



André Martins Silva

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Implementação de um Modelo
Constitutivo da Liga de Alumínio 5083
na Propagação de uma Onda de
Choque Explosiva**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Francisco Figueiredo e Silva da Cunha
Salvado, Investigador, CINAV – Centro de Investigação
Naval

Co-orientador: João Mário Burguete Botelho Cardoso,
Professor Auxiliar, FCT-UNL

Validação de um Modelo Constitutivo na Propagação de uma Onda de Choque Explosiva

Copyright © André Martins Silva, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Quero deixar um apreço a todos os intervenientes no processo de realização desta tese e sem os quais tal não seria possível.

Ao Professor Francisco Figueiredo e Silva da Cunha Salvado e ao Professor João Mário Burguete Botelho Cardoso quero agradecer a sua total disponibilidade na orientação deste trabalho, conhecimentos adquiridos através das suas experiências na área e motivação transmitida ao longo de todo o percurso.

Aos meus amigos Virgílio Duarte, João Pedro, João Pires, Pedro Lopes, Francisco Rocha e Nádía Oliveira pelo seu apoio incondicional, motivação e inspiração, a eles um muito obrigado.

Um obrigado a todo o staff do My Spot bar pelo apoio e compreensão demonstrada na acumulação do trabalho com a realização desta tese.

A toda a minha família, especialmente aos meus pais e aos meus irmãos por todo o apoio, aprendizagens ao longo da vida e por me terem dado a possibilidade de me tornar engenheiro. A todos eles o meu muito obrigado com a dedicação deste trabalho

Resumo

Uma das maiores preocupações da engenharia é garantir a segurança das pessoas face ao risco, sendo que um dos riscos da actualidade é a exposição à ameaça terrorista, nomeadamente através de ataques com explosivos. Assim sendo, tornou-se imperativo reforçar a protecção das diversas infraestruturas ou veículos que possam vir a estar sujeitas ao efeito da detonação de um explosivo, o que por si já representa um grande desafio na procura de soluções.

A fim de conhecer melhor a resposta ao impacto explosivo de materiais tipicamente utilizados na construção de navios e aeronaves foi decidido considerar o comportamento de uma liga de alumínio naval. Para isso foi realizado um conjunto de ensaios experimentais que consistiu na exposição de quinze chapas de alumínio aos efeitos da onda de choque proveniente da detonação de um alto-explosivo, para a qual se variou a massa do explosivo e a distância entre este e a chapa de alumínio. A detonação dos explosivos ocorreu em ambiente não confinado.

Para identificar os parâmetros do modelo constitutivo do material e a implementação da metodologia ALE, presentes no *software* de elementos finitos LS-DYNA, procedeu-se à simulação da detonação de um explosivo e à propagação da onda de choque daí resultante de forma a estudar os efeitos da mesma no impacto com uma estrutura, tendo sido usados os dados obtidos no ensaio experimental para comparação de resultados

Palavras-chave: Explosivo; Onda de choque; Alumínio; Simulação do fenómeno explosivo; Formulação Arbitrária Lagrangiana-Euleriana;

Abstract

One of the biggest concerns of engineering is to ensure the safety of human life against several threats, namely the explosive phenomena. This can come accidentally or due to terrorist attacks. Therefore, it has become imperative to reinforce the protection of infrastructures, which are exposed to an explosive detonation. This represents a huge challenge on finding solutions.

An experimental test was performed where fifteen aluminium plates were exposed to shock waves from high explosive detonations. For each test plate, the explosive mass and the stand-off distance between explosive and the plate were varied. The detonation of the explosives occurred in an unconfined environment.

To identify the parameters of the constitutive model and the implementation of ALE methodology, existent in the finite elements software LS-DYNA, the simulation of an explosive detonation and the shock wave generated from it were numerically modelled in order to study its effects on the impact with a structure, using the results obtained in the experimental test.

Key Words: Explosive; Shock wave; Aluminium; Simulation of explosive phenomenon; Arbitrary Lagrangian-Eulerian formulation;

Índice de matérias

Agradecimentos.....	i
Resumo	iii
Abstract.....	v
Índice de matérias.....	vii
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tabelas	xiv
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Motivação e Objectivos.....	1
1.2 Estrutura da tese	4
Capítulo 2 Enquadramento	5
2.1 Fenómeno explosivo	5
2.2 Tipos de Explosivos e carregamentos existentes	6
2.2.1 Explosivos primários	7
2.2.2 Explosivos secundários.....	8
2.2.3 Propelentes	8
2.2.4 Classificação de carregamentos explosivos.....	8
2.3 Detonação de um explosivo num compartimento confinado	13
2.4 Processo de detonação.....	14
2.4.1 Modelo ZND	14
2.4.2 Modelo CJ	14
2.4.3 Perfil de uma onda de detonação	19
2.5 Onda de choque	20
2.5.1 Perfil de uma onda de choque	20
2.6 A lei de escala de Hopkinson e Cranz.....	22
2.7 TNT equivalente.....	23

