		
2,4 V ₀	4,4 V ₀	7 V ₀
1,309	1,608	1,698

V₀ representa o volume inicial do explosivo.

A velocidade de *Gurney* relativa aos 3 estados de expansão selecionados, foi calculada e comparada com os resultados obtidos pelo programa de simulação numérica, tanto para os elementos internos como para os elementos externos.

Tabela 3.5 Velocidades de *Gurney* para 3 estados de expansão

V _p [m/s]		
2,4 V ₀	4,4 V ₀	7 V ₀
756,5	838,4	861,6

3.3.1.3.1. Elementos internos

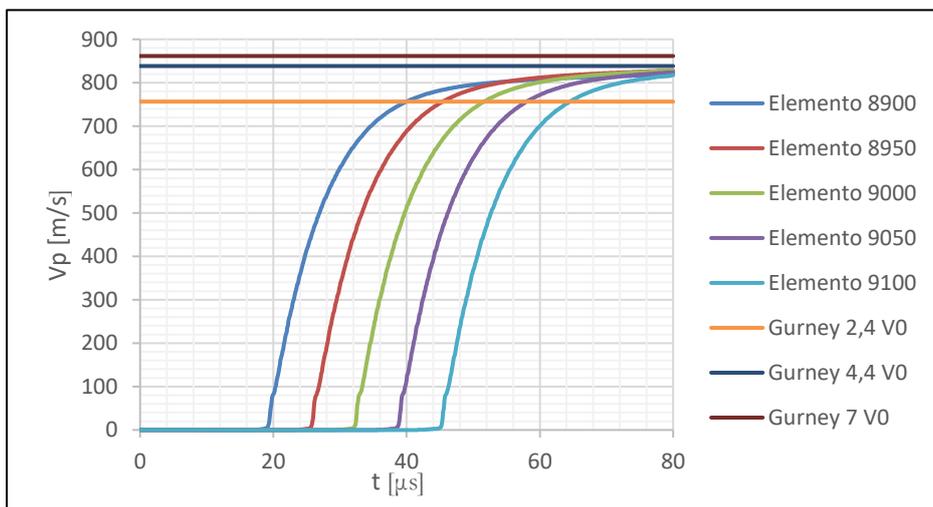


Figura 3.12 Comparação das velocidades de Gurney com as curvas de velocidade para os elementos internos

3.3.1.3.2. Elementos externos

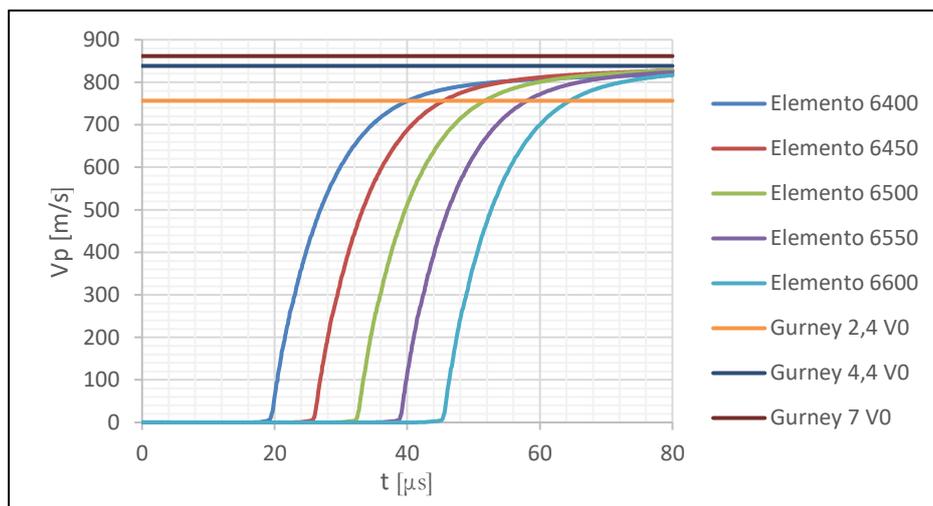


Figura 3.13 Comparação das velocidades de Gurney com as curvas de velocidade para os elementos externos

3.3.1.4. Distância de aceleração

Como referenciado no capítulo 1, a placa voadora deve colidir com a placa base com uma velocidade próxima da velocidade de impacto terminal, uma vez nestas condições, a aceleração provocada pelo explosivo é praticamente zero, o trabalho realizado é nulo ou insignificante. Para isso, pré-definiu-se que a placa voadora deve colidir com a placa base quando atingir 90% da velocidade terminal.

O estudo que se segue incidiu unicamente num elemento externo, tendo em conta que, como é possível verificar pelos resultados anteriores, as curvas de velocidade são semelhantes em todos os elementos.

O procedimento iniciou-se com o cálculo do deslocamento do elemento escolhido. Na figura 3.14 é possível identificar o elemento em estudo e o deslocamento do mesmo ao longo do tempo.

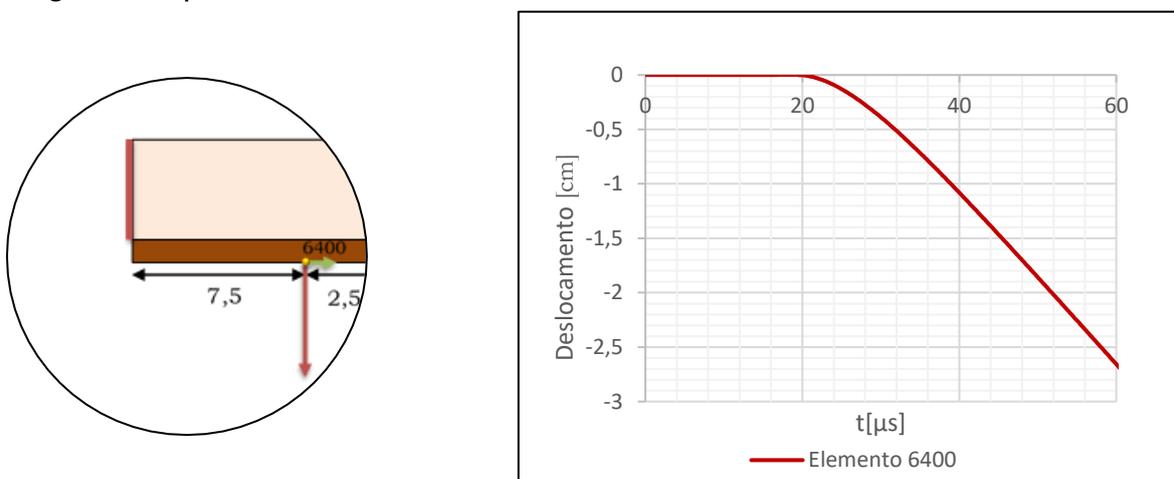


Figura 3.14 a) Representação esquemática do elemento, b) Curva de deslocamento do elemento

Determinado o deslocamento, foi necessário encontrar o intervalo de tempo que o elemento necessita para atingir 90% da velocidade terminal. Para tal, recorreu-se aos dados da velocidade terminal e assim foi possível calcular a distância entre placas recomendada.

Em todas as simulações deste capítulo, a distância de expansão foi calculada de acordo com o procedimento anterior.

3.3.1.1. Curvas velocidade-deslocamento

As curvas que se seguem resultam dos dados obtidos anteriormente somente para elemento 6400, visto que todos apresentam um comportamento semelhante, por isso, esta análise permite definir o comportamento da placa voadora.

Pela figura 3.15, é possível identificar num dado instante, a velocidade e o deslocamento da placa voadora provocado pela aceleração do explosivo. Trata-se, portanto, de uma ferramenta importante.

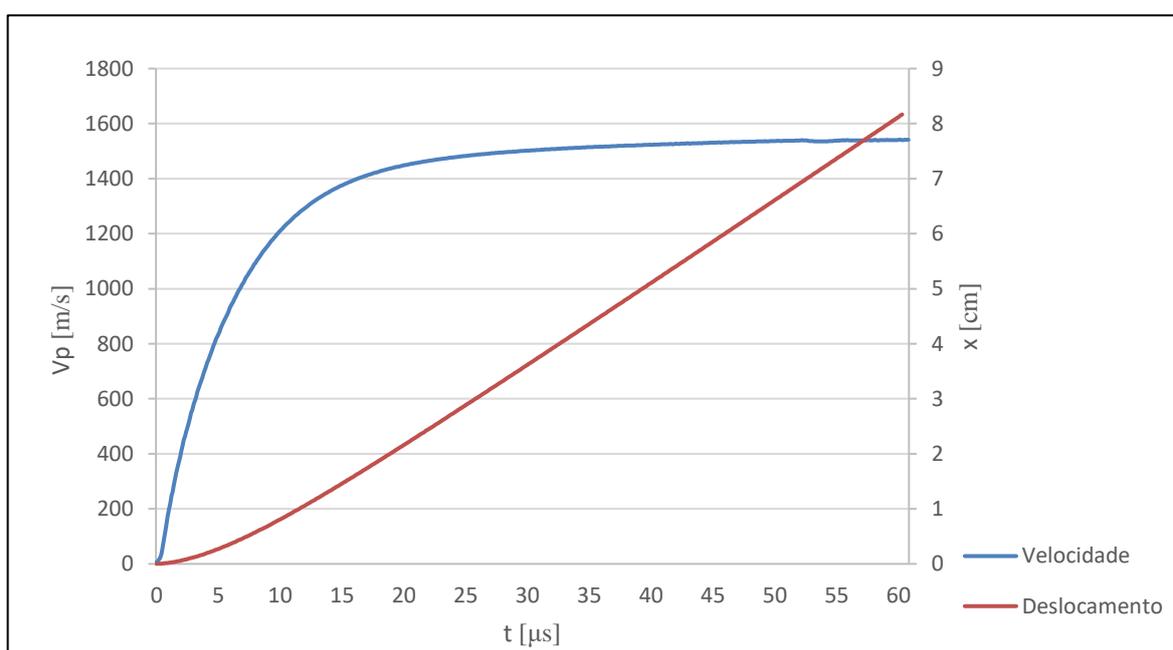


Figura 3.15 Curvas deslocamento-velocidade

Para finalizar, convém referir que a posição dos elementos foi escolhida criteriosamente de maneira a que a onda de detonação apresente um comportamento estável. De salientar que, se os elementos escolhidos estivessem localizados perto do início da detonação, a onda de detonação poderia não estar completamente formada.

Este caso exemplificativo tem como objetivo explicar o procedimento utilizado em todas as simulações numéricas deste capítulo. Visto que, os resultados relativos aos elementos internos e externos são bastante semelhantes o procedimento que se segue expõe apenas os dados obtidos com elementos externos.

3.4. Configuração Prillit A/Cu(OHFC)

3.4.1. Descrição

A simulação numérica realizada consiste numa detonação plana em que o explosivo utilizado é um tipo de ANFO, denominado de Prillit A. O material usado para a placa voadora é um tipo de cobre (OHFC) que apresenta como características principais uma elevada pureza e baixa percentagem de oxigénio.

A espessura do explosivo foi fixada em 25 mm, promovendo-se a variação da espessura da placa voadora. Os valores estipulados foram 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm e 10 mm. Todos a parâmetros dos modelos e equações de estado necessários para definir quer o explosivo (Prillit A), quer a placa de cobre (OHFC) encontram-se disponíveis em anexo e foram retirados do artigo Sanchidrián et al, (2015).

Nas páginas que se seguem, encontram-se disponibilizados os resultados obtidos para esta configuração e procurar-se-á entender a evolução dos parâmetros estudados em função da espessura da placa voadora, nomeadamente a velocidade terminal. As localizações dos elementos escolhidos para a análise encontram-se na figura.

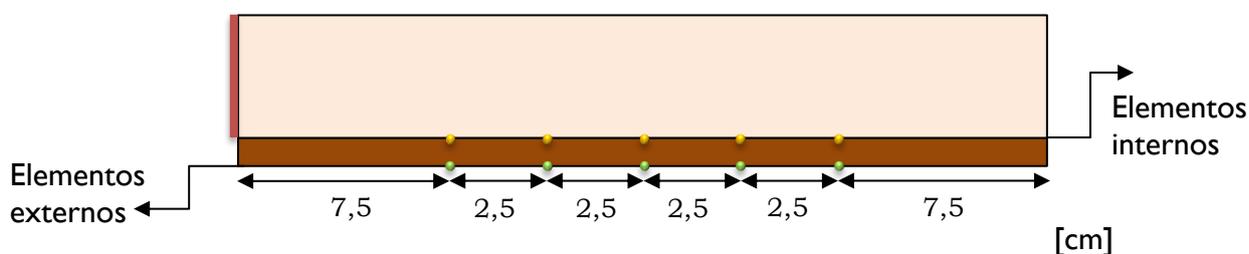


Figura 3.16 Representação esquemática dos elementos em estudo

3.4.2. Resultados

3.4.2.1. Velocidades de Gurney

Tal como já foi dito anteriormente, foram selecionados 3 estados de expansão, o primeiro estado corresponde a 2,4 vezes o volume inicial do explosivo, o segundo estado a 4,4 vezes o volume inicial do explosivo e por fim, o terceiro estado com uma expansão 7 vezes superior ao volume inicial do explosivo. Os dados obtidos encontram-se disponíveis na figura 3.17.

Pelo gráfico, a velocidade de impacto terminal diminui gradualmente com o aumento da espessura da placa voadora e esta situação é observada nos 3 estados de expansão. É visível que a velocidade é superior para expansões mais elevadas e esta consideração verifica-se em todas as espessuras da placa voadora. Por fim, constata-se que as diferenças entre as velocidades para cada espessura, diminuem com o aumento da espessura da placa voadora

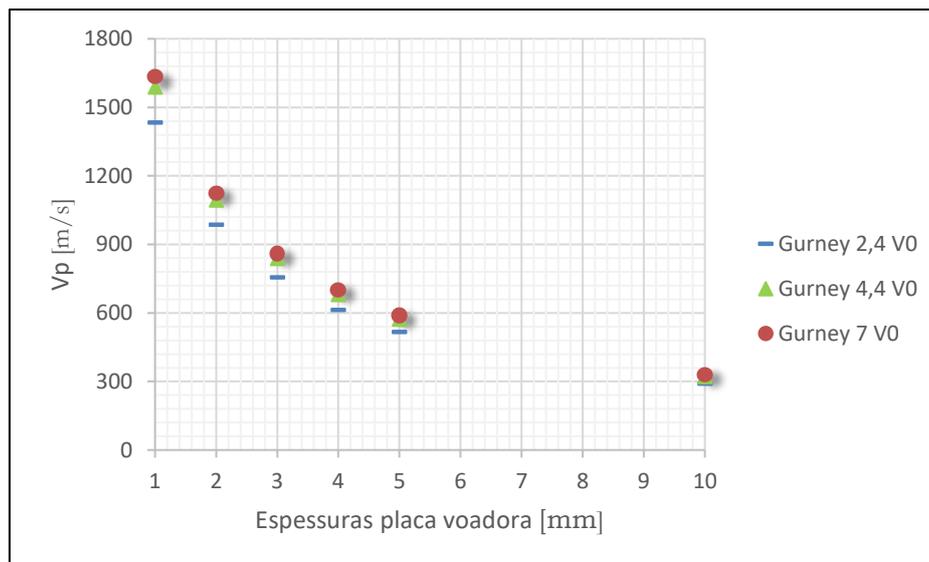


Figura 3.17 Evolução da velocidade terminal nos 3 estados de expansão em função da espessura da placa voadora

3.4.2.2. Velocidades de Gurney vs. Velocidades simulações numéricas

A análise seguinte tem como objetivo comparar os valores obtidos pelo programa de simulação numérica, com o modelo de *Gurney*. A figura 3.18 apresenta as velocidades de terminais e as velocidades relativas a cada estado de expansão selecionado, para cada espessura da placa voadora.

Pode-se concluir, que as velocidades retiradas do programa e as velocidades calculadas pelo modelo de *Gurney* são bastantes semelhantes e convergem à medida que a espessura da placa voadora aumenta.

Analisando melhor a figura, verifica-se também que para todas as espessuras, o estado de expansão que mais se aproxima das velocidades adquiridas através do programa *LS-DYNA 2D* é correspondente a 4,4 expansões. Isto significa que nos cálculos executados pelo

programa foi considerado um volume relativo aos produtos de detonação de aproximadamente 4,4 vezes o volume inicial do explosivo.

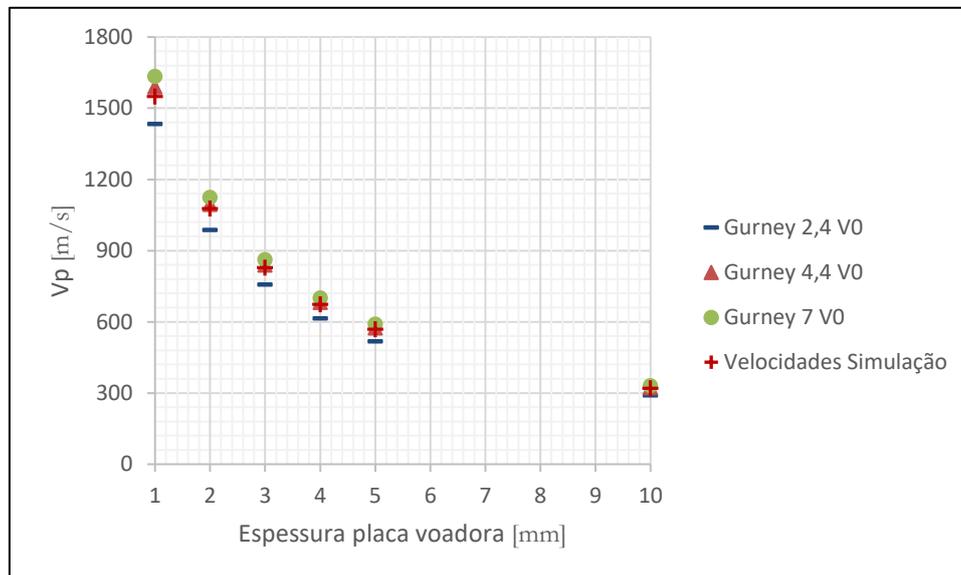


Figura 3.18 Comparação dos resultados numéricos com as velocidades de Gurney

3.4.2.3. Ângulo de expansão

Através da figura 3.19, verifica-se que o ângulo de expansão é pequeno, independentemente da espessura. Conclui-se, que a componente y da velocidade de impacto terminal apresenta um valor residual em comparação com a componente z.

A figura permite também verificar, que, para espessuras mais elevadas o ângulo de expansão é cada vez menor.

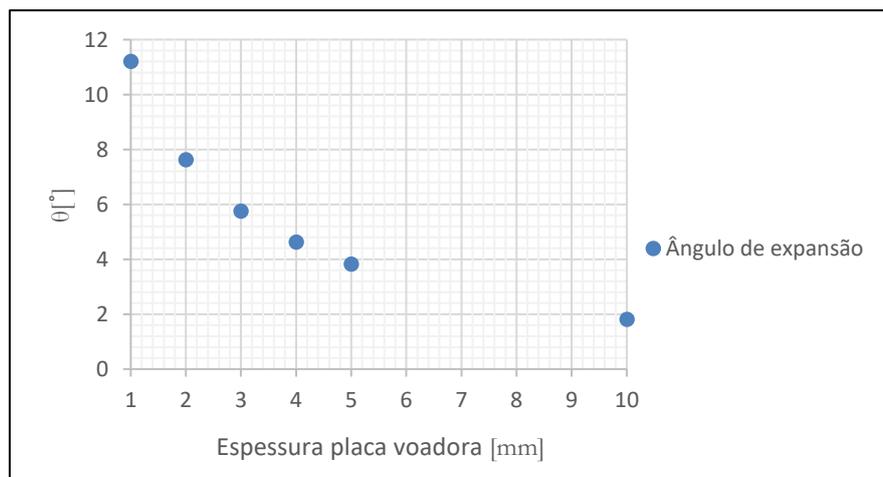


Figura 3.19 Evolução do ângulo de expansão em função da espessura da placa voadora

3.4.2.1. Distâncias de aceleração

Os resultados indicados na figura 3.20 representam a distância percorrida pela placa voadora quando sujeita a uma aceleração provocada pelos produtos da detonação do explosivo. Para isso, foi estabelecido que a placa voadora deve colidir com a paca base com uma velocidade de aproximadamente 90% da velocidade terminal, como já foi dito anteriormente. Os dados permitem concluir que com o aumento da espessura da placa voadora, a distância de aceleração diminui.