Capítulo 3	Alumínio.....	25
3.1	Teoria da Elasticidade e Plasticidade.....	25
3.1.1	Estrutura interna dos Metais.....	25
3.1.2	Estruturas cristalinas em células unitárias.....	26
3.2	Alumínio.....	28
3.2.1	Ligas de alumínio.....	28
3.2.2	Liga de alumínio 5083.....	29
3.3	Modelos constitutivos dos materiais.....	32
3.3.1	Modelo constitutivo do alumínio.....	33
Capítulo 4	Ensaio experimental.....	39
4.1	Preparação do ensaio experimental.....	39
4.2	Resultados experimentais.....	41
Capítulo 5	<i>Software de análise ao fenómeno explosivo</i>	47
5.1	<i>Solver LS-DYNA</i>	47
5.1.1	Método Lagrangiano.....	48
5.1.2	Método Euleriano.....	49
5.1.3	Método ALE.....	50
5.2	Integração temporal.....	51
5.2.1	Método de Newmark.....	52
5.2.2	Método das diferenças finitas centrais.....	53
5.3	Métodos de advecção.....	55
5.3.1	Método de advecção de Donor Cell.....	56
5.3.1	Método de advecção de Van Leer.....	56
Capítulo 6	Simulação numérica.....	59
6.1	Modelos Constitutivos e equações de estado.....	59
6.1.1	Equações de estado (EOS).....	60
6.1.2	Modelos constitutivos dos materiais.....	61

6.2	Mapping 2D para 3D	63
6.3	Interação fluido-sólido (FSI)	65
6.3.1	Ligação fluido-estrutura	69
6.4	Definição das partes no modelo numérico.....	70
6.5	Condições de fronteira.....	71
6.6	Controlo de Hourglass.....	71
Capítulo 7	Validação numérica.....	73
7.1	Validação do modelo de material *SIMPLIFIED_ JOHNSON_ COOK implementado no LS-DYNA usando elementos sólidos e elementos shell	73
7.1.1	Descrição das malhas de elementos finitos.....	73
7.1.2	Definição do problema usando a função LOAD_ BLAST	74
7.1.3	Apresentação e análise de resultados.....	76
7.2	Validação da metodologia ALE.....	88
7.2.1	Verificação da capacidade do LS-DYNA em simular explosões e os efeitos da sua onda de choque em estruturas usando a metodologia ALE.....	88
7.2.2	Descrição das malhas de elementos finitos.....	88
7.2.3	Definição do problema no LS-DYNA	89
7.2.4	Apresentação e análise de resultados.....	96
Capítulo 8	Conclusões	103
8.1	Conclusões	103
8.2	Trabalho futuro	104
	Referências.....	105
	ANEXOS	111
	ANEXO A	111
	ANEXO B.....	115
	ANEXO C	119
	ANEXO D	123

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Classificação dos explosivos quanto à sua performance e sensibilidade [10]..	7
Figura 2.2 - Ilustração da free air burst [13].....	9
Figura 2.3 - Ilustração da air burst [13].....	10
Figura 2.4 - Ilustração da surface burst [13].....	11
Figura 2.5 - Ilustração da fully vented blast [13].....	12
Figura 2.6 - Ilustração da partially vented blast [13].....	12
Figura 2.7 - Ilustração da fully confined blast [13].....	13
Figura 2.8 - Propagação de uma onda de choque num volume de controlo [14].....	15
Figura 2.9 - Representação da detonação no plano P-v [14].....	18
Figura 2.10 - Curva pressão-distância de uma onda de detonação [10].	19
Figura 2.11 - Detonação de 500 toneladas de explosivo no ar [19].	20
Figura 2.12 - Representação esquemática do perfil da curva de pressão de uma onda de choque em função [4].....	21
Figura 2.13 - Propriedades de uma onda de choque relacionadas com o fator de escala para uma carga [16].....	22
Figura 3.1 - Estrutura interna do alumínio a diferentes ampliações [22].....	26
Figura 3.2 - a) Estrutura cúbica de corpo centrado (BCC), b) Estrutura cúbica de face centrada (FCC) e c) Estrutura hexagonal compacta [22].....	27
Figura 4.1 - a) Estrutura montada, b) Vista aproximada da colocação do explosivo no centro da chapa (com stand-off).....	40
Figura 4.2 - Chapas deformadas. a) Ensaio n° 1, b) Ensaio n° 4 e c) Ensaio n° 10.	42
Figura 4.3 - Esquema da marcação dos pontos da medição da deformação.....	42
Figura 4.4 - Dispositivo fabricado para medir as deformações das chapas.	43
Figura 4.5 - Comparação entre os perfis de deformação com stand-off de 150 mm.	45
Figura 4.6 - Comparação entre os perfis de deformação com stand-off de 130 mm.	45
Figura 4.7 - Comparação entre os perfis de deformação com stand-off de 100 mm.	46
Figura 5.1 - Descrição da formulação Lagrangiana [43].	48

Figura 5.2 - Descrição da formulação Euleriana [43].....	50
Figura 5.3 - Descrição da formulação ALE [43].	51
Figura 5.4 - A variação linear da variável ϕ_L é descrita pela linha a vermelho e a linha a tracejado define o declive de ϕ_L sobre um elemento usando o método das diferenças centrais. O círculo indica a introdução de um novo máximo nessa posição [50].....	58
Figura 5.5 - Exemplo de como o declive máximo à esquerda (linha a vermelho), s^L , à direita (linha a azul), s^R e o declive das diferenças centrais, S , são definidos no elemento ϕ_i [50].....	58
Figura 6.1 - Campo de pressão no modelo 2D (antes do mapping) [55].	64
Figura 6.2 - Campo de pressão no modelo 3D (depois do mapping) [55].....	65
Figura 6.3 - a) Acoplamento entre duas malhas lagrangeana e eulereana, tempo = 0 ms, b) tempo = 0.15 ms, c) tempo = 0.5 ms [57].....	66
Figura 6.4 - Demonstração do método de acoplamento [57].....	67
Figura 6.5 - a) Partícula ALE (à esquerda) em direcção a uma estrutura estática (à direita) b) Após o impacto a partícula ALE e a estrutura assumem a mesma velocidade [50].....	69
Figura 6.6 - Modos hourglass para elementos 3D, hexaedros [48].	72
Figura 7.1- a) Malha da estrutura usando elementos shell na chapa. b) Malha da estrutura usando elementos sólidos na chapa (2 elementos a cada 3 mm de espessura).	74
Figura 7.2 - Perfil deformado da chapa nº 1 com elementos shell de 1 mm e 2 mm.....	78
Figura 7.3 - Perfil deformado da chapa nº 4 com elementos <i>shell</i> de 1 mm e 2 mm.....	78
Figura 7.4 - Perfil deformado da chapa nº 10 com elementos <i>shell</i> de 1 mm e 2 mm. ..	78
Figura 7.5 - Perfil deformado da chapa nº 1 usando elementos sólidos.	80
Figura 7.6 - Perfil deformado da chapa nº 4 usando elementos sólidos.	80
Figura 7.7 - Perfil deformado da chapa nº 10 usando elementos sólidos.	81
Figura 7.8 - Chapa nº 1. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos <i>shell</i> , elementos <i>solid</i> e resultados experimentais.....	83
Figura 7.9 - Chapa nº 2. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos <i>shell</i> , elementos <i>solid</i> e resultados experimentais.....	83