Os resultados para cada espessura encontram-se também na figura 3.20.

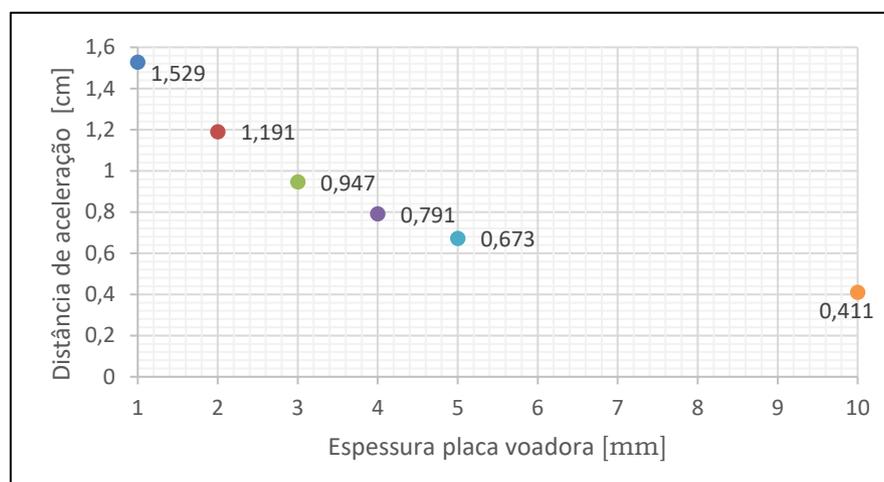


Figura 3.20 Distância de aceleração em função da espessura da placa voadora.

3.5. Configuração A-U-50/Cu(OHFC)

3.5.1. Descrição

A simulação desenvolvida nesta secção envolve um explosivo denominado de A-U-50, que pertence ao grupo de explosivos ANFO. O material da placa voadora é novamente o cobre (OHFC).

A espessura do explosivo foi, uma vez mais, fixada em 25 mm e as espessuras da placa voadora estudadas, foram exatamente as mesmas, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm e 10 mm. Os parâmetros que permitem definir o modelo de *Burn* para o explosivo A-U-50 encontram-se também disponíveis em anexo e foram conseguidos recorrendo ao artigo, Sanchidrián et al, (2015).

As conclusões a retirar desta configuração encontram-se disponíveis nas páginas seguintes. Os elementos analisados, foram exatamente os mesmos que na simulação precedida.

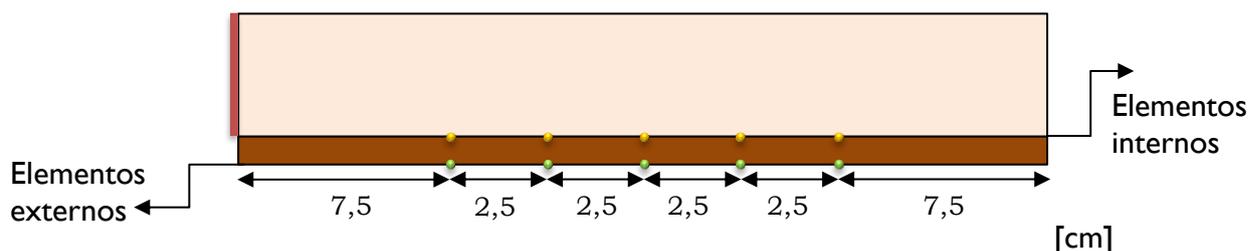


Figura 3.21 Representação esquemática dos elementos estudados

3.5.2. Resultados

3.5.2.1. Velocidade de Gurney

A análise de figura 3.21 revela uma diminuição gradual das velocidades de *Gurney* com o aumento da espessura da placa voadora. Esta tendência é observada nos 3 estados de expansão. Por último, as diferenças entre as velocidades relativas a cada estado de expansão diminuem à medida que se aumenta a espessura da placa voadora, tal como se observa na simulação Prillit A/Cu (OHFC).

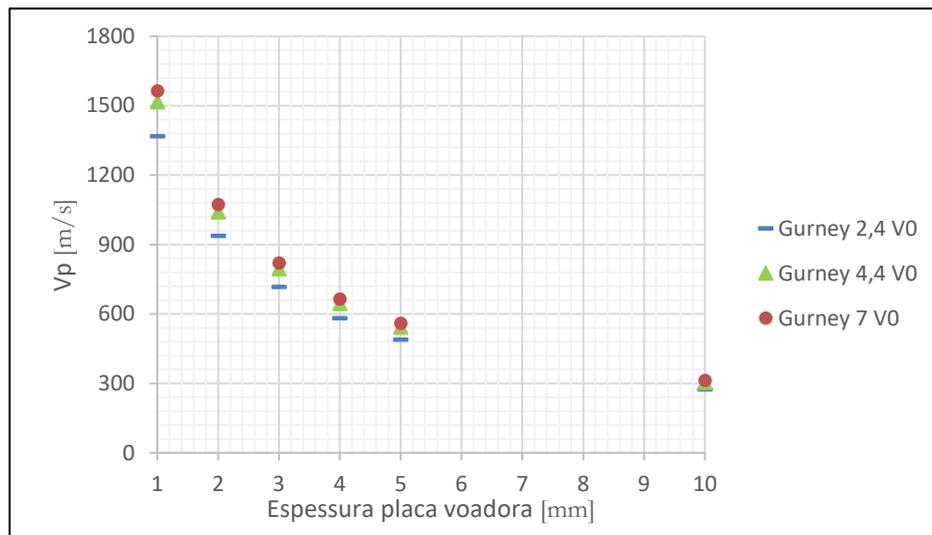


Figura 3.22 Evolução da velocidade terminal nos 3 estados de expansão em função da espessura da placa voadora

3.5.2.2. Velocidades de Gurney vs. Velocidades simulações numéricas

Seguidamente é feita uma comparação entre as velocidades terminais retiradas do programa e as velocidades calculadas pelo modelo de *Gurney* para os 3 estados de expansão. A figura 3.23 demonstra que os resultados são bastantes parecidos para todas as espessuras em estudo e que todos os valores convergem com o aumento da espessura da placa voadora. O estado de expansão que melhor se identifica com os resultados das simulações numéricas, encontra-se compreendido entre as 2,4 e 4,4 expansões, isto significa que o programa tem em conta um volume de expansão para os produtos de detonação dentro dos valores referidos.

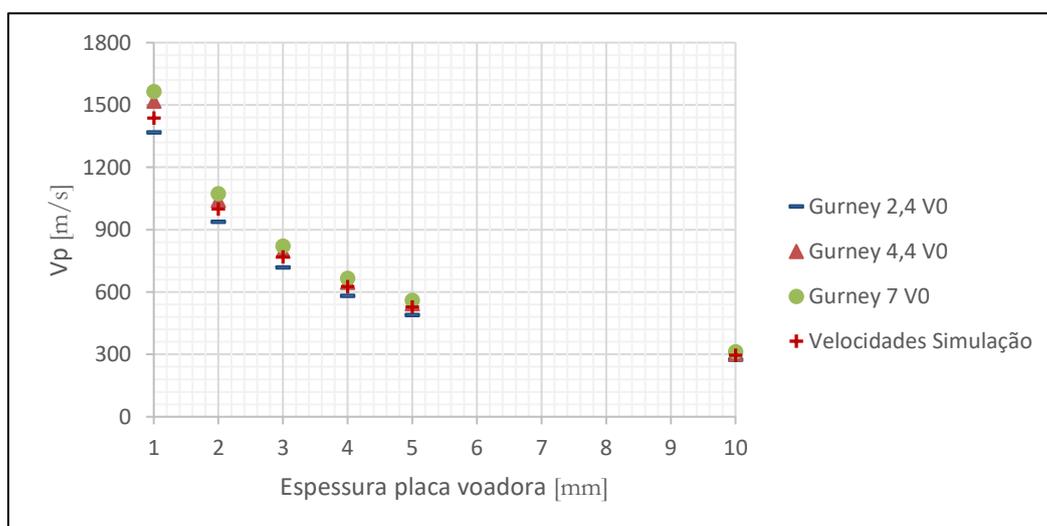


Figura 3.23 Comparação dos resultados numéricos com as velocidades de *Gurney*

3.5.2.3. Ângulo de expansão

Pode-se constatar através da figura 3.24, que o ângulo de expansão diminui com o aumento da espessura da placa voadora.

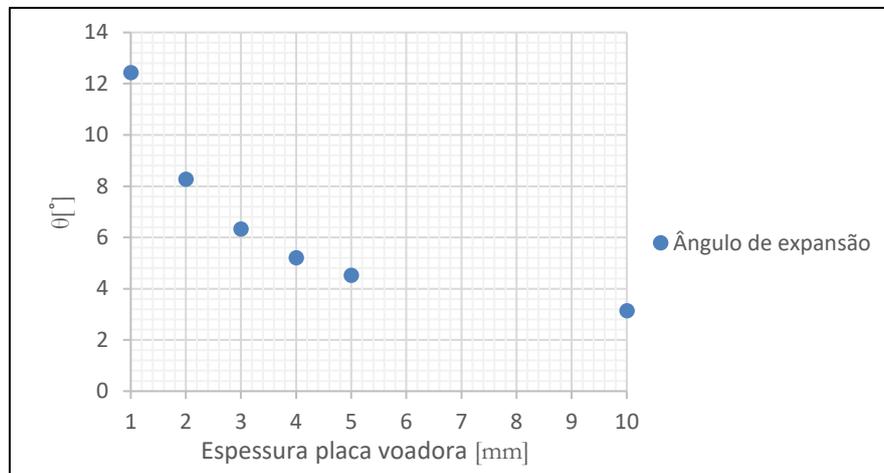


Figura 3.24 Evolução do ângulo de expansão em função da espessura da placa voadora

3.5.2.4. Distâncias de aceleração

A partir da figura 3.25 verifica-se que, aumentando a espessura da placa voadora a distância de aceleração promovida pelo explosivo sobre a placa voadora, diminui. Os valores podem também ser consultados na figura 3.24.



Figura 3.25 Distância de aceleração em função da espessura da placa voadora.

3.6. Configuração A-U-50/AA 6082-T6

3.6.1. Descrição

O seguinte estudo incidiu numa configuração em que o explosivo utilizado é novamente o A-U-50 e para a placa voadora optou-se por a liga de alumínio AA 6082-T6. Esta liga apresenta uma boa resistência à corrosão, boas características de soldadura, plasticidade e um preço económico.

Uma vez mais, as espessuras da placa voadora analisadas foram 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm e 10 mm. No entanto, nesta configuração, promoveu-se também a variação da espessura do explosivo (20 mm, 25 mm e 30 mm) com o objetivo de ficar a conhecer o comportamento da velocidade terminal com a variação do explosivo. Para definir o modelo de material *Johnson-Cook* da liga de alumínio, os parâmetros foram retirados do artigo Dan Birsan et al, (2011). Os parâmetros da equação de *Grüneisen*, equação de estado que foi associada ao modelo *Johnson-Cook*, foram adquiridos do artigo M.K. Mohd Nor, (2016). Todos os parâmetros encontram-se disponibilizados em anexo para consulta.

A localização dos elementos que permitiu alcançar os resultados descritos nas páginas seguintes, é visível na figura 3.26.

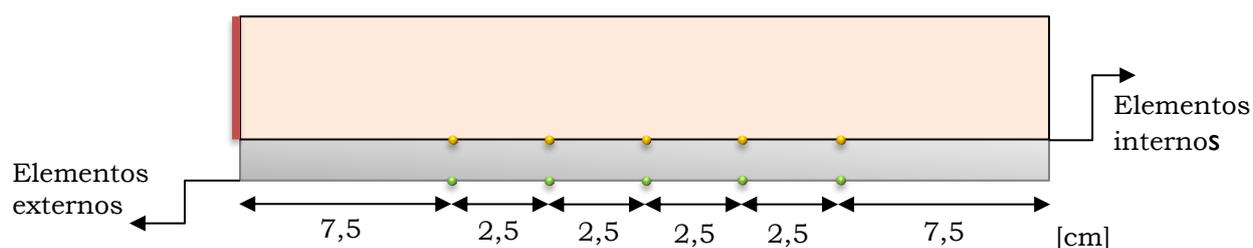


Figura 3.26 Representação esquemática dos elementos estudados

3.6.2. Resultados

3.6.2.1. Velocidades de Gurney

O procedimento que se segue consiste na apresentação das velocidades *Gurney* relativas aos 3 estados de expansão para as configurações em análise.

Na figura encontra-se referidos os dados para uma espessura de 20 mm de explosivo, e verifica-se uma vez mais, a mesma tendência que nas configurações Prillit A/Cu(OHFC) e A-U-50/Cu(OHFC), as velocidades de *Gurney* para os 3 estados de expansão diminuem com o aumento da espessura da placa voadora e os dados relativos a cada expansão convergem com o aumento da espessura da placa voadora.

A mesma análise pode ser aplicada para as configurações de 25 mm e 30 mm de espessura de explosivo. Os valores estão disponibilizados na figura 3.38 e na figura 3.29, respetivamente.

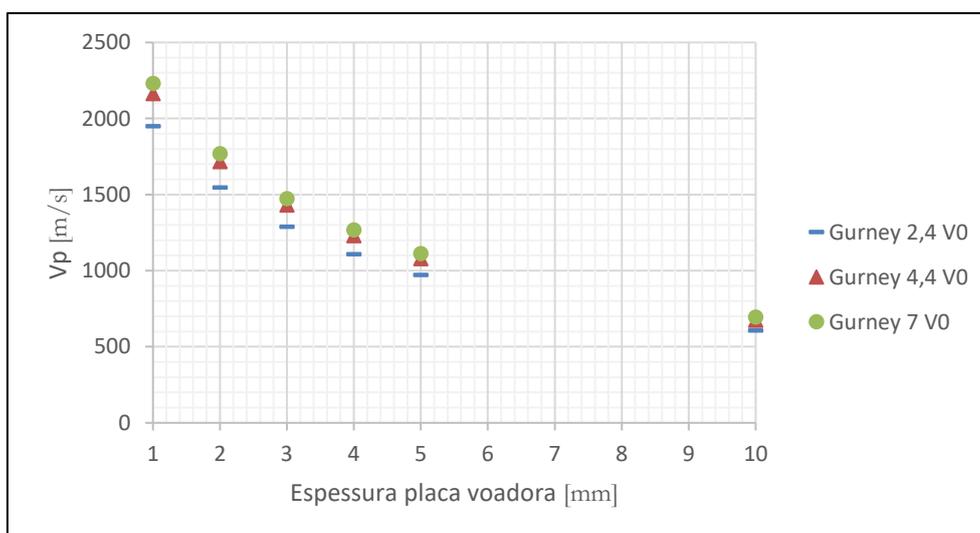


Figura 3.27 Evolução da velocidade terminal nos 3 estados de expansão em função da espessura da placa voadora para 20 mm de explosivo



Figura 3.28 Evolução da velocidade terminal nos 3 estados de expansão em função da espessura da placa voadora para 25 mm de explosivo

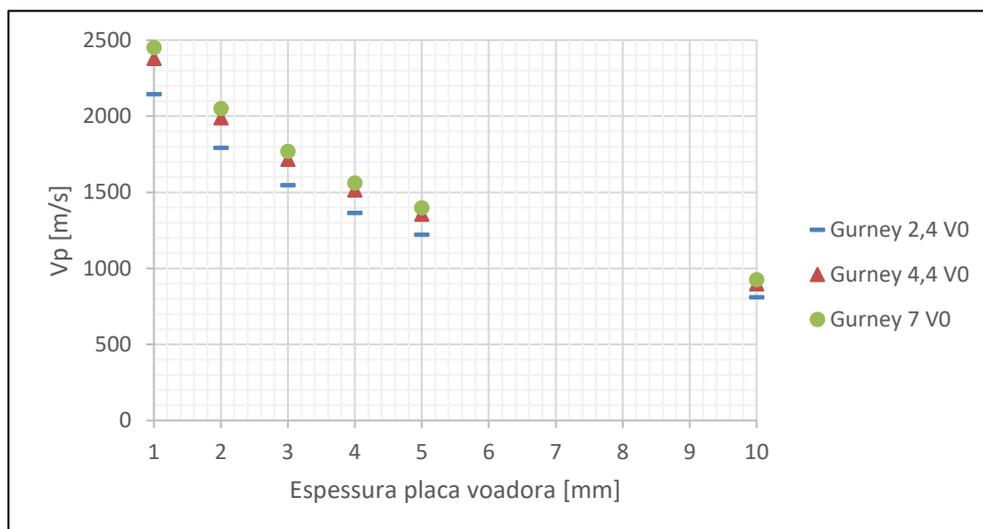


Figura 3.29 Evolução da velocidade terminal nos 3 estados de expansão em função da espessura da placa voadora para 30 mm de explosivo

3.6.2.2. Velocidades de Gurney vs. Velocidades simulações numéricas

Nas figuras 3.30, 3.31, 3.32 compara-se as velocidades de *Gurney* dos 3 estados de expansão, com os resultados adquiridos pelo programa de simulação numérica. A figura 3.30 é referente a uma espessura de 20 mm de explosivo, a figura 3.31 a uma espessura de 25 mm de explosivo e a figura 3.32 apresenta 30 mm de espessura de explosivo.

Pode-se constatar, que nos 3 casos, os resultados obtidos pelo modelo energético e pelo programa são bastante semelhantes, e que à medida que a espessura da placa voadora aumenta, a velocidade terminal diminui. Observa-se também uma convergência dos valores com o aumento da espessura da placa voadora. Tais resultados já foram descritos em configurações anteriores.

De acordo com a figura 3.30, o estado de expansão que melhor se identifica com os resultados numéricos para 20 mm de espessura do explosivo, encontra-se compreendido entre as 2,4 e 4,4 expansões. Esta conclusão pode ser aplicada às restantes espessuras analisadas do explosivo, contudo, verifica-se que a tendência é de uma aproximação às 2,4 expansões à medida que a espessura do explosivo aumenta.