Figura 7.10 - Chapa nº 3. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos <i>shell</i> , elementos <i>solid</i> e resultados experimentais.....	83
Figura 7.11 - Chapa nº 4. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos <i>shell</i> , elementos <i>solid</i> e resultados experimentais.....	84
Figura 7.12 - Chapa nº 5. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos <i>shell</i> , elementos <i>solid</i> e resultados experimentais.....	84
Figura 7.13 - Chapa nº 6. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos <i>shell</i> , elementos <i>solid</i> e resultados experimentais.....	84
Figura 7.14 - Chapa nº 7. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos <i>shell</i> , elementos <i>solid</i> e resultados experimentais.....	85
Figura 7.15 - Chapa nº 8. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos <i>shell</i> , elementos <i>solid</i> e resultados experimentais.....	85
Figura 7.16 - Chapa nº 9. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos <i>shell</i> , elementos <i>solid</i> e resultados experimentais.....	85
Figura 7.17 - Chapa nº 10. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos <i>shell</i> , elementos <i>solid</i> e resultados experimentais.....	86
Figura 7.18 - Chapa nº 11. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos <i>shell</i> , elementos <i>solid</i> e resultados experimentais.....	86
Figura 7.19 - Chapa nº 12. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos <i>shell</i> , elementos <i>solid</i> e resultados experimentais.....	86
Figura 7.20 - Chapa nº 14. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos <i>shell</i> , elementos <i>solid</i> e resultados experimentais.....	87

Figura 7.21 - Onda de pressão das quatro malhas simuladas.	92
Figura 7.22 - Conjugação das malhas correspondentes à chapa de alumínio (verde) e ao ar envolvente onde se propagam os fluidos (azul).....	93
Figura 7.23 - Mapping de resultados no modelo 3D ($t = 15 \mu\text{s}$).	94
Figura 7.24 - Alguns dos estados da simulação. a) $t = 15 \mu\text{s}$, b) $t = 45 \mu\text{s}$, c) $t = 255 \mu\text{s}$ e d) $t = 1000 \mu\text{s}$	96
Figura 7.25 - Chapa nº 1. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.	97
Figura 7.26 - Chapa nº 2. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.	98
Figura 7.27 - Chapa nº 3. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.	98
Figura 7.28 - Chapa nº 4. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.	98
Figura 7.29 - Chapa nº 5. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.	99
Figura 7.30 - Chapa nº 6. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.	99
Figura 7.31 - Chapa nº 7. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.	99
Figura 7.32 - Chapa nº 8. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.	100
Figura 7.33 - Chapa nº 9. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.	100
Figura 7.34 - Chapa nº 10. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.	100
Figura 7.35 - Chapa nº 11. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.	101
Figura 7.36 - Chapa nº 12. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.	101
Figura 7.37 - Chapa nº 14. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.	101

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Categoria de carregamento de explosão [4].	9
Tabela 2.2 - Parâmetros de uma onda de choque relacionados com o fator de escala (λ) [16].	23
Tabela 3.1 - Designação das ligas de alumínio e suas características [23].	29
Tabela 3.2 - Composição química da liga de alumínio 5083 [24].	30
Tabela 3.3 - Propriedades físicas da liga de alumínio 5083 [24].	31
Tabela 3.4 - Resumo das características da liga de alumínio 5083 [24].	32
Tabela 4.1 - Massa e stand-off de cada ensaio realizado.	41
Tabela 4.2 - Coordenadas dos pontos marcados para efeitos de medição da deformação.	43
Tabela 4.3 - Resultados obtidos na medição da deformação das chapas.	44
Tabela 7.1 - Parâmetros do modelo de material *MAT_ELASTIC para o aço.	75
Tabela 7.2 - Parâmetros do modelo de material *MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK para o alumínio.	75
Tabela 7.3 - Deformação máxima nos pontos marcados usando elementos shell com elementos de tamanho 1 mm.	77
Tabela 7.4 - Deformação máxima nos pontos marcados usando elementos shell com elementos de tamanho 2 mm.	77
Tabela 7.5 - Deformação máxima nos pontos marcados usando elementos sólidos com elementos de tamanho 1 mm.	79
Tabela 7.6 - Deformação máxima nos pontos marcados usando elementos sólidos com elementos de tamanho 2 mm.	79
Tabela 7.7 - Deformações obtidas nas restantes chapas usando elementos shell.	82
Tabela 7.8 - Deformações obtidas nas restantes chapas usando elementos sólidos.	82
Tabela 7.9 - Parâmetros para a EOS de JWL do explosivo C-4.	89
Tabela 7.10 - Parâmetros para o modelo de material *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN do explosivo C-4.	90

Tabela 7.11 - Parâmetros para a EOS linear polinomial do ar.....	90
Tabela 7.12 - Parâmetros do modelo de material *MAT_NULL para o ar.	90
Tabela 7.13 - Dados obtidos da pressão ao longo do tempo para quatro malhas com diferentes tamanhos de elementos.	92
Tabela 7.14 - Parâmetros do modelo de material *MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK para o alumínio.	94
Tabela 7.15 - Resultados das deformações obtidas com a metodologia ALE.	97

Capítulo 1 Introdução

1.1 Motivação e Objectivos

A segurança das pessoas tem sido um tópico de extrema importância ao longo dos anos. Eventos prejudiciais à mesma, como explosões, são alvo constante de estudo com o intuito de minimizar os efeitos causados. Explosões acidentais podem ocorrer em ambiente industrial, mas uma explosão deliberadamente provocada constitui também uma ameaça à própria sociedade, como por exemplo através de ataques terroristas. Desde há poucos anos, engenhos improvisados altamente explosivos tornaram-se a arma de eleição na maioria dos ataques terroristas [1]. Com o avanço da tecnologia e, conseqüentemente, das ferramentas disponíveis para tais estudos há, hoje em dia, uma melhor capacidade de simular esses eventos e prever os efeitos causados nas estruturas sujeitas aos carregamentos explosivos. Tem sido um desafio constante à engenharia o estudo destes fenómenos e dos seus efeitos nos mecanismos de falha das estruturas sujeitas ao carregamento do choque explosivo [1].

Explosões em espaços fechados devido a atentados podem acontecer em estações de metro, parques de estacionamento, centros comerciais ou ainda sob forma de explosões acidentais dentro de um paiol de armamento ou em túneis de exploração mineira [2]. O confinamento da explosão é um factor agravante nos efeitos da mesma pelo que, a análise e o projecto de infraestruturas sujeitas a cenários críticos de carregamentos devido a explosões confinadas devem ter em consideração este mesmo factor [3].

É, portanto, de extrema importância, que no projecto de estruturas que possam vir a estar sujeitas a carregamentos devido a explosões exista informação útil acessível aos engenheiros para que o estudo do efeito desses carregamentos e a determinação das medidas de mitigação dos riscos associados a esses eventos possa ser feito com o máximo rigor. Alguns países vêm há muito desenvolvendo investigações nestas áreas,

havendo um intenso progresso na busca e desenvolvimento de técnicas de proteção de edifícios contra explosões com o objectivo de proteger infraestruturas críticas [1].

Existe um manual disponível, o UFC 3-340-02 (UNIFIED FACILITIES CRITERIA) [4], com informação útil à concepção de projectos de estruturas tendo em conta o dano causado por detonações de explosivos em espaços fechados [5].

Relativamente a esta área, há alguns trabalhos desenvolvidos que se baseiam na simulação numérica e estudam os efeitos de uma onda de choque em explosões confinadas. Wu [2] através do seu ensaio experimental, considerando a detonação de uma carga explosiva esférica e outra cilíndrica com diferentes orientações num espaço confinado, validou resultados obtidos através de um programa de elementos finitos (AUTODYN). O ensaio experimental consistiu numa variação da massa da carga explosiva de 0.095-0.2 kg enquanto a distância ao alvo era mantida constante com valores de 1,5 m e 1,3 m para a direção axial e radial, respectivamente. No caso da carga explosiva cilíndrica o rácio L/D manteve-se constante na proporção de 1:1. O eixo destas encontrava-se orientado horizontalmente enquanto oito sensores de pressão ortogonais efectuavam medições tanto axial como radialmente. A distribuição das pressões e dos impulsos medidos nas superfícies confinantes foram analisados e comparados para verificar o impacto da carga explosiva consoante a sua forma e orientação. Estes resultados experimentais foram comparados também com os resultados previstos no UFC-3-340-02 [4].

Eventos explosivos em estruturas protegidas por barreiras foram, também, alvo de estudo por parte de algumas investigações. Zhou & Hao [6] procuraram obter métodos que permitissem estimar facilmente um evento explosivo, em estruturas resguardadas por uma barreira de proteção através de fórmulas pseudo-analíticas, recorrendo a registos de pressão-tempo. Durante vários anos os métodos de previsão desenvolvidos basearam-se em fórmulas empíricas construídas com base em resultados experimentais de eventos explosivos. No entanto, a realização dos ensaios para recriar tais eventos além de implicar custos elevados acarreta, em geral, problemas de segurança e prejuízos para o meio ambiente.

Tavares, A. [5] recorreu ao LS-DYNA para desenvolver um método de modelação, onde pudesse simular a detonação de um alto-explosivo num espaço confinado e posteriormente proceder ao tratamento adequado deste tipo de problemas que envolvem ondas de choque explosivas provenientes da detonação. Para a realização do estudo foi necessário validar a utilização da formulação multimaterial Arbitrária Lagrangiana-Euleriana (MMALE) implementada no LS-DYNA bem como o modelo geométrico escolhido e os parâmetros utilizados para gerar a onda de choque explosiva. Por não ter sido possível a realização de ensaios experimentais, recorreu a resultados publicados e disponíveis na literatura consultada.