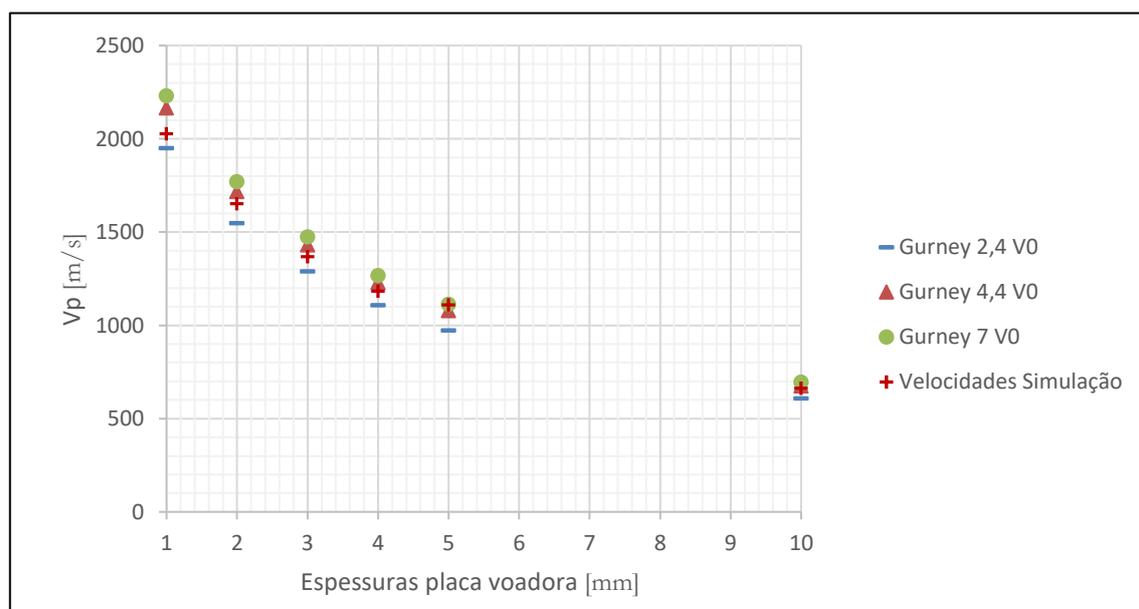


Figura 3.30 Comparação dos resultados numéricos com as velocidades de Gurney para 20 mm de espessura de explosivo



Figura 3.31 Comparação dos resultados numéricos com as velocidades de Gurney para 25 mm de espessura de explosivo

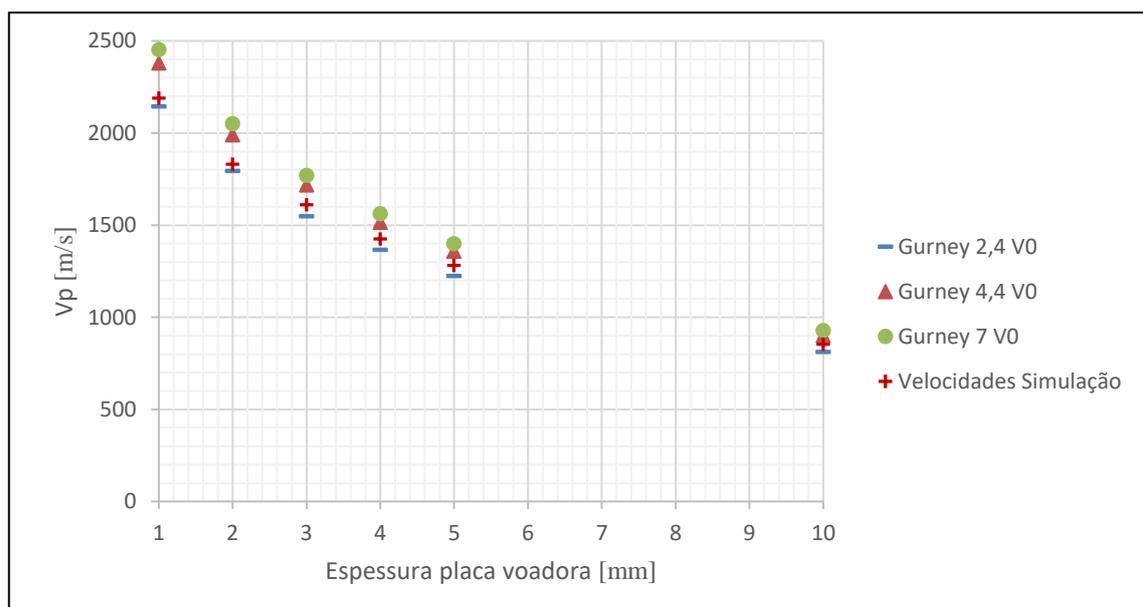


Figura 3.32 Comparação dos resultados numéricos com as velocidades de Gurney para 30 mm de espessura de explosivo

3.6.2.3. Ângulo de expansão

Pretende-se através da figura esclarecer o comportamento do ângulo de expansão, não só em função da espessura da placa voadora, como também em função da espessura do explosivo. É visível, que com o aumento da espessura da placa voadora, o ângulo de expansão diminui gradualmente, independentemente da espessura do explosivo. Contudo, verifica-se também, que com o aumento da espessura do explosivo o ângulo de colisão aumenta ligeiramente, condição visível em todas as espessuras da placa voadora.

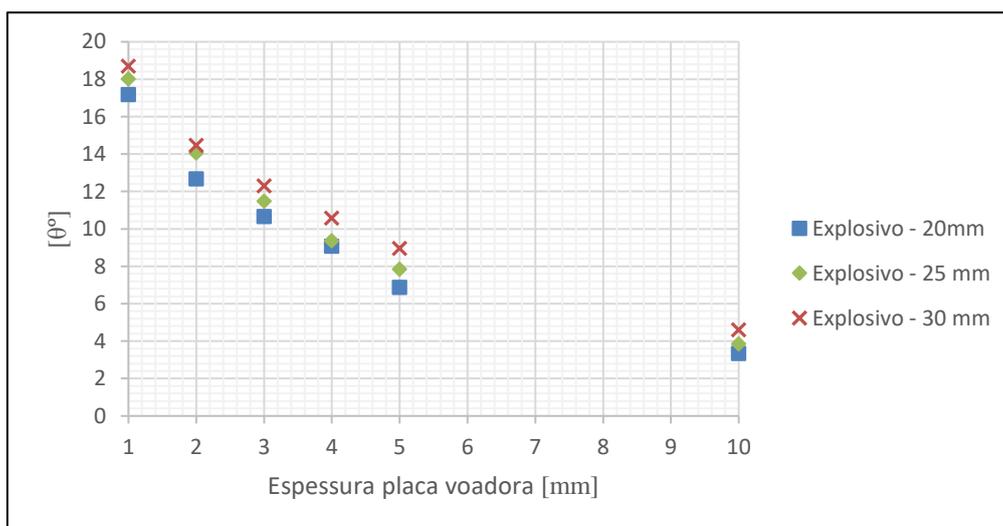


Figura 3.33 Evolução do ângulo de expansão em função da espessura da placa voadora

3.6.2.4. Distâncias de aceleração

Pelos dados da figura 3.34, conclui-se que com o aumento da espessura da placa voadora, a distância de aceleração diminui. Também é notório que a espessura do explosivo influencia este valor, uma vez que para espessuras mais elevadas o explosivo apresenta maior poder de aceleração e consequentemente a distância de aceleração é maior. Estas condições são verificadas em todas as espessuras da placa voadora.

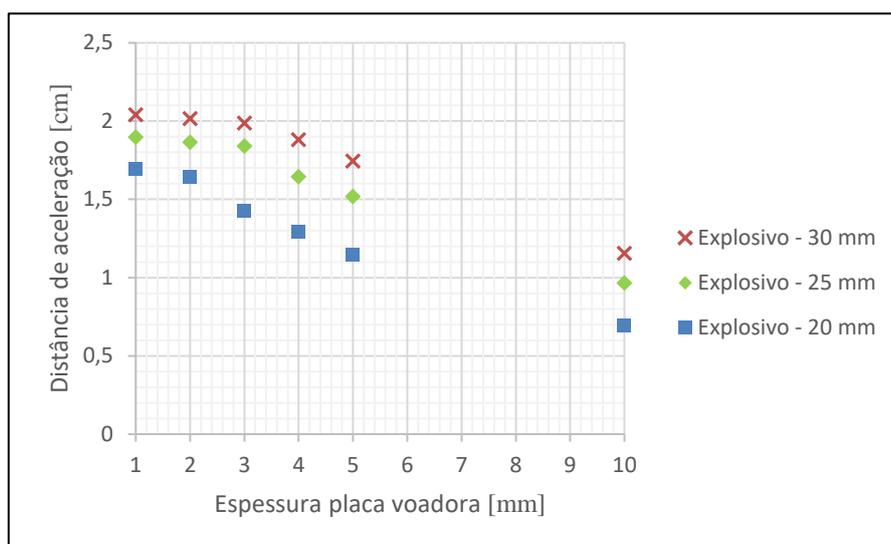


Figura 3.34 Distância de aceleração em função da espessura da placa voadora.

Na tabela 3.6 encontram-se disponibilizados os valores relativos a cada ponto da figura.

Tabela 3.6 Valores da distância de aceleração em função da espessura da placa voadora e do explosivo

Flyer [mm]	Espessura explosivo [mm]		
	30	25	20
	Distância de aceleração [cm]		
1	2,04	1,89	1,69
2	2,01	1,86	1,64
3	1,98	1,84	1,42
4	1,88	1,64	1,29
5	1,74	1,51	1,15
10	1,15	0,96	0,69

3.6.2.5. Localização da onda de detonação

O assunto a desenrolar foca-se num único elemento. O objetivo passa por localizar o posicionamento da onda de detonação para determinadas posições do elemento em estudo, ou seja, à medida que o elemento é deslocado contra a placa base, por força da aceleração provocada pelo explosivo, a onda de detonação avança consumindo a restante mistura fresca. Cabe a esta análise identificar a posição da onda de detonação para os deslocamentos selecionados. A figura 3.35 procura esclarecer melhor o assunto abordado.

Nela encontra-se representado a localização do elemento selecionado bem como identificados os deslocamentos alvos de estudo. Recorrendo ao gráfico (z, t) é possível não só identificar os deslocamentos, como também os instantes de tempo a que ocorrem. O passo seguinte passa por gerar uma curva (P, x) para cada instante e assim saber o posicionamento da onda de detonação para os diversos deslocamentos. O pico de pressão corresponde à localização da onda de choque.

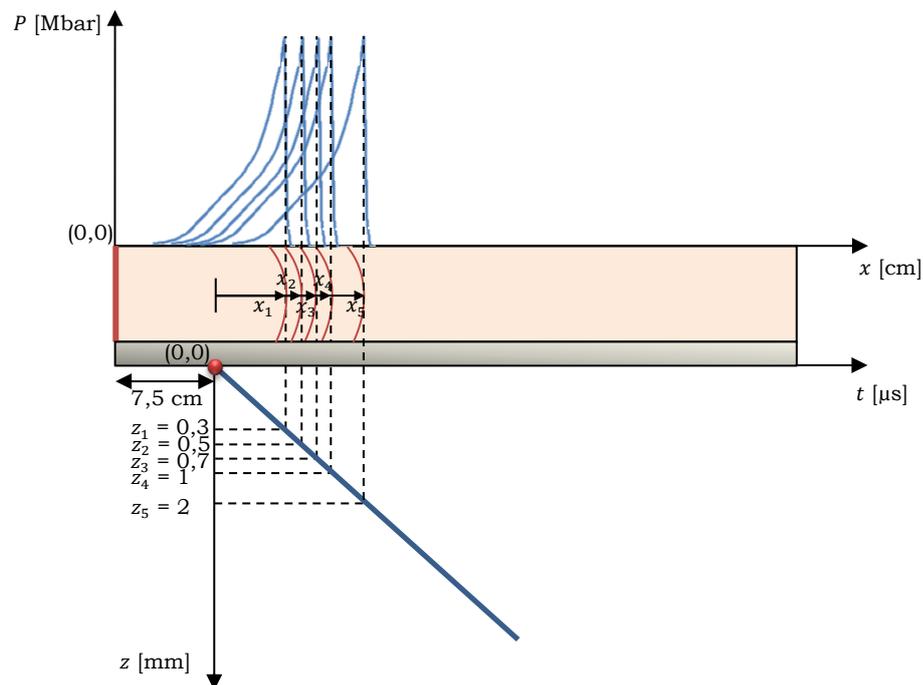


Figura 3.35 Representação esquemática da localização da onda de detonação

Antes da exposição dos resultados, convém salientar que a velocidade da onda de detonação é praticamente constante e pouco varia com a variação da espessura do explosivo. As diferenças verificadas devem-se provavelmente à espessura da placa voadora. Os resultados encontram-se apresentados nas figuras 3.36, 3.37, 3.38.

Verifica-se, que aumentando a espessura da placa voadora, a onda de detonação encontra-se mais avançada sendo visível nos 5 deslocamentos selecionados. Esta condição pode ser interpretada como uma maior inércia da placa voadora.

Por fim, com base nos dados adquiridos, não existem diferenças significativas a registrar quando se analisa a influência da espessura do explosivo.

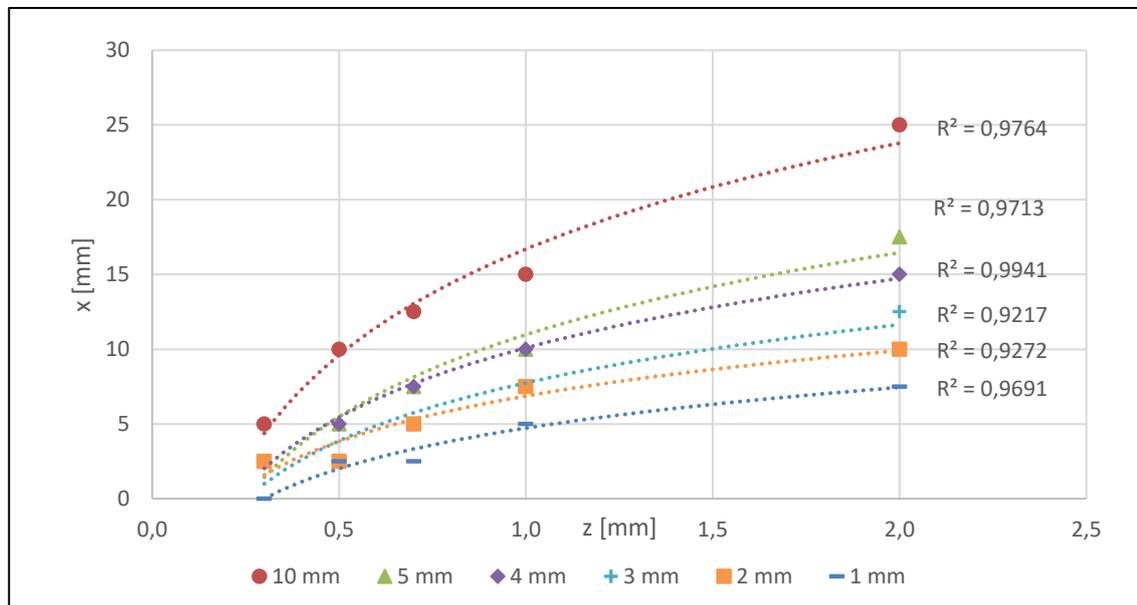


Figura 3.36 Localização da onda de detonação em função do deslocamento da placa voadora para 20 mm de explosivo

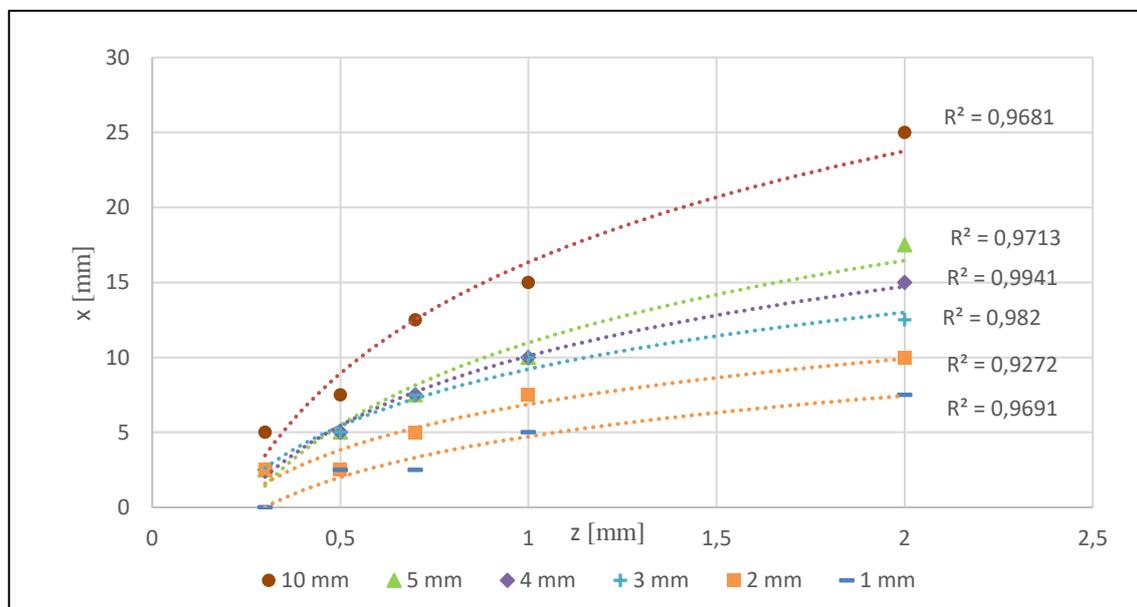


Figura 3.37 Localização da onda de detonação em função do deslocamento da placa voadora para 25 mm de explosivo

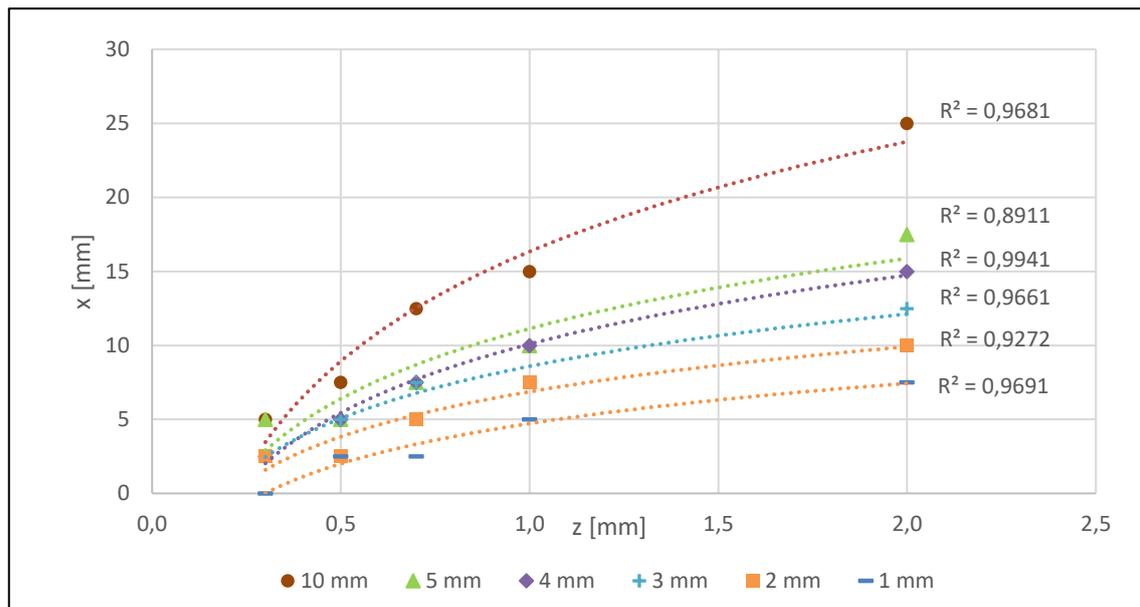


Figura 3.38 Localização da onda de detonação em função do deslocamento da placa voadora para 30 mm de explosivo

Tabela 3.7 Valores obtidos relativos à localização da onda de detonação em função da placa voadora e do explosivo

		Espessura Flyer						z [mm]
		1 mm	2mm	3mm	4mm	5mm	10mm	
Espessura Explosivo	20 mm	0,00	2,50	2,50	2,50	2,50	5,00	$z_1 = 0,3$
		2,50	2,50	2,50	5,00	5,00	10,00	$z_2 = 0,5$
		2,50	5,00	5,00	7,50	7,50	12,50	$z_3 = 0,7$
		5,00	7,50	7,50	10,00	10,00	15,00	$z_4 = 1$
		7,50	10,00	12,50	15,00	17,50	25,00	$z_5 = 2$
	25 mm	0,00	2,50	2,50	2,50	2,50	5,00	$z_1 = 0,3$
		2,50	2,50	5,00	5,00	5,00	7,50	$z_2 = 0,5$
		2,50	5,00	7,50	7,50	7,50	12,50	$z_3 = 0,7$
		5,00	7,50	10,00	10,00	10,00	15,00	$z_4 = 1$
		7,50	10,00	12,50	15,00	17,50	25,00	$z_5 = 2$
	30 mm	0,00	2,50	2,50	2,50	5,00	5,00	$z_1 = 0,3$
		2,50	2,50	5,00	5,00	5,00	7,50	$z_2 = 0,5$
		2,50	5,00	7,50	7,50	7,50	12,50	$z_3 = 0,7$
		5,00	7,50	7,50	10,00	10,00	15,00	$z_4 = 1$
		7,50	10,00	12,50	15,00	17,50	25,00	$z_5 = 2$

4. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE CONFIGURAÇÃO PLANA E DE DETONAÇÃO FRONTAL

4.1. Enquadramento

Este capítulo pretende realçar o comportamento das curvas de velocidade em configurações em que a detonação se inicia no topo do explosivo, para além de também procurar levar a um melhor entendimento da influência da variação da espessura do explosivo e da placa voadora na velocidade terminal. Uma vez mais, será feita uma comparação entre os resultados conseguidos nas simulações relativamente à velocidade terminal com os valores obtidos pelo modelo de *Gurney*.

Este assunto recai sobre uma configuração em que, repetidamente, o explosivo utilizado é o A-U-50 e a placa voadora é a liga de alumínio Al 6082-T6.

4.2. Calibração do modelo numérico

O comprimento do explosivo e da placa voadora foi fixado em 50 mm e a detonação inicia-se no topo do explosivo, como é observável na figura seguinte.

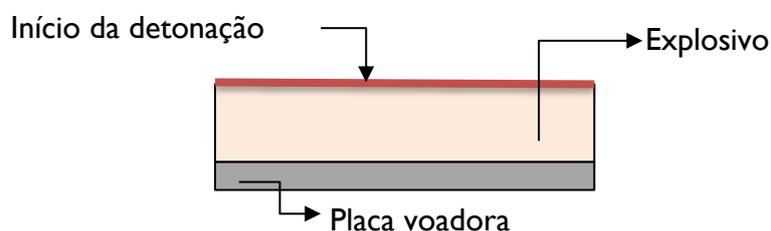


Figura 4.1 Representação esquemática de uma configuração plana de detonação de topo

Tal como no capítulo anterior, o modelo de *Burn* e a equação de estado JWL foram usados para definir empiricamente o explosivo, sendo que, e para a liga de alumínio Al 6082, utilizou-se o modelo *Johnson-Cook* e a equação de estado associada é a de *Grüneisen*.

Para esta simulação numérica, a malha do explosivo foi fixada em 2 elementos/mm, enquanto que, para a placa voadora o valor foi de 4 elementos/mm.

O intervalo de armazenamento, com que a diretoria *Orion* trabalha, foi pré-definido novamente, em 100 ns.

4.3. Procedimento

Todo o procedimento desenvolvido rege-se pelos mesmos passos apresentados no capítulo 3, por isso, por uma questão de simplificação não será apresentado nenhum exemplo. Contudo, é de salientar, que ao contrário do capítulo anterior, toda a análise foi direcionada em dois elementos, um elemento interno e um elemento externo. Na figura 4.2, é identificada a linha de detonação onde foram selecionados elementos para o cálculo da velocidade de detonação e a localização dos elementos em estudo. A análise seguidamente apresentada foca-se unicamente no elemento externo pois os resultados são muito muito semelhantes, como aconteceu no capítulo 3.



Figura 4.2 Representação esquemática dos elementos em estudo e a linha de detonação

4.4. Configuração A-U-50/AA 6082-T6

4.4.1. Descrição

Com o objetivo de conhecer a influência que a espessura da placa voadora tem na velocidade terminal, definiu-se um explosivo com 25 mm de espessura e promoveu-se a variação da placa voadora pelos seguintes valores: 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm e 10 mm. Por outro lado, o estudo da influência da espessura do explosivo incidiu numa placa de alumínio de 4 mm e os valores do explosivo foram: 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm e 50 mm. Segue-se a exposição dos resultados obtidos.

4.4.2. Resultados - Variação placa voadora

4.4.2.1. Velocidades de Gurney

Os 3 estados de expansão escolhidos foram novamente 2,4, 4,4 e 7 expansões. Os dados da figura 4.3 indicam que com o aumento da espessura da placa voadora dá-se uma diminuição gradual da velocidade nos 3 estados de expansão.

Tal como anteriormente, ocorre uma convergência de velocidades com o aumento da espessura da placa voadora.

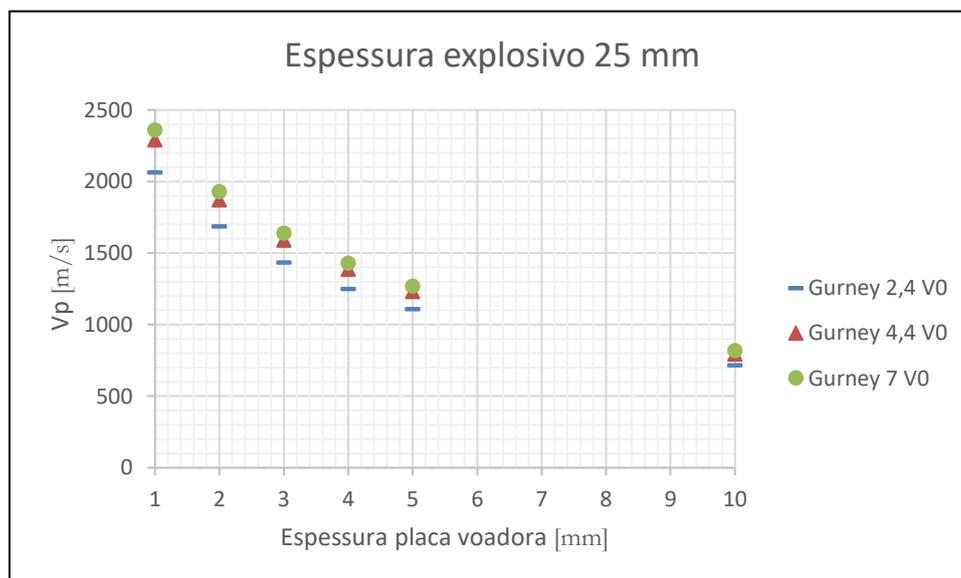


Figura 4.3 Evolução da velocidade terminal nos 3 estados de expansão em função da espessura da placa voadora

4.4.2.1. Velocidades de Gurney vs. Velocidades simulações numéricas

Observando a figura 4.4, ao comparar-se as velocidades obtidas pelo modelo de *Gurney* com as velocidades das simulações verifica-se uma semelhança em todas as espessuras da placa voadora. Além disso, é também visível uma convergência gradual dos valores com o aumento da espessura da placa voadora.

Analisando atentamente a figura 4.4, para uma placa voadora com 1 mm de espessura o estado de expansão que melhor se identifica é o de 7 expansões, já para uma placa voadora de 2 mm de espessura é o de 4,4 expansões, pelo que se constata que o estado de expansão que melhor se identifica com os resultados simulados, diminui gradualmente com o aumento da espessura da placa voadora.

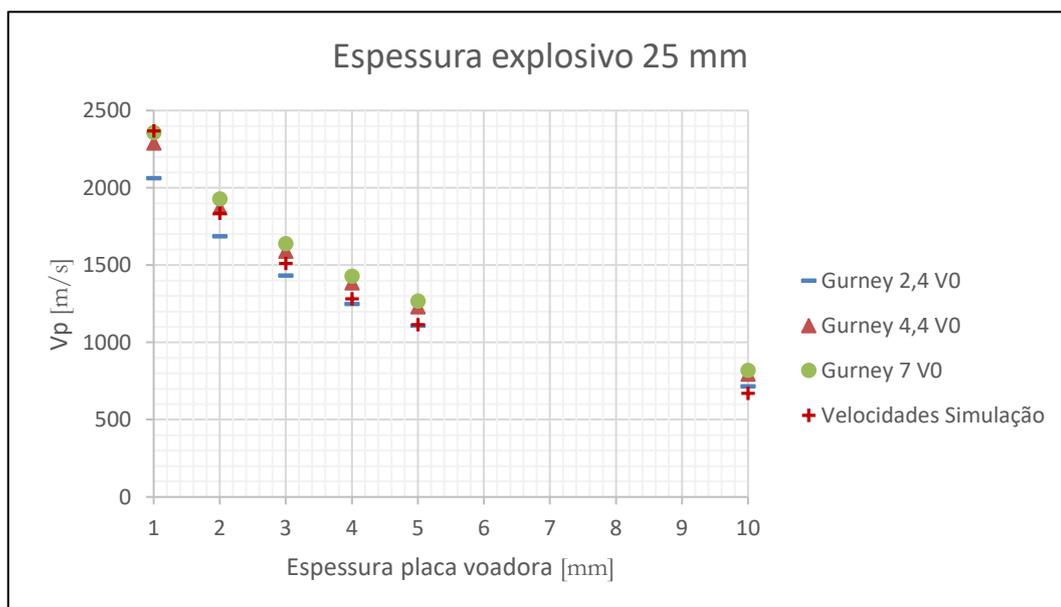


Figura 4.4 Comparação dos resultados numéricos com as velocidades de *Gurney*

4.4.3. Resultados - Variação explosivo

4.4.3.1. Velocidades de Gurney

De acordo com a figura 4.5, nos 3 estados de expansão ocorre um aumento das velocidades à medida que se aumenta a espessura do explosivo. Tal como nas simulações anteriores, as velocidades são mais elevadas para expansões maiores e isto é constatável em todas as espessuras do explosivo, contudo, as diferenças entre as velocidades alusivas a cada espessura do explosivo, aumentam com o aumento da espessura do explosivo

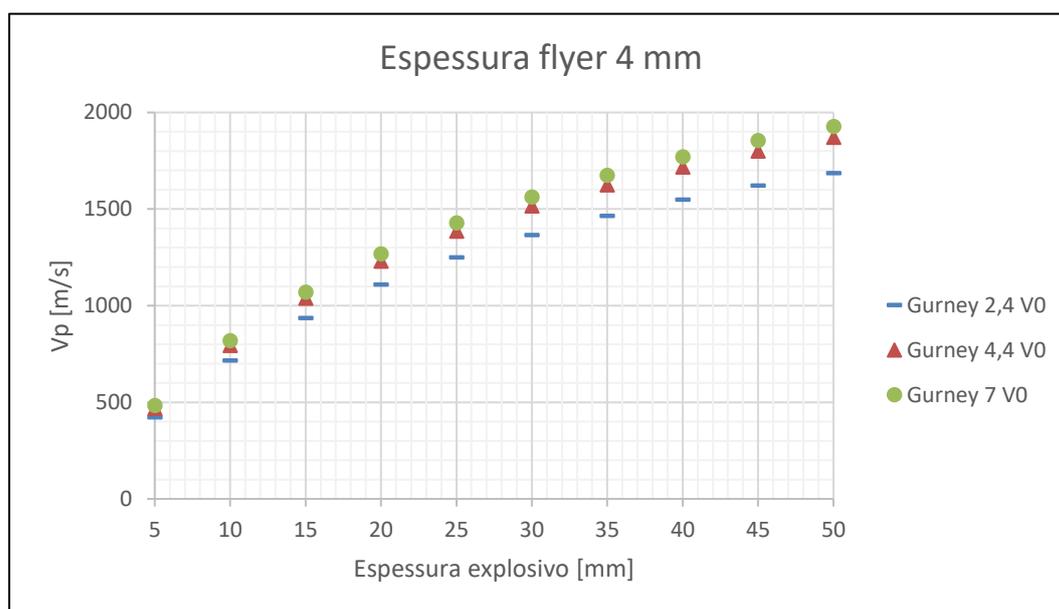


Figura 4.5 Evolução da velocidade de terminal nos 3 estados de expansão em função da espessura do explosivo

4.4.3.1. Velocidades de Gurney vs. Velocidades simulações numéricas

Pela figura 4.6 são visíveis concordâncias entre as velocidades provenientes das simulações numéricas e as velocidades calculadas pelo modelo de *Gurney* em todas as espessuras do explosivo. Constata-se, também, que o aumento da espessura do explosivo provoca uma divergência nos resultados.

Por fim, analisando em detalhe os dados da figura, comprova-se que não existe um estado de expansão que se identifique com todas as espessuras do explosivo, mas sim uma tendência. Por exemplo, para um explosivo com uma espessura de 5 mm, o estado de expansão identificativo é o de 7 expansões, para um explosivo de 25 mm de espessura a

expansão encontra-se entre as 2,4 e 4,4 expansões, já para um explosivo com 50 mm de espessura a expansão que melhor se identifica encontra-se bem abaixo das 2.4 expansões. Pode-se concluir que o estado de expansão que melhor se identifica com os resultados simulados, diminui com o aumento da espessura do explosivo.

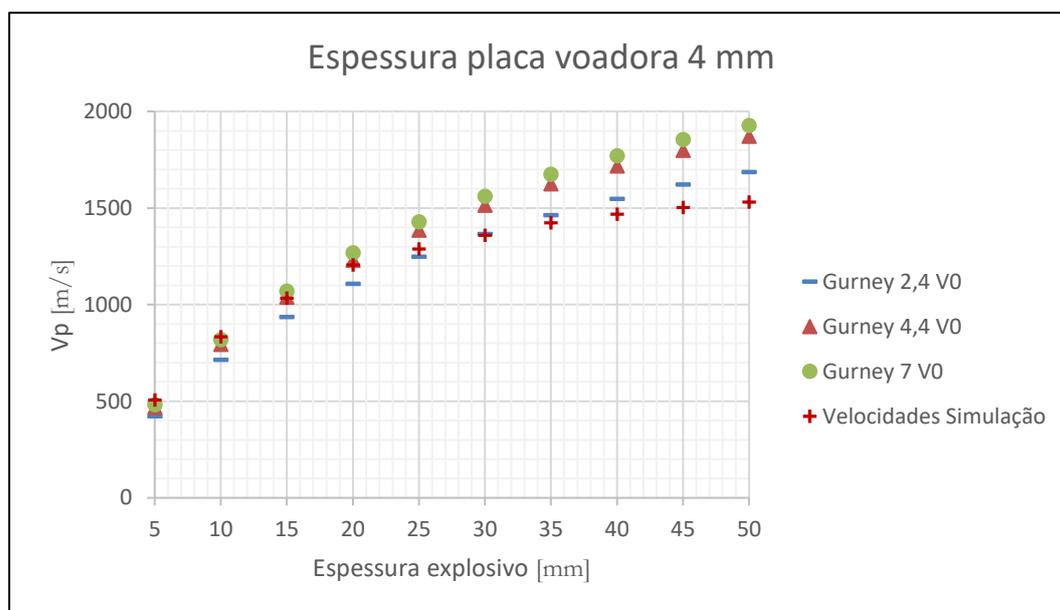


Figura 4.6 Comparação dos resultados numéricos com as velocidades de Gurney

4.4.4. Onda de choque

Na figura 4.7 encontram-se expostas as curvas de velocidade que permitiram obter os resultados relativos a uma configuração, em que a espessura do explosivo foi fixada em 25 mm, onde se promoveu a variação da espessura da placa voadora. É possível observar que as curvas apresentam um comportamento ondulatório. Este deve-se à existência de uma onda choque que é refletida na placa voadora.

Verifica-se que a espessura da placa voadora tem influência direta no comportamento da ondulação, uma vez que, o aumento da espessura da placa voadora leva a um aumento da amplitude da onda e a uma diminuição da frequência. É certo que, com o avançar do tempo, as amplitudes das ondas vão progressivamente diminuindo, o que se deve ao facto de a onda de choque perder energia.

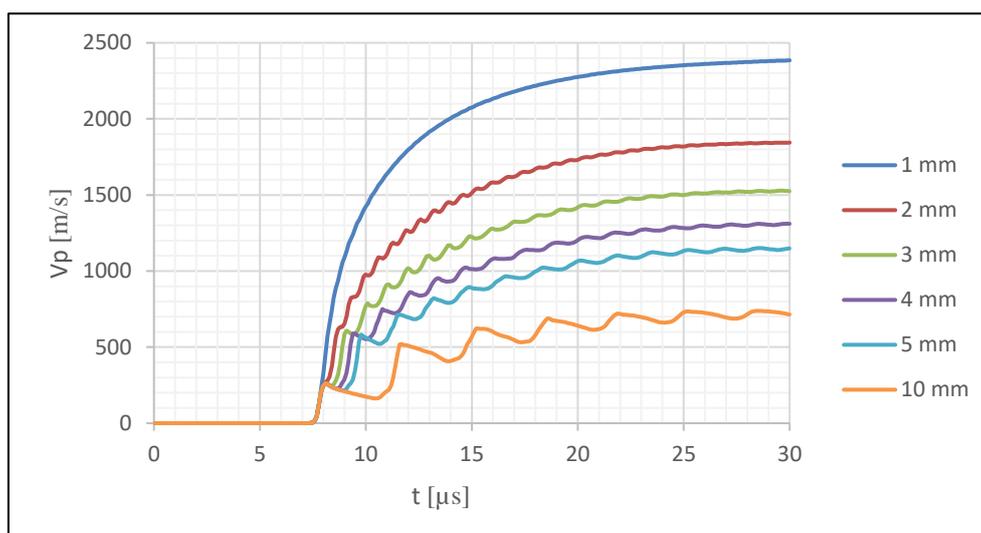


Figura 4.7 Comportamento ondulatório provocado pela onda de choque para diferentes espessuras da placa voadora

O assunto foi estudado promovendo-se também a variação da espessura do explosivo. Na figura 4.8 são apresentadas as curvas de velocidade para uma espessura em que a placa voadora foi definida em 4 mm. A espessuras do explosivo analisadas encontram-se indicadas na figura 4.8.