O principal objectivo desta tese será o de prosseguir o trabalho iniciado por Tavares [5] por forma a considerar paredes confinantes elasto-visco-plásticos. Para isso será necessária a validação da formulação Arbitrária Lagrangiana-Euleriana (ALE) implementada no LS-DYNA recorrendo à comparação com resultados a obter em ensaios experimentais. Os ensaios serão efectuados em duas fases:

- Numa primeira fase placas de alumínio, encastradas numa moldura rígida de aço macio, serão sujeitas à detonação de cargas de explosivo, de modo a que medindo o perfil de deformação seja possível validar um modelo constitutivo que permita modelar correctamente as deformações nas paredes de um compartimento sujeito a uma explosão confinada, no seu interior;
- Numa segunda fase será construído um modelo de uma caixa fechada, em aço macio, dividida em dois compartimentos separados por uma chapa plana de alumínio. Um explosivo será detonado num dos compartimentos, de modo a provocar a rotura da placa de separação. Deste modo a energia transmitida ao compartimento adjacente será medida, obtendo-se deste modo um modelo de análise de vulnerabilidade e risco em compartimentos adjacentes a espaços sujeitos à detonação de um alto explosivo.

Contudo, por razões de planeamento e calendarização dos ensaios, esta segunda fase dos trabalhos não foi realizada em tempo pelo que a tese incidirá apenas na primeira fase.

Como se disse, para modelar com rigor este tipo de problemas envolvendo a detonação de um alto-explosivo num espaço confinado será necessária a validação com recurso a ensaios experimentais pelo que a realização dos mesmos será o foco desta investigação.

O material em estudo será a liga de alumínio AA5083-H111, devido às suas aplicações em embarcações e pequenos navios, também eles potenciais alvos de ataques terroristas.

1.2 Estrutura da tese

A presente tese encontra-se dividida em 8 capítulos:

Capítulo 1: No primeiro capítulo introduz-se o tema, abordando a motivação para a realização da tese e os objectivos traçados. Surge também a estrutura que definiu o documento.

Capítulo 2: Neste capítulo revê-se o conceito do fenómeno explosivo, da fase de detonação e os vários tipos de explosões, bem como da onda de choque gerada pela explosão.

Capítulo 3: Neste capítulo faz-se um resumo das características do alumínio e apresenta-se a liga de alumínio usada no ensaio experimental, bem como uma análise dos modelos constitutivos que podem descrever o mesmo.

Capítulo 4: Neste capítulo descreve-se o ensaio experimental realizado com o objectivo de validar os métodos presentes no LS-DYNA, tendo para isso obtido e apresentado os resultados.

Capítulo 5: Descreve-se o *software* LS-DYNA, usado na simulação deste tipo de problemas, falando-se dos vários métodos numéricos.

Capítulo 6: Apresentam-se algumas funções, incluídas no LS-DYNA, essenciais para a simulação do problema da detonação de uma carga explosiva.

Capítulo 7: Neste capítulo verifica-se a capacidade do *software* LS-DYNA em simular correctamente problemas relacionados com detonações de cargas explosivas, usando a metodologia ALE bem como a função LOAD_BLAST. Os resultados obtidos são comparados com os resultados experimentais.

Capítulo 8: Apresentam-se as conclusões sobre o trabalho realizado e o trabalho futuro de interesse.

Capítulo 2 Enquadramento

2.1 Fenómeno explosivo

Tanto um aumento súbito de pressão e de temperatura, devido à oxidação ou uma outra reação exotérmica, como uma súbita conversão de energia potencial (química ou mecânica) em energia cinética produzindo e libertando gases fortemente comprimidos podem definir o conceito de explosão. Estes gases ao expandirem rapidamente realizam trabalho mecânico sobre os materiais envolventes podendo movê-los, deformá-los ou mesmo destruí-los [7]. Uma explosão pode também ser definida por uma súbita expansão de matéria levando-a a ocupar um volume bastante maior do que aquele ocupado anteriormente [8].

Uma explosão partilha algumas características distintas tais como: rapidez, ruído, libertação de energia interna, ruptura ou fragmentação e expansão de gases [8].

As explosões podem ter três origens [8]:

- ***Químicas:*** Originadas por uma reação química como, por exemplo, uma explosão de vapor inflamável, uma explosão de pó ou a detonação de um explosivo.
- ***Mecânicas:*** Originadas por uma reação física como a que ocorre na ruptura de um reservatório sob pressão.

- ***Nucleares:*** Originadas por uma reação nuclear como a fissão ou a fusão nuclear. São, de longe, as mais violentas estando, de momento, restritas ao armamento militar.

Nos principais explosivos químicos incluem-se a nitroglicerina e a dinamite (trinitrolueno (TNT)). Os explosivos podem ser gasosos, líquidos ou sólidos (estado condensado) e destes os últimos dois são, normalmente, os responsáveis pelas explosões mais violentas [8].

2.2 Tipos de Explosivos e carregamentos existentes

Um explosivo é um composto químico que, sendo estimulado por calor, fricção, choque ou por qualquer outro tipo de pulso de energia irá sofrer uma combustão extremamente rápida que originará libertação de grandes quantidades de energia [9].

Podendo-se caracterizar um explosivo através da sua performance e da sua sensibilidade à detonação, classificam-se aqueles em três classes: explosivos primários, explosivos, secundários e propelentes [9], [10]. Na figura 2.1 pode-se constatar esta classificação.

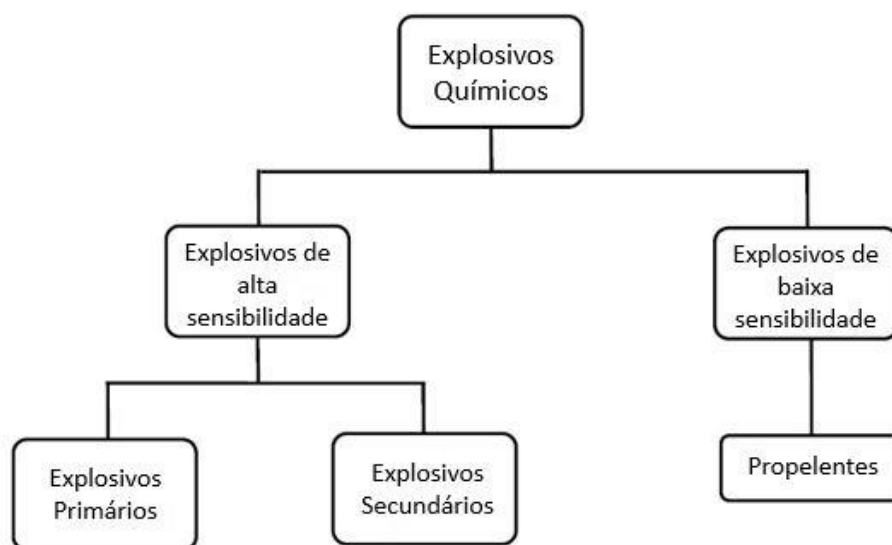


Figura 2.1 - Classificação dos explosivos quanto à sua performance e sensibilidade [10].

2.2.1 Explosivos primários

Os explosivos primários caracterizam-se por serem muito sensíveis a estímulos térmicos ou mecânicos, como é o caso de uma faísca elétrica ou o contacto com altas temperaturas [10]. O fulminato de mercúrio, a azida de chumbo e o sulfeto de nitrogênio são alguns dos exemplos de explosivos primários [11].

2.2.2 Explosivos secundários

São explosivos muito mais estáveis que os primários, não detonando facilmente através de estímulos térmicos ou mecânicos [9], [10]. A iniciação deste explosivo é feita, normalmente, através da onda de choque produzida por um explosivo primário [12]. São exemplos de explosivos secundários o trinitrotolueno (TNT), o ácido pícrico, a nitroglicerina e a ciclotrimetilenotrinitramina (RDX) [11].

2.2.3 Propelentes

São materiais combustíveis sendo constituídos em grande parte por oxigénio, necessário para a sua combustão. Apesar da sua combustão ser rápida o suficiente para serem considerados explosivos, estes não detonam, designando-se a reacção que caracteriza a sua combustão por deflagração. Estes explosivos diferem largamente entre eles na forma como libertam a energia, havendo uns que libertam mais energia que outros. São exemplos de propelentes a pólvora negra e a pólvora sem fumo [11].

2.2.4 Classificação de carregamentos explosivos

Os carregamentos explosivos podem ser classificados quanto ao seu confinamento (explosões confinadas e explosões não confinadas). Dentro destas é possível ainda subdividir em várias categorias [4]. Esta classificação pode ser consultada na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Categoria de carregamento de explosão [4].

<i>Categorias do carregamento explosivo</i>	
<i>Confinamento da carga</i>	<i>Categorias</i>
Explosão não confinada	1. <i>Free air burst</i>
	2. <i>Air burst</i>
	3. <i>Surface burst</i>
Explosão confinada	4. <i>Fully vented</i>
	5. <i>Partially confined</i>
	6. <i>Fully confined</i>

2.2.4.1 Explosões não confinadas

2.2.4.1.1 Free Air Burst

Explosão ocorrida ao ar livre onde a onda de choque percorre a atmosfera circundante até atingir o alvo, sem ser perturbada ou amplificada devido a reflexões [4]. A figura 2.2 ilustra este tipo de explosão.

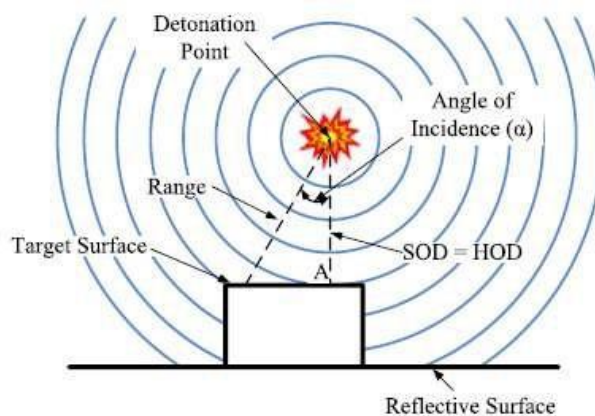


Figura 2.2 - Ilustração da free air burst [13].

2.2.4.1.2 *Air Burst*

Explosão ocorrida acima da superfície do solo onde há reflexão da onda de choque mesmo antes de haver impacto entre a onda de choque inicial e a estrutura [4]. A figura 2.3 ilustra este tipo de explosão.

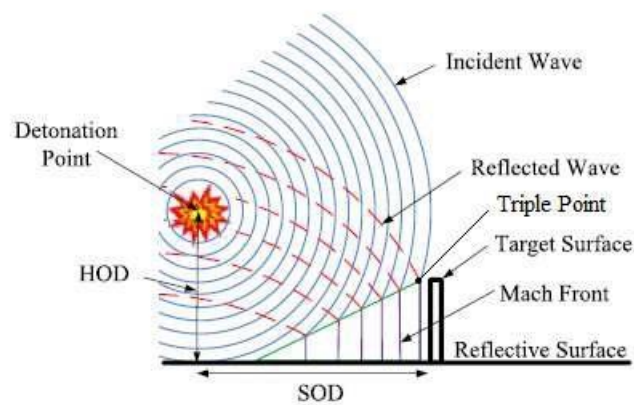


Figura 2.3 - Ilustração da air burst [13].

2.2.4.1.3 *Surface Burst*

Ocorre quando a carga explosiva detonada se encontra próximo ou mesmo na superfície onde a onda de choque é refletida. A onda de choque ao ser refletida é amplificada [4]. A figura 2.4 ilustra este tipo de explosão.