É possível observar que a amplitude e a frequência das ondas não são influenciadas pela espessura do explosivo, o que leva a querer que o comportamento das reflexões não é afetado pela espessura do explosivo. A perda de energia da onda de choque é demonstrada pela progressiva diminuição da amplitude da ondulação, tal como na figura 4.7

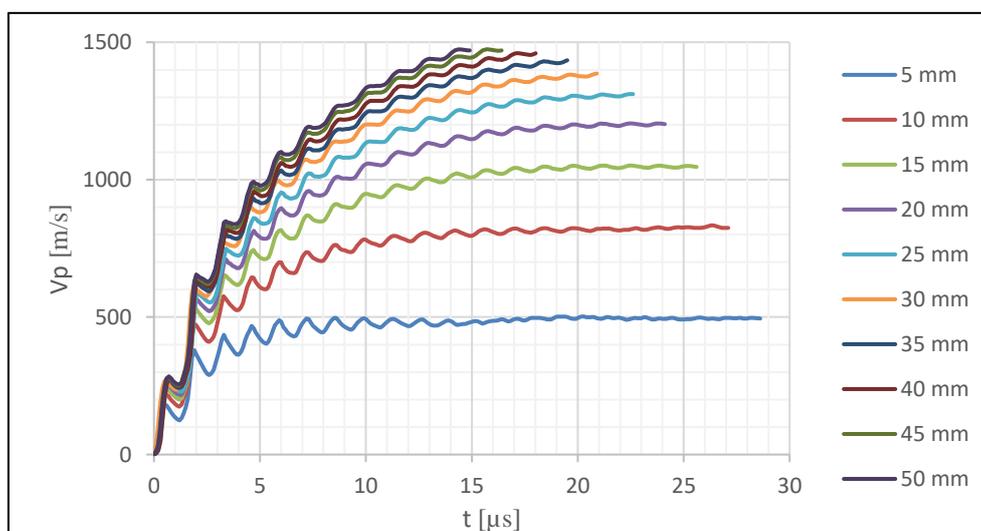


Figura 4.8 Comportamento ondulatório provocado pela onda de choque para diferentes espessuras do explosivo

5. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

A seguinte análise tem como finalidade validar os resultados dos capítulos anteriores. Para isso, foram executadas diversas simulações numéricas com o propósito de atingir os mesmos resultados alcançados por outras investigações

Inicialmente, recorrendo ao artigo Sanchidrián et al. (2015), desenvolveu-se uma configuração cilíndrica com o explosivo ANFO-Lambrit e uma placa voadora de cobre (OHFC). Na figura 5.1 a) é possível observar a geometria da configuração, bem como a localização do elemento estudado.

O objetivo consiste em avaliar a expansão da parede (raio) de cobre ao longo do tempo e comparar a curva de expansão obtida com os valores obtidos no artigo. Na figura 5.1 b) está representada a curva de expansão retirada do artigo e a curva obtida pelo processo de simulação numérica. Confirma-se que as curvas de expansão são semelhantes, logo, é seguro afirmar que existe uma boa representação raio-tempo para as simulações geradas.

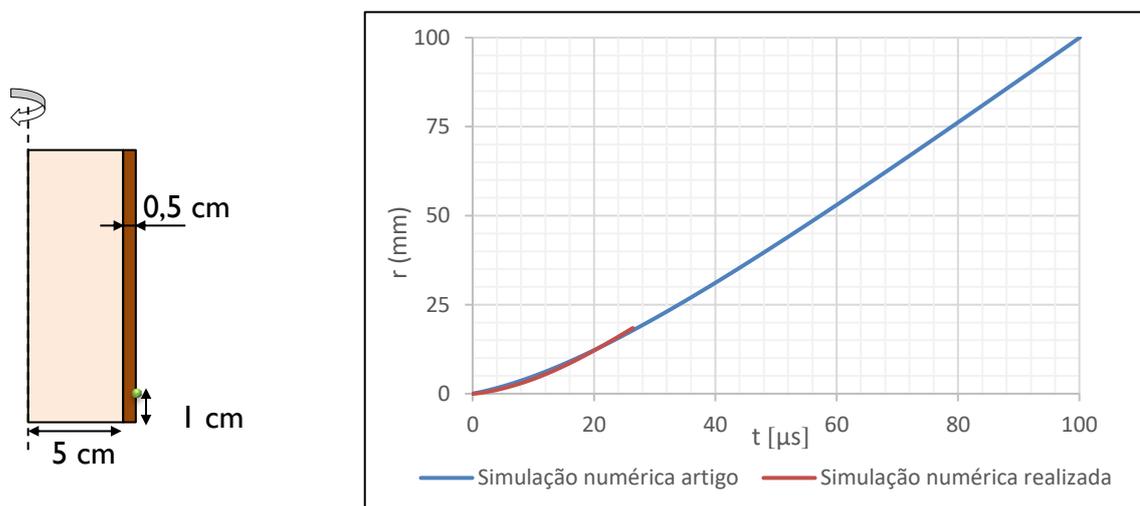


Figura 5.1 a) Representação esquemática de uma configuração cilíndrica, b) Comparação das curvas de expansão dos resultados simulados com os resultados do artigo

Desenvolveu-se também uma simulação numérica para uma configuração plana em que o explosivo utilizado foi o nitrometano, um explosivo líquido, e a placa acelerada foi uma liga de alumínio 6061-T6. A intenção passa por alcançar os mesmos resultados, que foram obtidos por via experimental e que se encontram disponíveis no artigo de (Loiseau et al., 2014).

O que se pretende comparar são os resultados experimentais do artigo relativos à curva da velocidade em que a espessura do explosivo é 24 mm e a placa voadora é 6 mm. Na figura 5.2, é visível a montagem experimental que foi realizada de acordo com artigo.

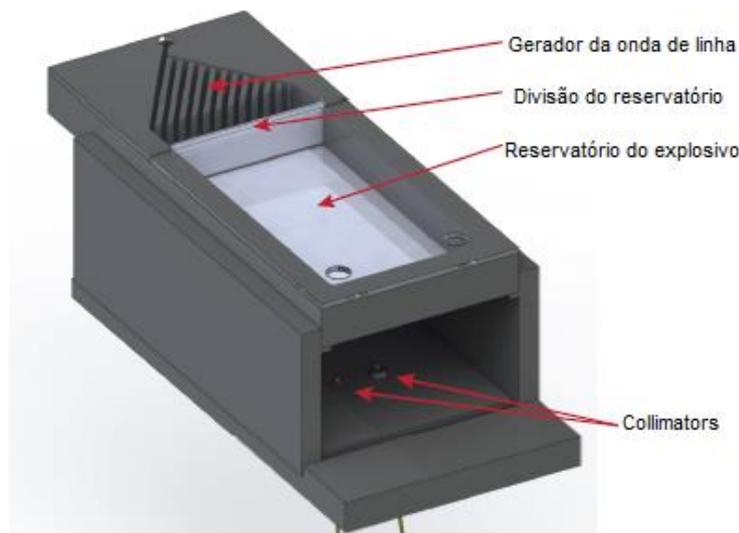


Figura 5.2 Representação esquemática da montagem experimental

Verifica-se, pela figura 5.3, que as curvas apresentam um crescimento muito semelhante, o que demonstra que os resultados simulados estão de acordo com os valores experimentais. É certo que as curvas atingem velocidades terminais diferentes, mas isso supõe-se que seja devido ao facto de o explosivo utilizado experimentalmente incluir 10 % DETA, enquanto que, o programa executa a simulação com o nitrometano puro.

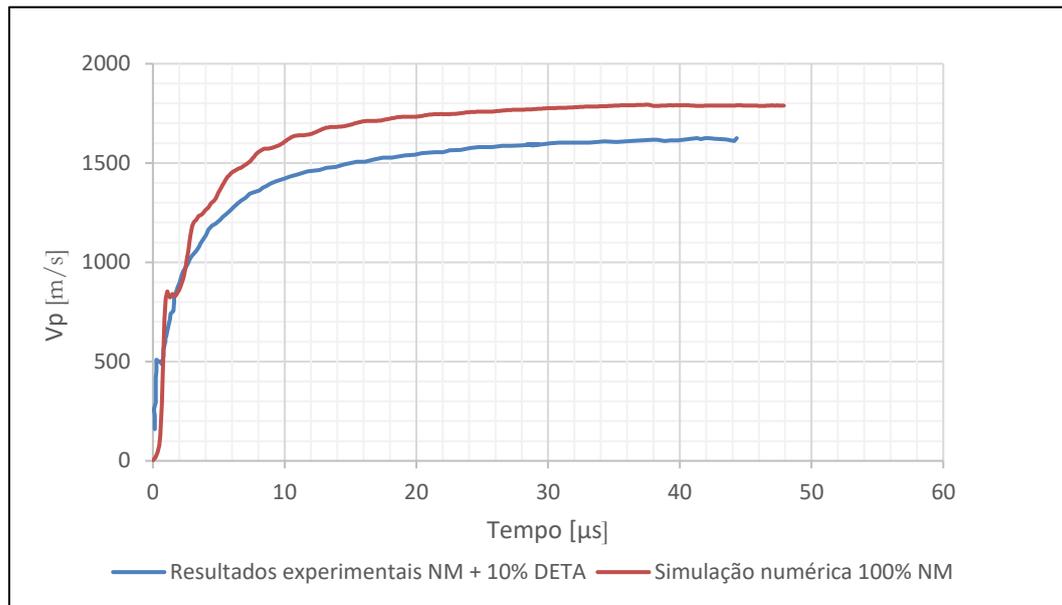


Figura 5.3 Comparação das curvas de velocidade dos resultados experimentais com os resultados adquiridos

Todo o procedimento analisado teve como função validar os resultados adquiridos nos capítulos 3 e 4. Convém referir que, os materiais não foram usados nos processos de simulação nem foram realizadas simulações cilíndricas, todavia, com base nestes resultados, é possível concluir que o programa permitiu a geração de dados com um bom grau de aceitação.

A última etapa do projeto consistia na realização de ensaios experimentais com o objetivo de alcançar, em determinadas configurações, os resultados observados pelo processo de simulação numérica. Contudo, por uma questão de tempo, não foi possível a execução dos ensaios. A caixilharia chegou a ser concluída, na figura 5.4 encontra-se representado um desenho relativo da mesma.

É possível observar a localização das fibras óticas que seriam utilizadas para medir a velocidade da placa voadora. Cada fibra seria colocada a uma distância do explosivo previamente definida e com a progressão da detonação, a placa voadora deslocar-se-ia no sentido das fibras. Estas permitem identificar o instante temporal da passagem da placa voadora.

Por fim, determinados pontos na curvas velocidade-deslocamento seriam alcançados.

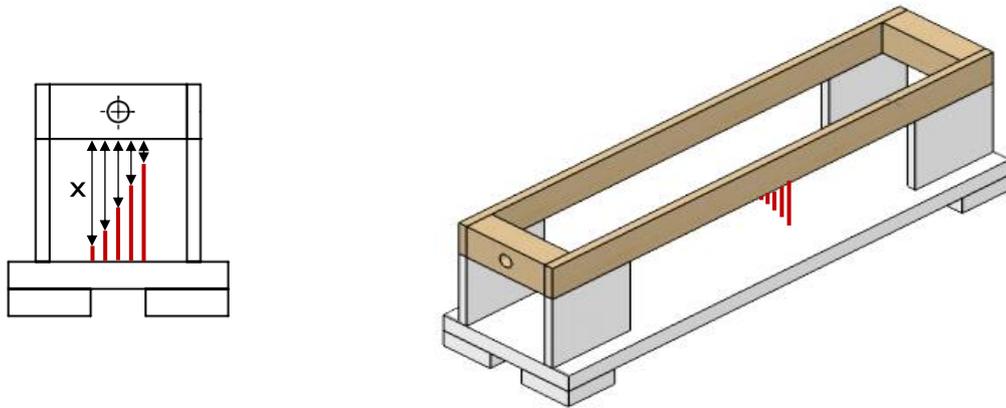


Figura 5.4 Representação esquemática da caixilharia

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principal objetivo avaliar para configurações planas, a evolução da velocidade através de simulações numéricas realizadas pelo software *LS-DYNA 2D*. A análise focou-se essencialmente em procurar entender a influência que a espessura do explosivo e a espessura da placa voadora provocam na velocidade. O estudo foi realizado para varias configurações.

Os valores numéricos foram comparados com o modelo de *Gurney*. O processo de iniciação da detonação também foi motivo de estudo. Foram realizadas simulações em que a detonação se inicia lateralmente e no topo do explosivo. Para detonações laterais a placa voadora variou entre 1 e 10 mm e a espessura do explosivo entre 10 e 30 mm. Para detonações frontais a espessura da placa voadora variou entre 1 e 10 mm enquanto que o explosivo variou entre 5 e 50 mm.

Para a configuração plana de detonação lateral Prillit A/Cu(OHFC), com 25mm de espessura de explosivo, observou-se que com o aumento da espessura da placa voadora a velocidade terminal diminui. Esta variou de valores na ordem dos 1550 m/s até 320 m/s. Os valores foram comparados com modelo de *Gurney* para 3 estados de expansão onde se verificou a existência de semelhanças nos resultados. Foi visível uma convergência de valores à medida que se aumentou a espessura da placa voadora, contudo, é necessário ter algum critério na escolha do estado de expansão para espessuras da placa voadora inferiores a 4 mm. Para todas as espessuras da placa voadora, o estado de expansão que melhor se identifica com os resultados numéricos é o de 4,4 expansões. Observou-se também que o ângulo de expansão diminui com o aumento da espessura da placa voadora, desde os 12° até 2°. Por último, o alcance da aceleração provocada pela expansão dos produtos da detonação, diminui com o aumento da espessura da placa voadora desde aproximadamente 1,53 cm até 0,41 cm.

Relativamente à configuração plana de detonação lateral A-U-50/Cu(OHFC), com 25 mm de espessura de explosivo, constatou-se que o aumento da espessura da placa voadora promove a diminuição da velocidade terminal que variou desde os 1437 m/s até aos 295

m/s. As velocidades terminais adquiridas pelo processo de simulação numérica foram comparadas com o modelo de *Gurney* para 3 estados de expansão. Foi possível observar a existência de semelhanças nos resultados. A diminuição da espessura da placa voadora provoca uma divergência nos resultados, por isso, a escolha do estado de estado de expansão, para espessuras de placa voadora inferiores a 4 mm, deve ser tida em consideração. O estado de expansão que melhor se identifica para todas as espessuras da placa voadora encontra-se compreendido entre as 2,4 e as 4,4 expansões. O ângulo de expansão diminui com o aumento da espessura da placa voadora e varia entre 12,5° e os 3°. A distância que a aceleração alcança diminui com o aumento da espessura da placa voadora entre 1,81 cm até 0,47cm.

Na configuração plana de detonação lateral A-U-50/AA 6082-T6, pôde-se observar que o aumento da espessura da placa voadora leva à diminuição da velocidade terminal, por outro lado, o aumento da espessura do explosivo eleva a velocidade terminal. Para uma espessura de 20 mm de explosivo, promovendo a variação da placa voadora, a velocidade terminal da placa varia entre os 2027 m/s e os 663 m/s. Usando uma espessura de 25 mm de explosivo a velocidade terminal, de acordo com os dados adquiridos, varia entre os 2148 m/s e os 768 m/s. Já para uma espessura de 30 mm, as velocidades variam entre 2189 m/s e os 854 m/s. Procedeu-se à comparação dos resultados numéricos com o modelo de *Gurney* para 3 estados de expansão onde foi possível verificar a existência de concordância. Ocorre uma convergência de resultados com o aumento da espessura da placa voadora e esta condição é visível para as 3 espessuras do explosivo estudadas. Verifica-se também que é necessário ter um certo cuidado na escolha do estado expansão para espessuras da placa voadora inferiores a 5 mm. O estado de expansão que melhor se identifica com os resultados numéricos encontra-se compreendido entre as 2,4 e 4,4 expansões e observa-se uma tendência de aproximação às 2,4 expansões com o aumento da espessura do explosivo. O ângulo de expansão diminui com o aumento da espessura da placa voadora, enquanto que, o aumento da espessura do explosivo, aumenta o ângulo de expansão. A título de exemplo, para uma espessura de uma placa voadora de 1 mm, o ângulo de expansão apresenta os seguintes valores: 18,6° (30 mm de espessura de explosivo), 18° (25 mm de espessura de explosivo) e 17,1° (20 mm de espessura de explosivo). A distância de aceleração diminui com o aumento da espessura da placa voadora. Aumentando a espessura do explosivo, a capacidade que o explosivo apresenta em acelerar a placa voadora aumenta. A localização

da onda de detonação em função do deslocamento da placa voadora também foi motivo de estudo. Observou-se que com aumento da espessura da placa voadora a onda de detonação encontra-se mais avançada, isto deve-se à maior inércia da placa voadora. A espessura do explosivo, de acordo com os dados adquiridos, não apresentou nenhuma influência na localização da onda de detonação.

Por fim, numa configuração plana de detonação frontal A-U-50/AA 6082-T6, analisou-se não só as velocidades terminais em função da espessura do explosivo e da espessura da placa voadora, como também se deu especial atenção às curvas de velocidade. Concluiu-se que o aumento da espessura do explosivo, para uma placa voadora de 4 mm, provocou o aumento da velocidade terminal sendo que as velocidades variam entre os 505 m/s e 1550 m/s. Observou-se a existência de uma concordância dos resultados numéricos com resultados adquiridos pelo modelo de *Gurney* para 3 estados de expansão, no entanto, o aumento da espessura do explosivo leva a uma divergência dos valores. O estado de expansão, para espessuras de explosivo superiores a 10 mm, deve ser tido em consideração. Ao aumentar-se a espessura da placa voadora verificou-se que a velocidade terminal diminui, desde os 2637 m/s até 670 m/s. Uma vez mais existe concordância nos resultados numéricos quando comparados com o modelo de *Gurney* sendo que para espessuras da placa voadora superiores a 5 mm é necessário ter em conta o estado de expansão selecionado. Ao analisar-se as curvas de velocidade pôde-se verificar que estas apresentam um comportamento ondulatório provocado por uma onda choque que é refletida na placa voadora. Em configurações em que a detonação se inicia lateralmente, este comportamento não foi observado, o que leva a querer que não existe a formação de uma onda de choque na direção da placa voadora. Pelos resultados adquiridos, chegou-se à conclusão que as reflexões da onda de choque dependem da espessura da placa voadora e da velocidade de detonação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akbari Mousavi, S. A. A., & Al-Hassani, S. T. S. (2008). Finite element simulation of explosively-driven plate impact with application to explosive welding. *Materials and Design*, 29(1), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.12.012>
- Asay, J. R., & Shahinpoor, M. (1993). Equation of State. High-Pressure Shock Compression of Solids. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0911-9_4
- Birsan, D. A. N., Scutelnicu, E., & Visan, D. (sem data). Behaviour Simulation of Aluminium Alloy 6082-T6 during Friction Stir Welding and Tungsten Inert Gas Welding. *Recent Advances in Manufacturing Engineering*, 103–108. Obtido de <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2011/Barcelona/MEQAPS/MEQAPS-17.pdf>
- Durgutlu, A., Gülenç, B., & Findik, F. (2005). Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding. *Materials and Design*, 26(6), 497–507. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.07.021>
- Findik, F. (2011). Recent developments in explosive welding. *Materials and Design*, 32(3), 1081–1093. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.10.017>
- Fish, J., Fan, R., Monitor, P., & June, R. B. (2005). AL 6061-T6 - Elastomer Impact Simulations. *Simulation*.
- Ghomi, M. T. (2009). Impact wave process modeling and optimization in high energy rate explosive welding. Obtido de <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:232277>
- Gois, J. C. (2016). Risco de explosões em instalações industriais.
- Gulenc, B. (2008). Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method. *Materials and Design*, 29(1), 275–278. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.11.001>
- Hallquist, J. O. (1996). An Input Generator for DYNA2D, NIKE2D, TOPA2Dd, and CHEMICAL TOPA2D - User Manual.
- Hallquist, J. O., & L. Levatin, J. (1982). An interactive color post-processor for two dimensional finite element codes.
- Knorr, K., Loidl, A., & Kjems, J. K. (1981). Condensed Matter (Vol. 292).
- Lee, E., Finger, M., & Collins, W. (1973). JWL equation of state coefficients for high explosives, UCID-16189. <https://doi.org/10.2172/4479737>
- Loiseau, J., Petel, O. E., Huneault, J., Serge, M., Frost, D. L., & Higgins, A. J. (2014).