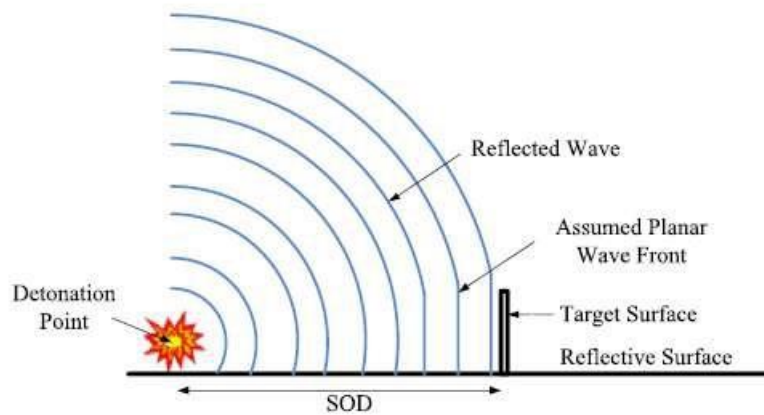


Figura 2.4 - Ilustração da *surface burst* [13].

2.2.4.2 Explosões confinadas

2.2.4.2.1 Fully Vented Blast

O ponto de detonação ocorre perto de uma espécie de barreira ou dentro de uma estrutura que possui uma ou mais superfícies abertas para a atmosfera, não conseguindo assim sustentar as pressões dos gases libertadas [4]. A figura 2.5 ilustra este tipo de situação no que respeita a uma explosão.

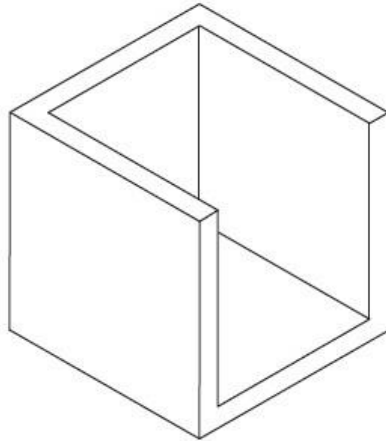


Figura 2.5 - Ilustração da fully vented blast [13].

2.2.4.2.2 Partially Vented Blast

A detonação ocorre dentro de uma estrutura com um número limitado de aberturas/entradas. A pressão dos gases é mantida durante um período de tempo, sendo este proporcional ao tamanho/área das aberturas [4]. A figura 2.6 ilustra um espaço onde ocorreria este tipo de explosão.

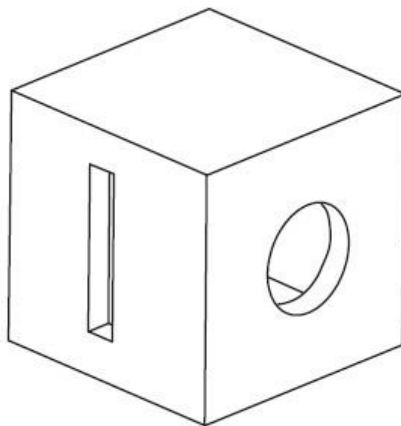


Figura 2.6 - Ilustração da partially vented blast [13].

2.2.4.2.3 Fully Confined Blast

A detonação ocorre dentro de uma estrutura que contém total ou quase totalmente os efeitos da explosão. O carregamento explosivo compreende as repetitivas ondas de choque e a longa duração da pressão originada na explosão devido à interação das ondas refletidas com as superfícies que limitam o espaço confinado [4]. A figura 2.7 ilustra este tipo de espaço.

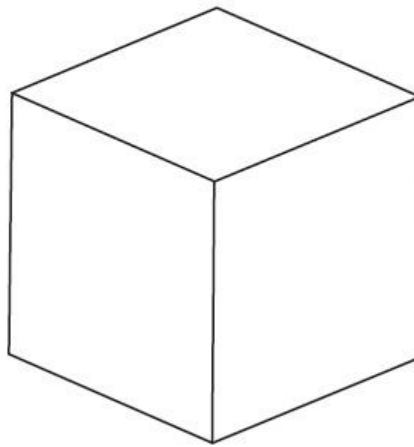


Figura 2.7 - Ilustração da fully confined blast [13].

2.3 Detonação de um explosivo num compartimento confinado

A detonação de um explosivo dentro de uma estrutura confinada gera várias reflexões do pico de pressão podendo este ser amplificado. Dependendo do grau de confinamento, as altas temperaturas e a acumulação dos produtos gasosos gerados na detonação poderão provocar pressões adicionais e, assim, prolongar o carregamento dentro da estrutura. Para que não ocorra destruição da estrutura, esta deverá ser projectada para resistir aos efeitos das pressões internas [4].

2.4 Processo de detonação

O fenómeno da detonação é descrito através de dois modelos teóricos propostos por Zeldovitch, Von Neumann e Deering (ZND) e por Chapman-Jouguet (modelo CJ).

2.4.1 Modelo ZND

A detonação é definida como uma reação exotérmica que ocorre num material explosivo devido à ação de uma onda de choque. Ao comprimir, a temperatura do explosivo é levada acima do seu ponto de ignição provocando uma reação química numa zona imediatamente atrás da onda de choque, a zona de reação.

A frente da onda de choque não altera a sua forma (pressão constante) e a velocidade mantém-se com o tempo, a detonação é um processo em estado estacionário [10], [14].

2.4.2 Modelo CJ

Considera que a frente da onda de detonação é um plano descontínuo e transforma instantaneamente um material em estado de pré-choque num material em estado pós-choque. A velocidade (u), a densidade (ρ), pressão (P) e energia (E) do material alteram-se de um estado para outro, quimicamente estável e em equilíbrio termodinâmico no pós-choque.

Estes parâmetros são calculados usando as equações de conservação de massa, momento e energia, denominadas por equações de Rankine-Hugoniot.