- Acceleration of plates using non-conventional explosives heavily-loaded with inert materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 500(18), 182027.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/500/18/182027>
- LSTC. (2017). LS-DYNA | Livermore Software Technology Corp. Obtido 8 de Julho de 2017, de <http://www.lstc.com/applications>
- Marcos, P., & Tremonti, A. (2000). Processo de Soldagem por Difusão, 1–5.
- Mendes, R. (2000). Iniciação e Detonação de Explosivo Plástico de RDX. Universidade de Coimbra.
- Meyers, M. A. (1994). Dynamic Behaviour of Materials. (John Wiley & Sons, Ed.).
- Mohd Nor, M. K. (2016). Modelling inelastic behaviour of orthotropic metals in a unique alignment of deviatoric plane within the stress space. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 87(February), 43–57.
<https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2016.09.011>
- Mousavi, A. A. A., & Al-Hassani, S. T. S. (2005). Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 53(11), 2501–2528.
<https://doi.org/10.1016/j.jmps.2005.06.001>
- Popoff, A. A., & Casey, H. (1977). Applications of Explosion Welded Transition Joints. Wested '77 Conference, 49, 16.
- Sanchidrián, J. A., Castedo, R., López, L. M., Segarra, P., Santos, A. P., Politécnica, U., & Minas, D. M. E. T. S. I. (2015). Determination of the JWL Constants for ANFO and Emulsion Explosives from Cylinder Test Data. *Central European Journal of Energetic Materials*, 12(2), 177–194.
- Santos, N. (2013). Soldadura por explosivo em configuração plana de Alumínio-Cobre. Universidade de Coimbra.
- Silva, M. da G. S. de L. S. e. (2006). Caracterização da detonação de emulsões com e sem alumínio. Universidade de Coimbra.
- Vignjevic, R., Campbell, J. C., Bourne, N., Matic, O., & Djordjevic, N. (2007). Modelling shock waves in composite materials. *AIP Conference Proceedings*, 955(76), 287–290.
<https://doi.org/10.1063/1.2833033>
- Wang, Y., Beom, H. G., Sun, M., & Lin, S. (2011). Numerical simulation of explosive welding using the material point method. *International Journal of Impact Engineering*, 38(1), 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.08.003>
- Wronka, B. (2011). Testing of explosive welding and welded joints. Wavy character of the process and joint quality. *International Journal of Impact Engineering*, 38(5), 309–313.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.11.003>

Zhang, Y., Outeiro, J. C., & Mabrouki, T. (2015). On the selection of Johnson-Cook constitutive model parameters for Ti-6Al-4V using three types of numerical models of orthogonal cutting. *Procedia CIRP*, 31, 112–117.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.052>

ANEXO A

Tabela A.1 Parâmetros modelo de Burn, Explosivos. (Sanchidrián et al., 2015)

Explosivo	D [m/s]	P_{CJ} [GPa]	V_{CJ}	ρ_0 [kg/m ³]
Prillit A	3858	3,278	0,733	850
A-U-50	3233	2,206	0,746	830
Lambrit	4084	3,455	0,733	776

Em que:

- D – Velocidade de detonação;
- P_{CJ} – Pressão Chapam Jouguet;
- V_{CJ} – Volume Chapam Jouguet;
- ρ_0 – Densidade inicial;

Tabela A.2 Parâmetros EoS JWL, Explosivos.(Sanchidrián et al., 2015)

Explosivo	A [GPa]	B [GPa]	C [GPa]	R_1 -	R_2 -	E_0 [GPa]	ω -	V_0
Prillit A	266,799	3,435	0,240	7,037	1,159	1,731	0,39	1
A-U-50	216,044	1,838	0,153	7,162	0,865	1,562	0,34	1
Lambrit	203,582	2,973	0,389	6,651	1,127	2,049	0,39	1

Em que:

- $A, B, C, R_1, R_2, \omega$ – Constantes;
- E_0 – Energia interna inicial por unidade de volume inicial;
- V_0 – Volume relativo inicial;

Tabela A.3 Parâmetros modelo de Johnson / Cook Elastic-Plastic, Placas metálicas. (Birsan, Scutelnicu, & Visan, sem data; Fish, Fan, Monitor, & June, 2005; Sanchidrián et al., 2015)

Placa metálica	ρ_0 [kg/m ³]	G [GPa]	$\dot{\epsilon}_0$	A [MPa]	B [MPa]	n	C	m	T_f [K]	T_a [K]	C_p [J/(kg.K)]
Cu (OHFC)	8960	46	1	90	292	0,31	0,025	1,09	1356	293	383
AA 6061-T6	2700	29	1	289,6	203,4	0,35	0,011	1,34	925,37	294,26	896
AA 6082-T6	2700	26	1	285	94	0,41	0,002	1,34	861,15	298,15	935

Em que:

- A, B, n, C, m – Constantes; G – Módulo de rigidez; E – Módulo de Young; T_f – Temperatura de fusão; T_a – Temperatura ambiente; C_p – Capacidade térmica mássica; $\dot{\epsilon}_0$ – Taxa de deformação do material;

Tabela A.4 Parâmetros EoS Grüneisen, Placas metálicas. (Mohd Nor, 2016; Sanchidrián et al., 2015; Vignjevic, Campbell, Bourne, Matic, & Djordjevic, 2007)

Placa metálica	C [m/s]	s_1 -	s_2 -	s_3 -	Γ -	a -	V_0 -	E_0
Cu (OHFC)	3910	1,51	0	0	2,49	0,47	1	0
AA 6061-T6	5240	1,4	0	0	1,97	0,48	1	0
AA 6082-T6	5240	1,4	0	0	1,97	0,48	1	0

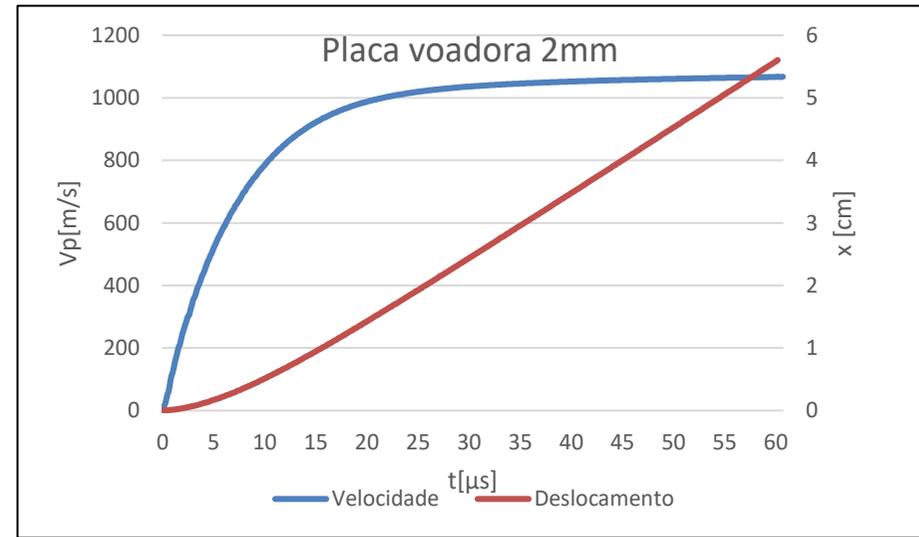
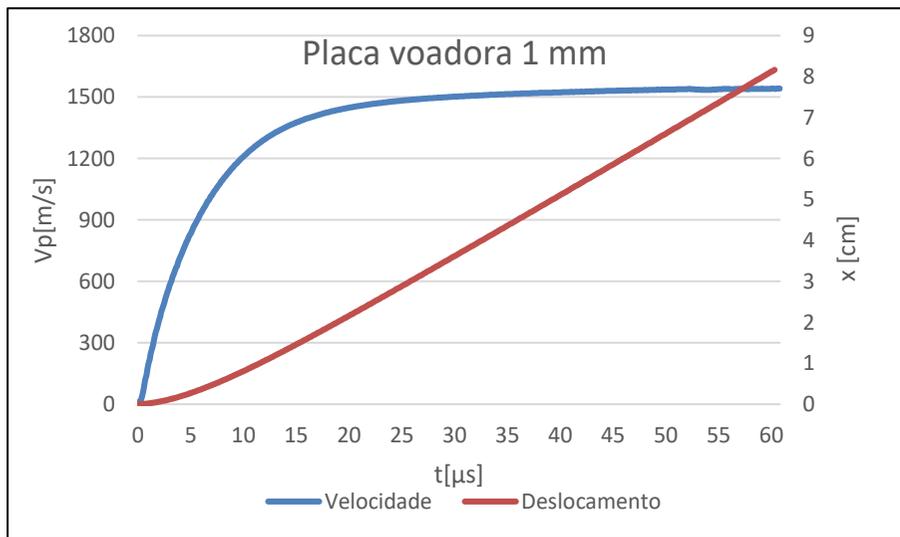
Em que:

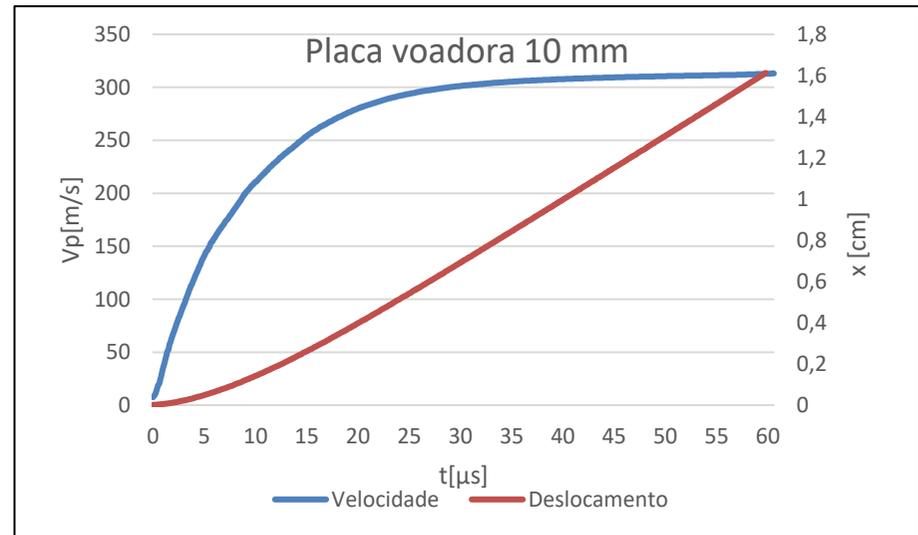
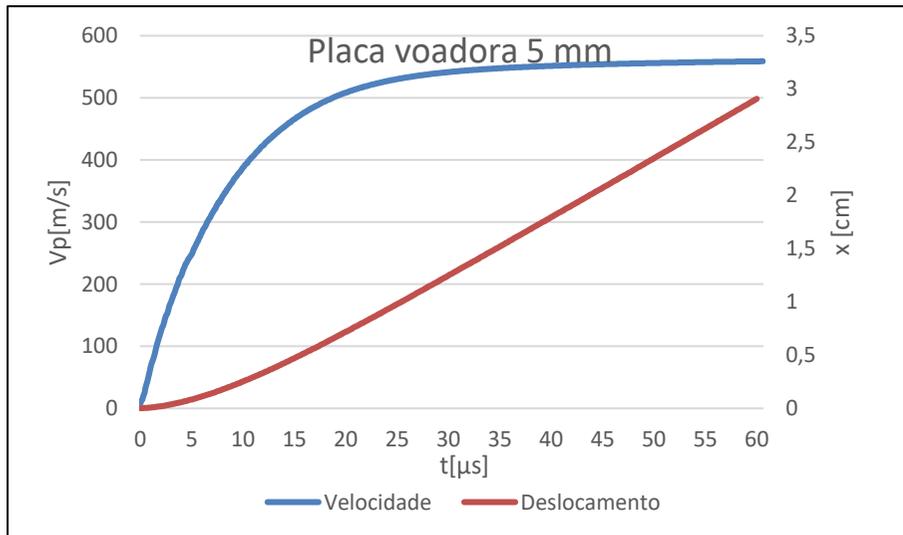
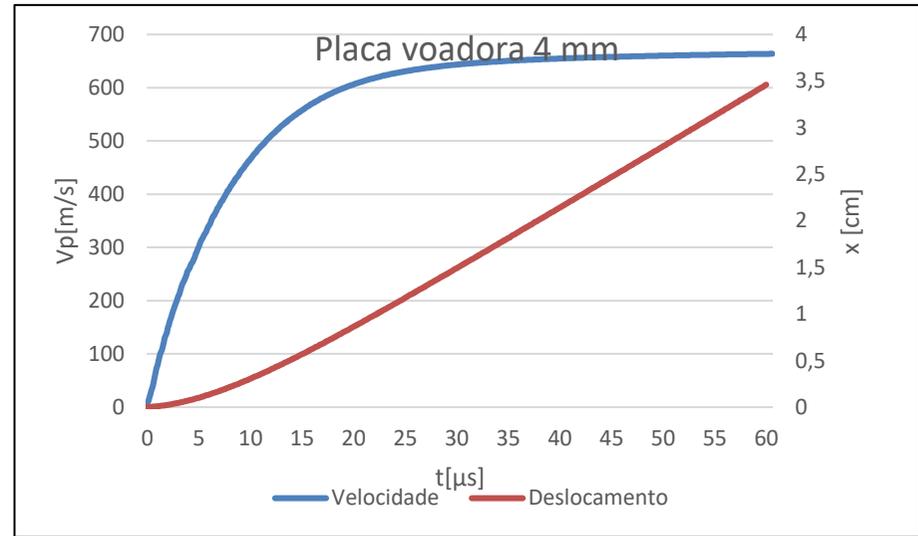
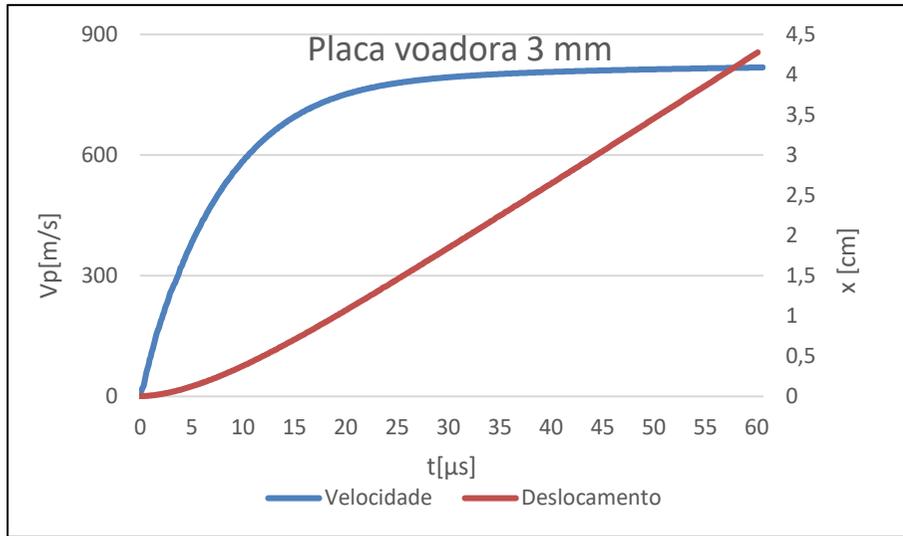
- s_1, s_2, s_3 – Coeficientes de declive da curva ($v_s - v_p$);
- C – Valor da intersecção da curva ($v_s - v_p$);
- Γ – Coeficiente de Grüneisen;
- a – Coeficiente de correção do volume de primeira ordem;
- V_0 – Volume relativo inicial;
- E_0 – Energia interna inicial por unidade de volume inicial;

ANEXO B

Curvas velocidade-deslocamento

Configuração plana; Prillit A/Cu(OHFC); Espessura explosivo 25 mm

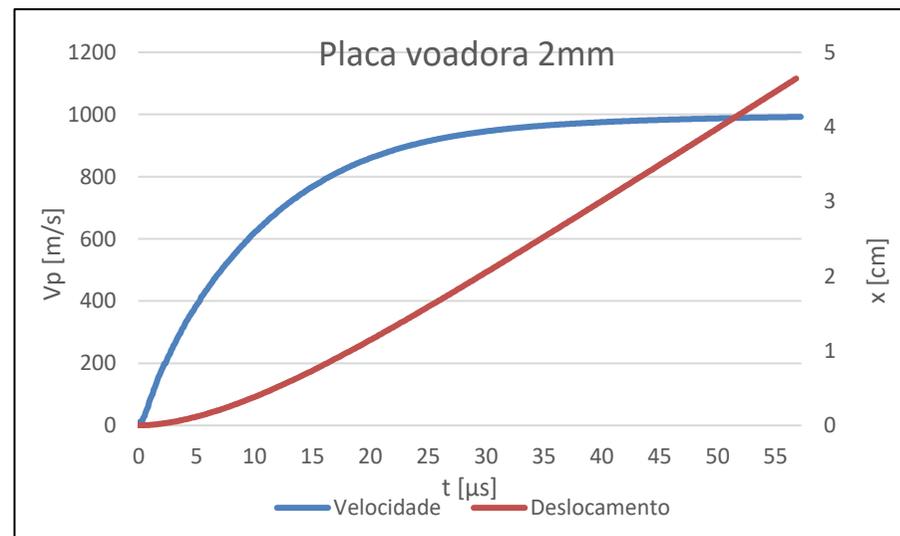
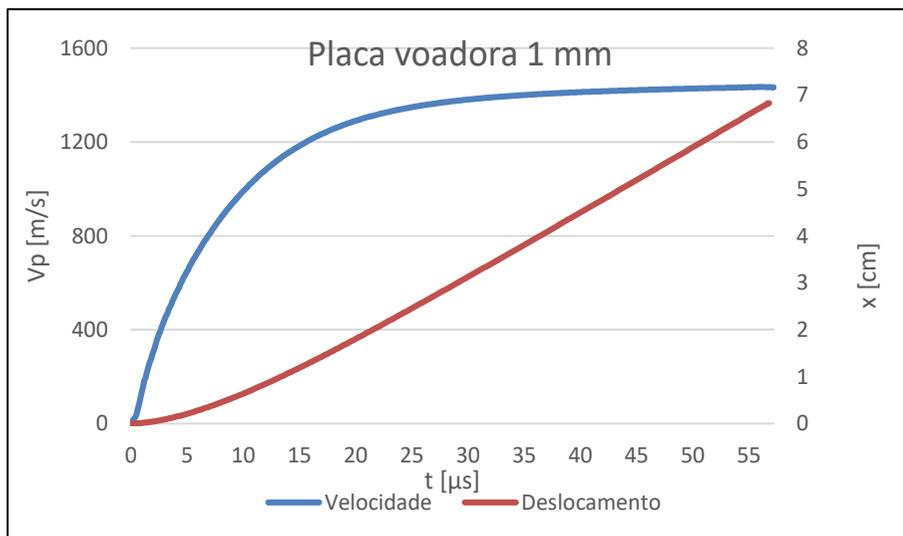


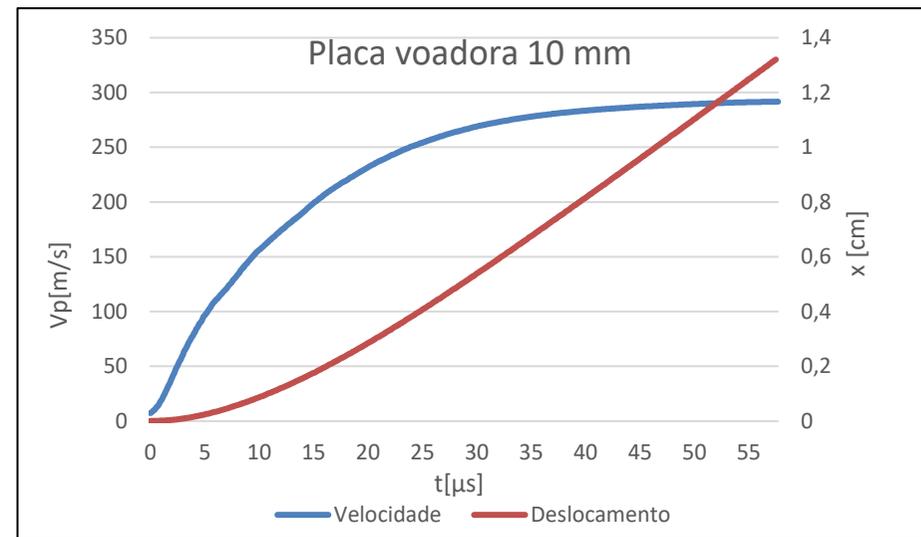
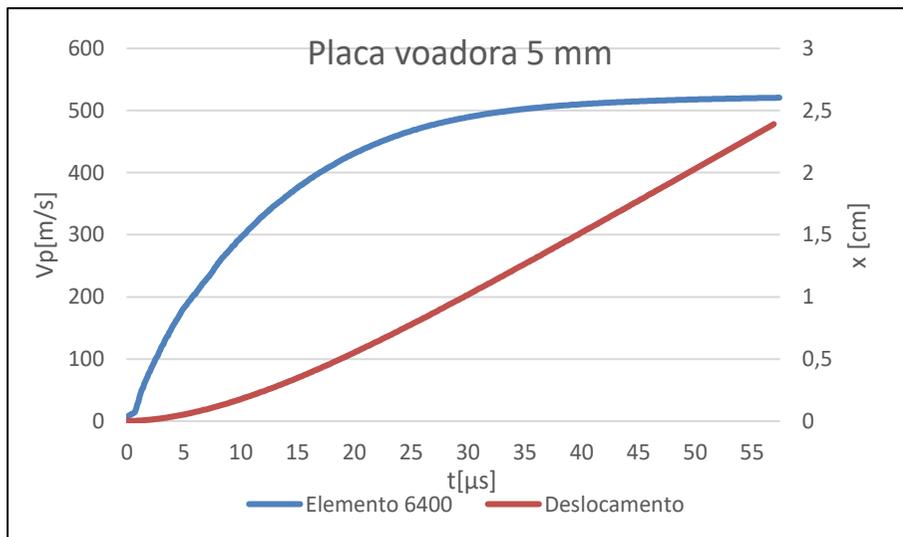
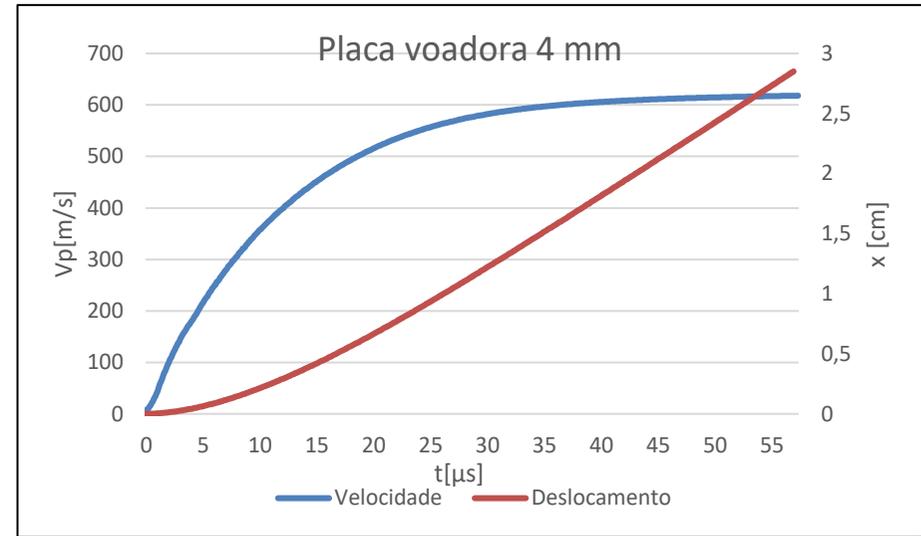
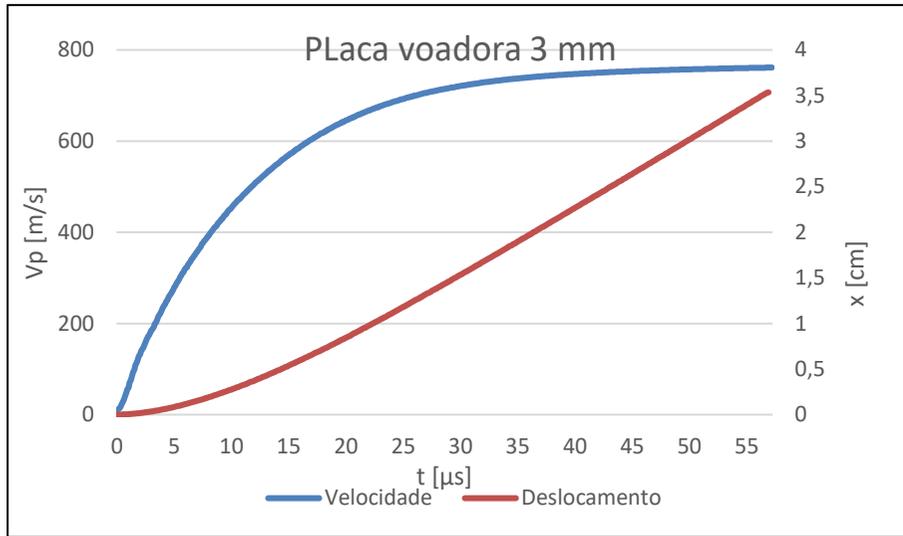


ANEXO C

Curvas velocidade-deslocamento

Configuração plana; A-U-50/Cu(OHFC); Espessura explosivo 25 mm

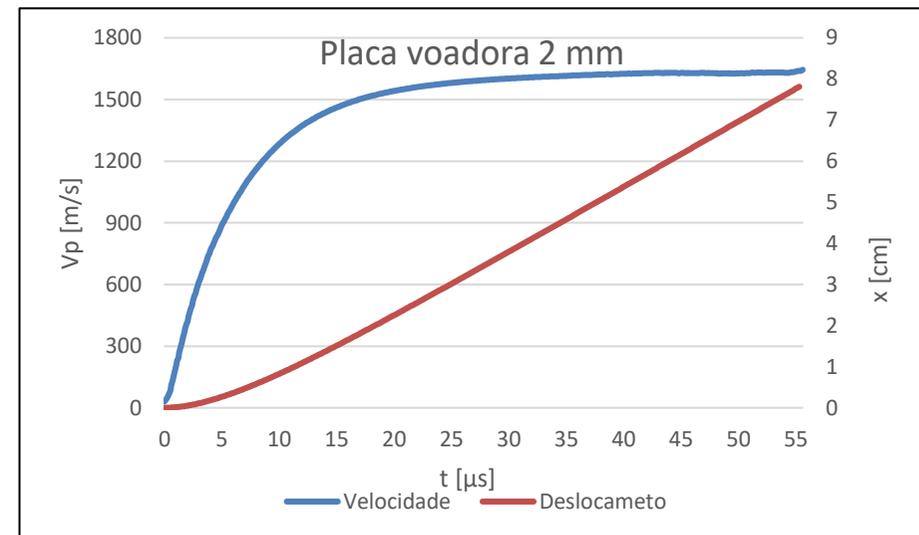
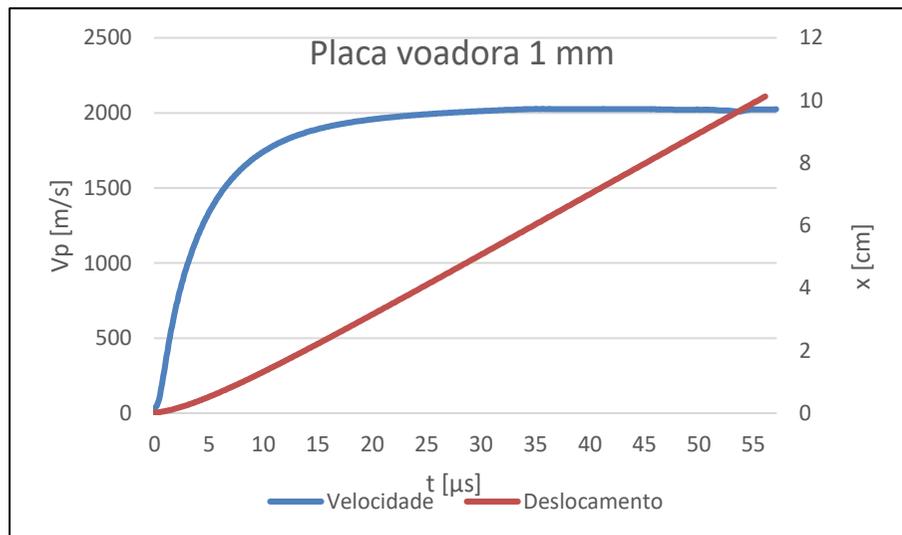


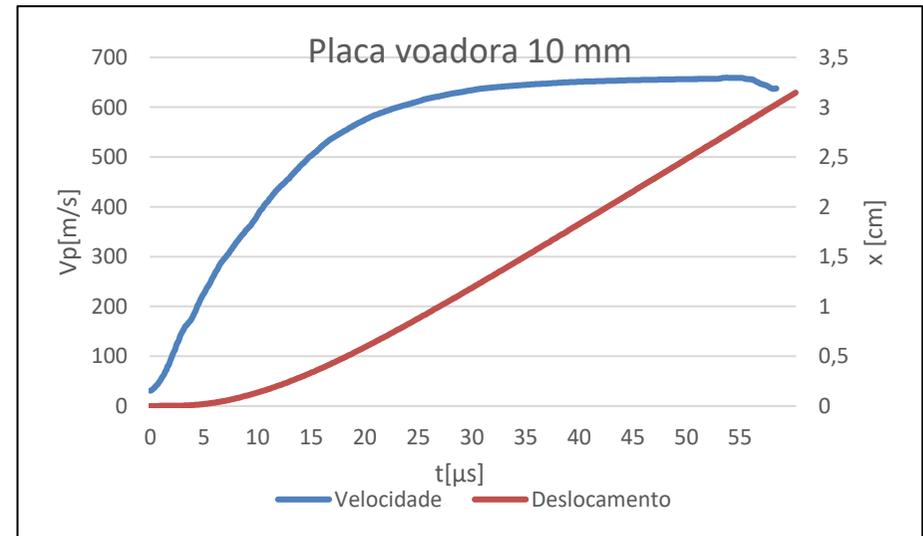
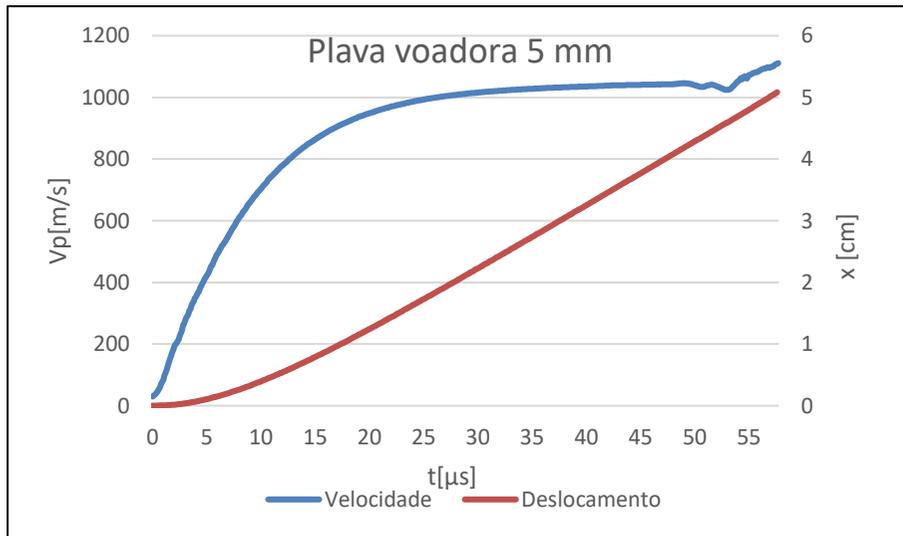
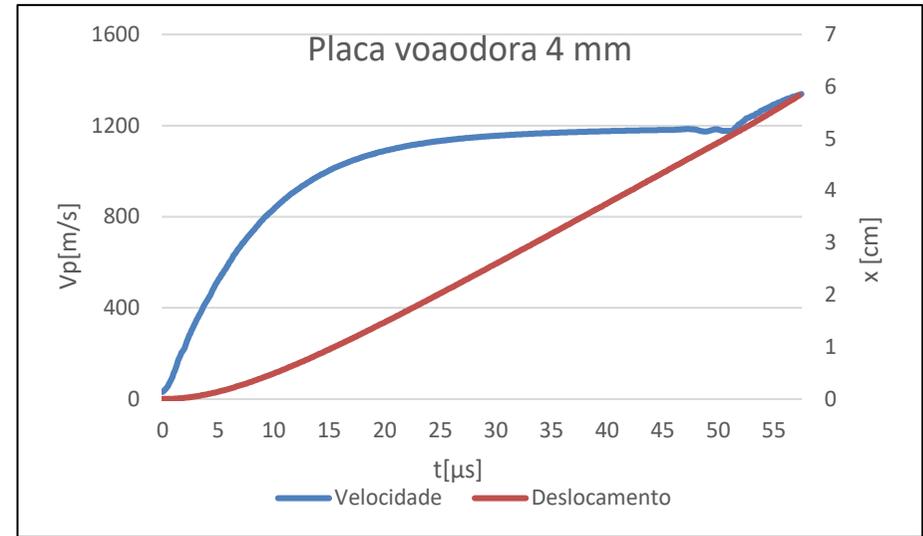
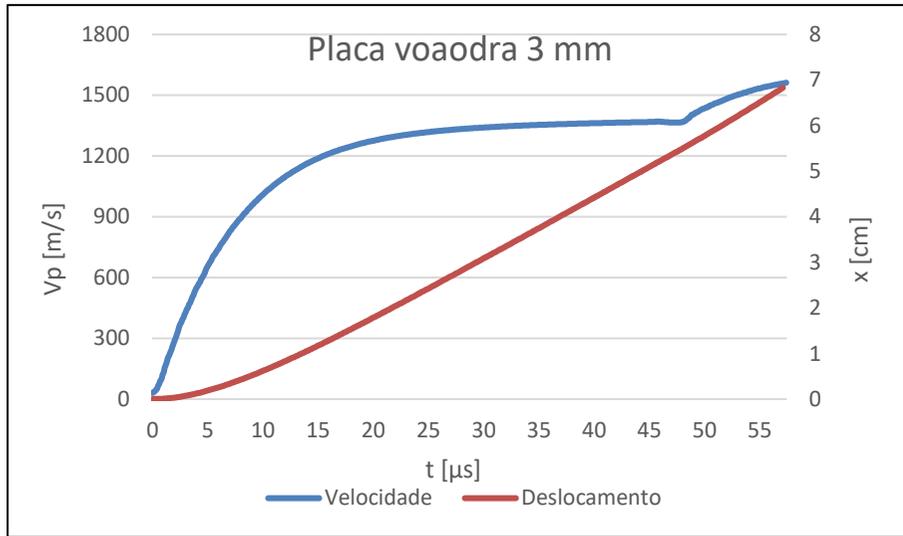


ANEXO D

Curvas velocidade-deslocamento

Configuração plana; A-U-50/AA 6082-T6; Espessura explosivo 20 mm

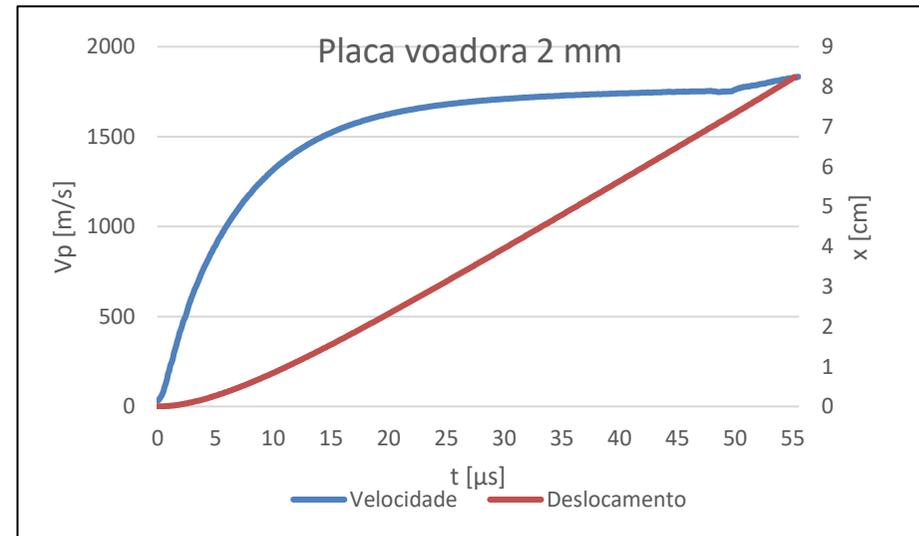
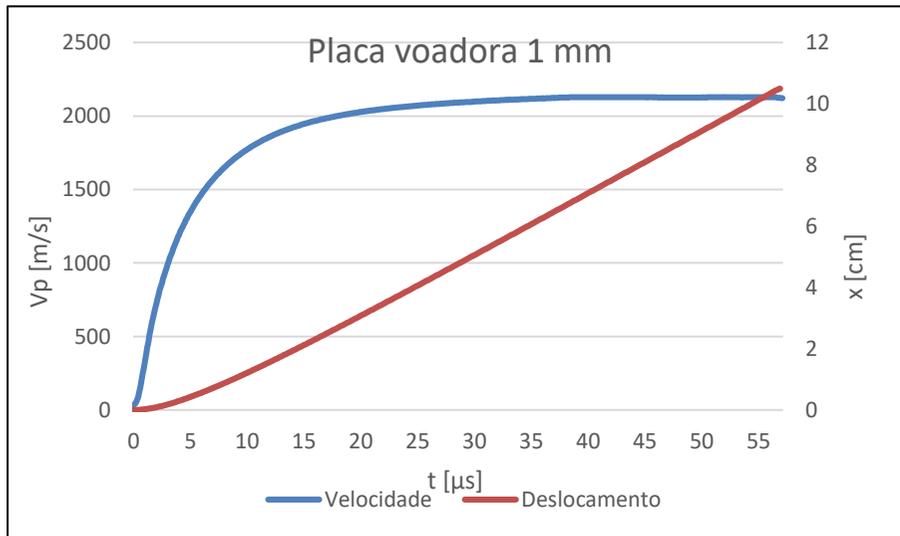


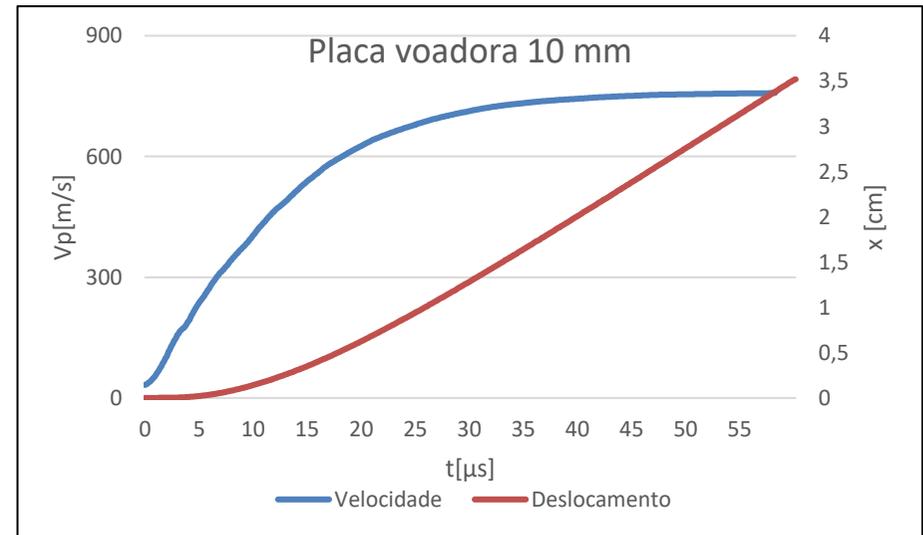
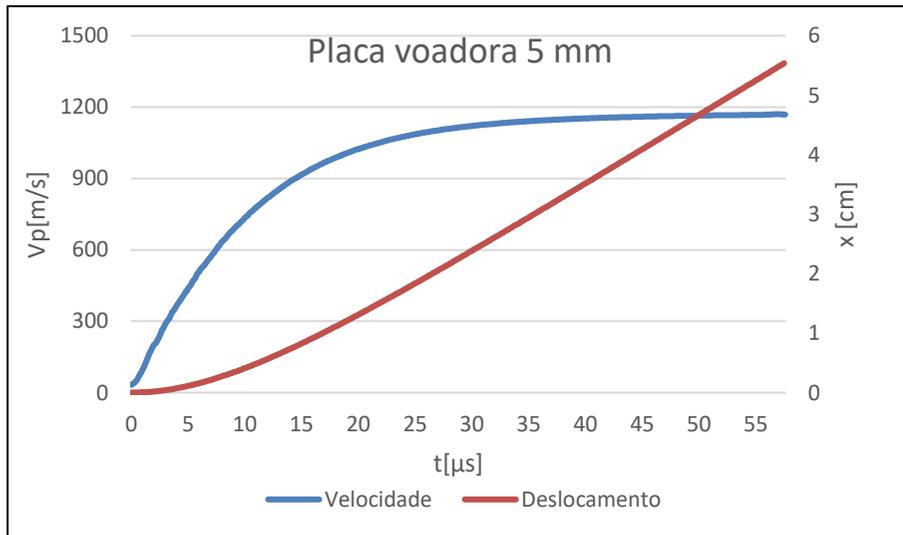
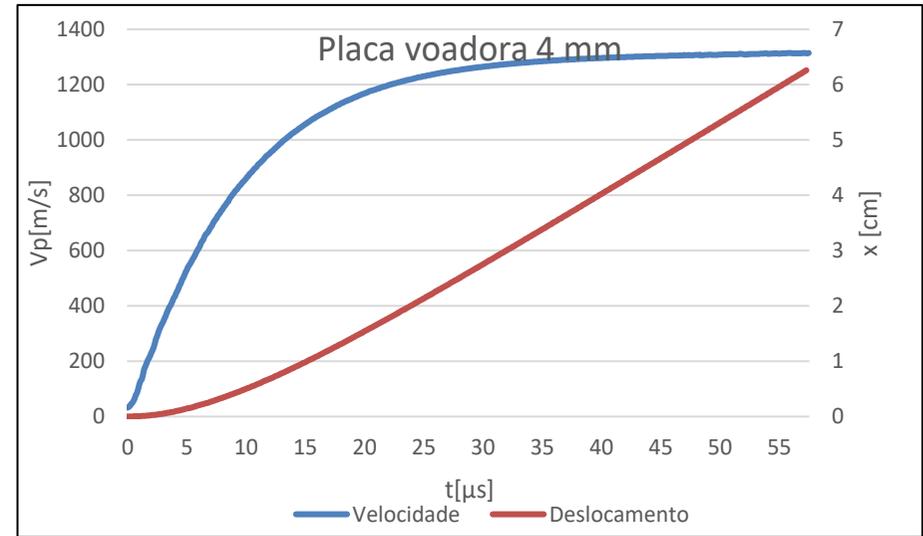
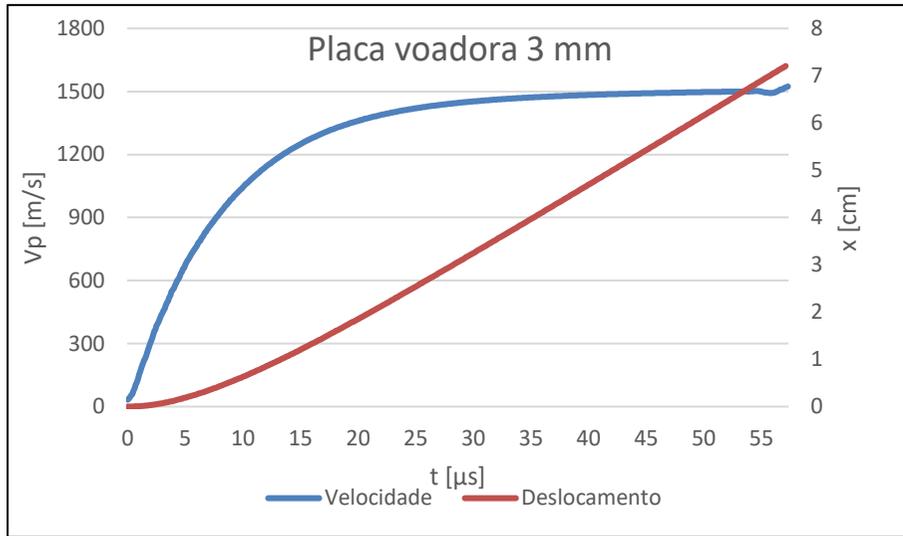


ANEXO E

Curvas velocidade-deslocamento

Configuração plana; A-U-50/AA 6082-T6; Espessura explosivo 25 mm

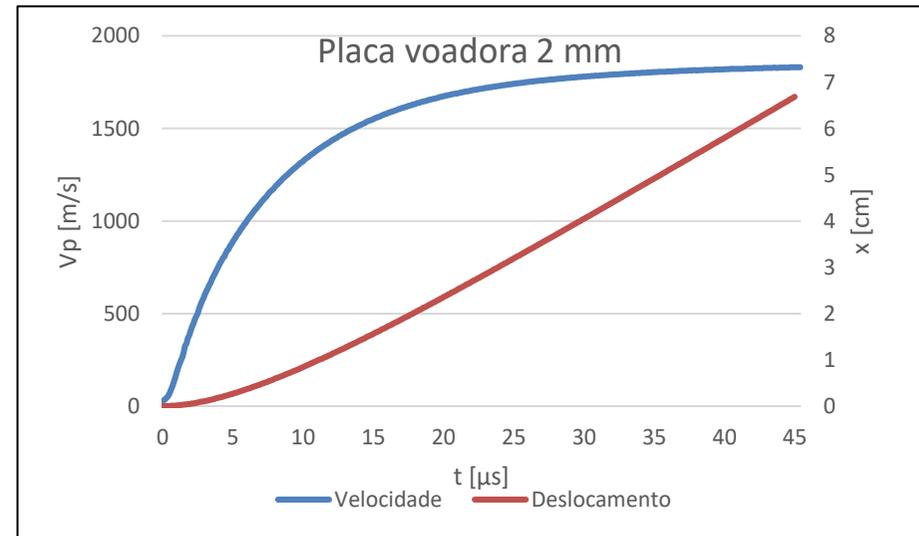
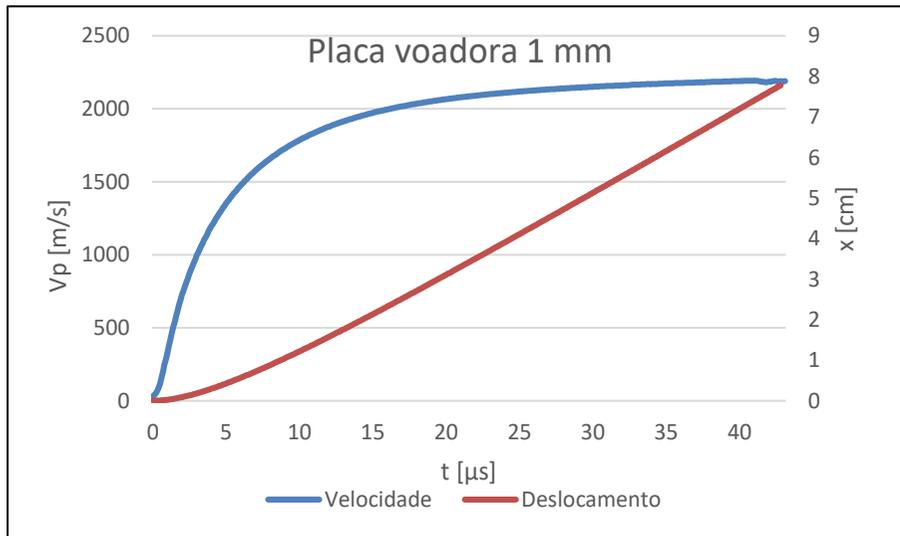


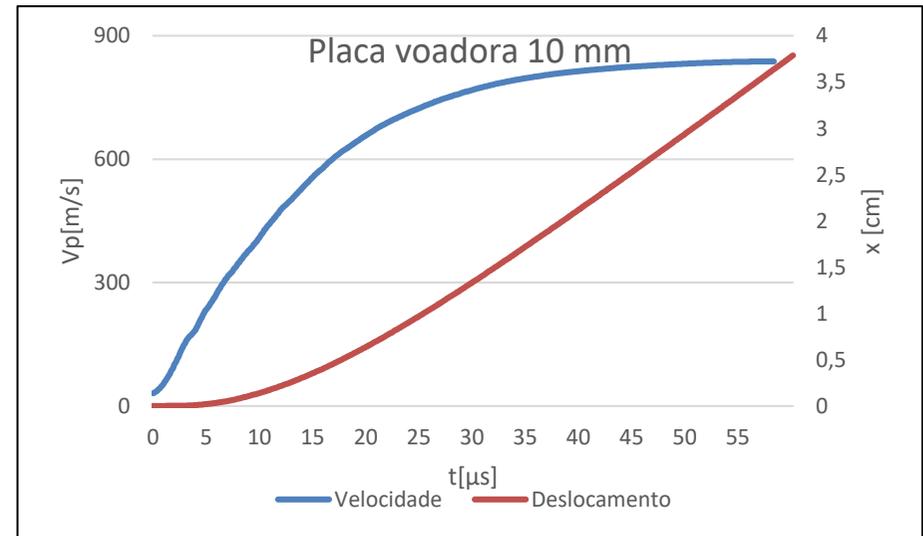
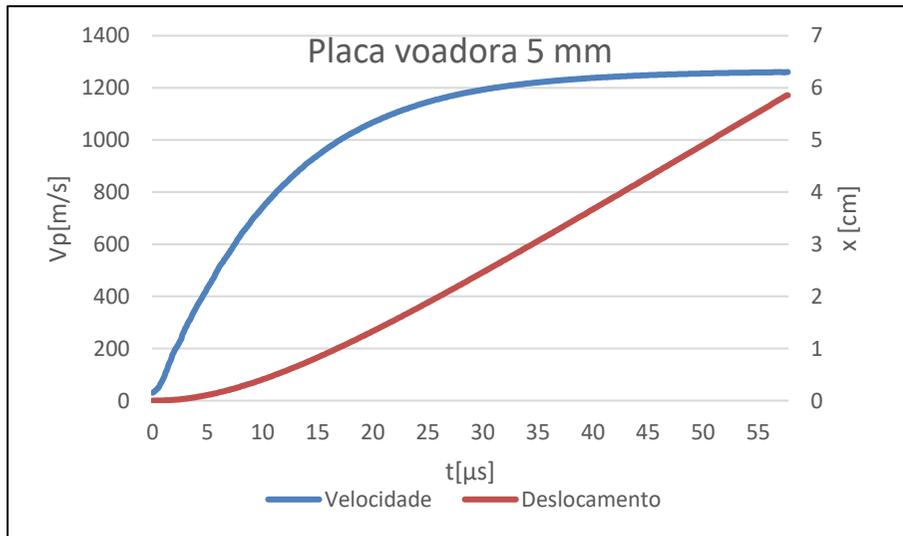
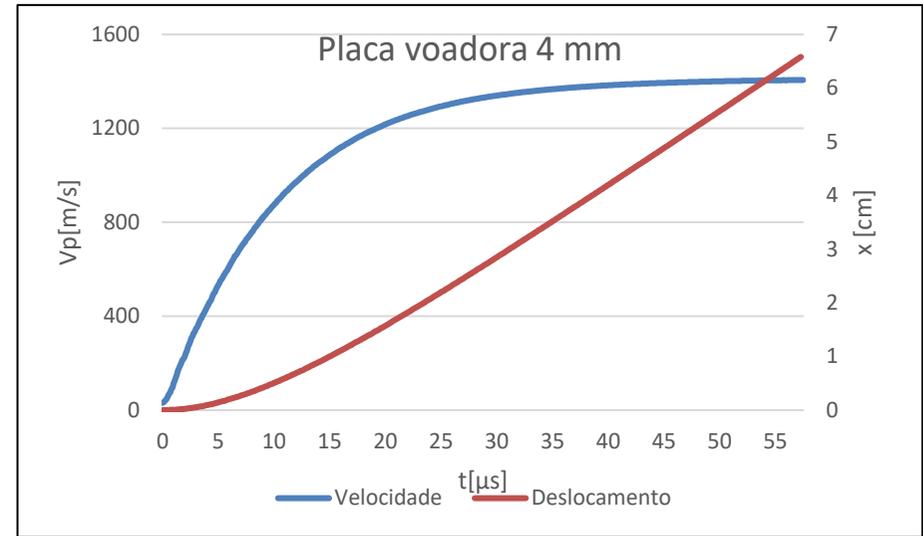
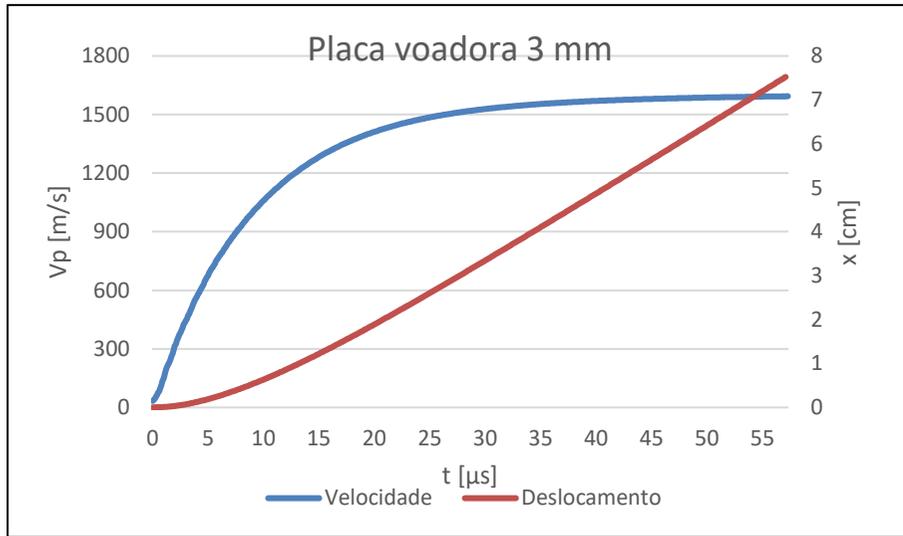


ANEXO F

Curvas velocidade-deslocamento

Configuração plana; A-U-50/AA 6082-T6; Espessura explosivo 30 mm





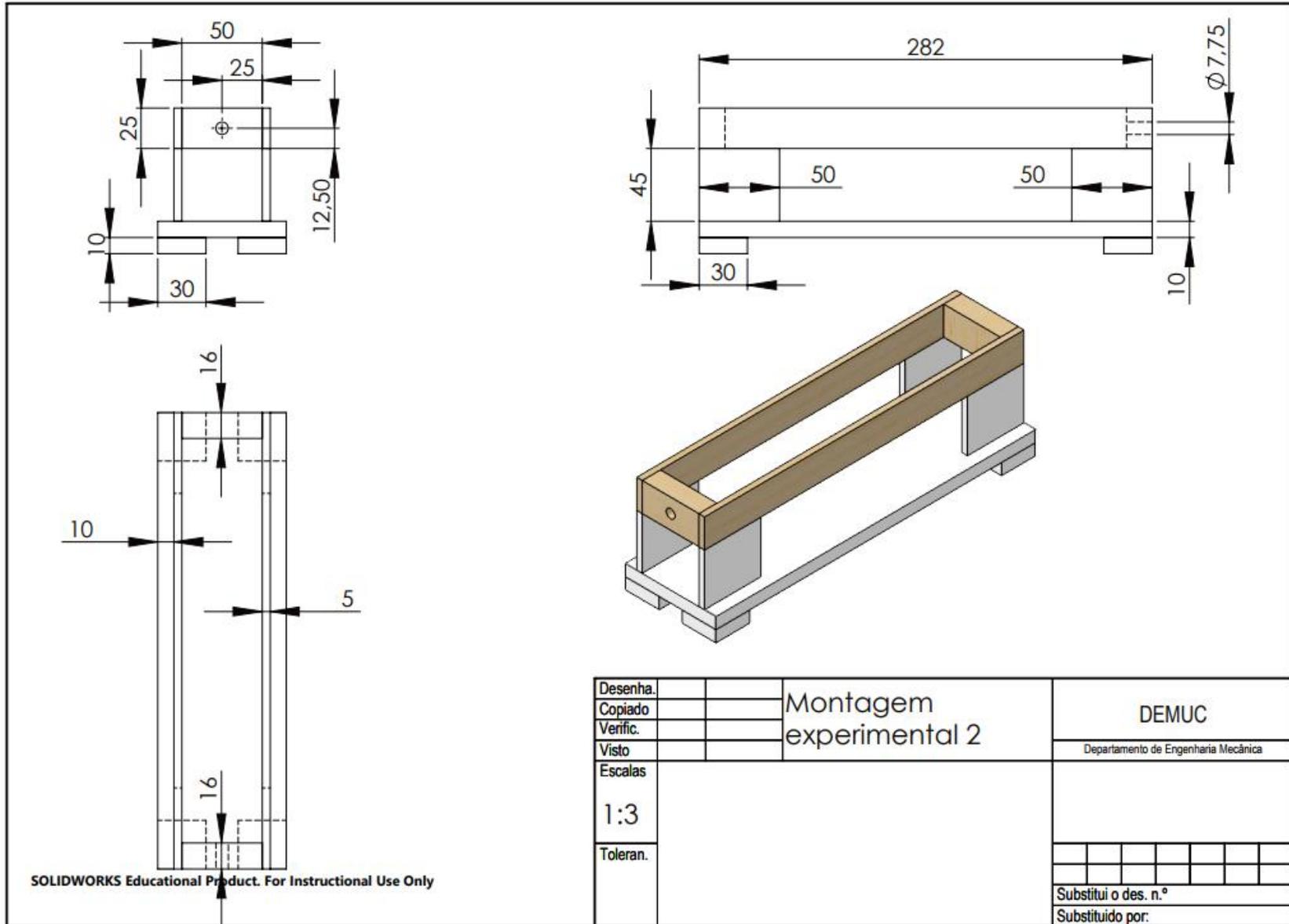


Figura G.2 Esquema genérico da caixilharia de 25 mm de espessura