2.4.2.1 As equações de Rankine-Hugoniot

As equações de Rankine-Hugoniot constituem no seu conjunto as equações de conservação de massa, momento e energia [15].

2.4.2.1.1 Conservação de massa

A figura 2.8 ilustra um volume de controlo no qual se propaga uma onda de choque. A massa do material, que é sujeita ao impacto com a frente de onda de choque a uma certa velocidade (U), é comprimida levando a uma variação de volume a que corresponde um aumento do seu peso específico de ρ_0 para ρ_1 . A lei da conservação da massa diz que a massa do material permanece constante na passagem da onda de choque.

$$\rho_0 AtU = \rho_1 At(U - u_1) \quad (2.1)$$

$$\rho_0 AtU = \frac{U}{(U - u_1)} \quad (2.2)$$

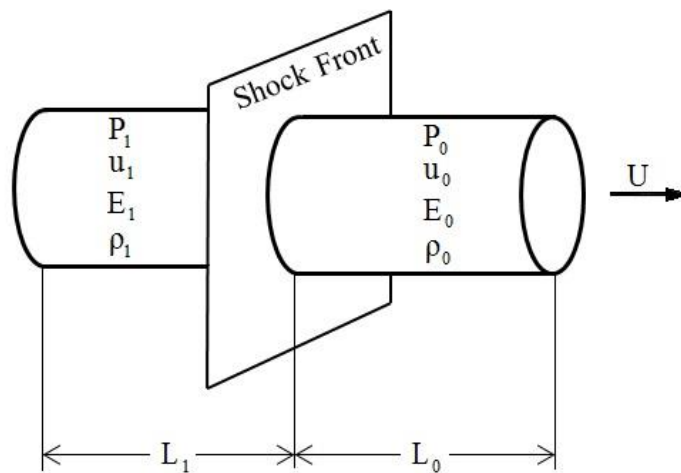


Figura 2.8 - Propagação de uma onda de choque num volume de controlo [14].

2.4.2.1.2 Conservação do momento

O material, sujeito a uma força ($F = A(P_1 - P_0)$) resultante da passagem da onda de choque, adquire um momento por unidade de tempo ($\frac{mu_1}{t} = \rho_0 AUu_1$). A lei de conservação de momento garante que a taxa de variação do momento é igual à força exercida pela onda de choque no material.

$$(P_1 - P_0)A = \rho_0 AUu_1 \quad (2.3)$$

$$(P_1 - P_0) = \rho_0 Uu_1 \quad (2.4)$$

2.4.2.1.3 Conservação de energia

A onda de choque realiza um trabalho compressivo por unidade de tempo sobre o material ($W/t = P_1 Au_1$). A energia que este recebe será a soma de duas parcelas, a energia cinética ($E_c = \frac{1}{2} \rho_1 AL_1 u_1^2$) e a energia interna ($E_i = \rho_0 UA(e_1 - e_0)$). A lei de conservação de energia impõe que a taxa de variação de energia do material seja igual ao trabalho por unidade de tempo realizado pela onda de choque no material.

$$P_1 Au_1 = \frac{1}{2} \rho_1 AL_1 u_1^2 + \rho_0 UA(e_1 - e_0) \quad (2.5)$$

$$e_1 - e_0 = \frac{P_1 u_1 - P_0 u_0}{\rho_0 (U - u_0)} - \frac{1}{2} (u_1^2 - u_0^2) \quad (2.6)$$

Se se conhecer o estado inicial do material (estado de pré-choque) sobram cinco variáveis presentes nas equações de Rankine-Hugoniot (equações (2.2), (2.4) e (2.6)). O sistema de equações será indeterminado pois o número de variáveis é superior ao número de equações sendo, assim, necessário uma outra equação para o tornar de possível de resolver. Esta equação adicional é dada por uma equação de estado (EOS) que será específica para o material sujeito à onda de choque [16].

O comportamento dos gases em expansão gerados na detonação é descrito pela equação de estado (EOS). Esta pode ser definida através de uma lei física ou através de uma relação empírica [10], [16], resultante de dados experimentais.

A EOS é, normalmente, escrita em termos da energia interna, pressão e volume específico:

$$e = f(P, v) \quad (2.7)$$

O termo da energia pode ser eliminado combinando a EOS com a equação de conservação de energia (equação (2.6)). Obtém-se assim uma relação entre pressão e volume específico:

$$P = f(v) \quad (2.8)$$

A equação (2.8) é denominada de equação de Hugoniot [14].

2.4.2.2 Estado de Chapman-Jouguet

Na figura 2.9 é apresentado um gráfico representativo da detonação no plano $p-v$ (pressão-volume específico). A curva Hugoniot dos explosivos não reagidos (Hugoniot of unreacted explosive) representa todos os estados de equilíbrio possíveis em que um material explosivo pode existir. A Hugoniot dos produtos da detonação (Hugoniot of detonation products) representa os estados dos produtos gasosos da detonação [14], [17]. A recta que liga o estado inicial (ponto A) e o estado final (ponto C) no plano P-v e que é tangente à Hugoniot dos produtos da detonação (ponto B) é a recta de Rayleigh e representa a condição de descontinuidade [18].

As equações de conservação de massa e de conservação de momento (equações (2.2) e (2.4)) podem-se combinar para dar origem à equação de Rayleigh (equação (2.9)), onde U é a velocidade da onda de detonação, ρ é a densidade, P é a pressão, v é o volume específico ($v = \frac{1}{\rho}$) e os índices 0 e 1 correspondem aos estados inicial e final, respectivamente. A velocidade da onda (U) faz variar o declive da recta de Rayleigh que é dado pela equação (2.10) [14], [17].

$$P = P_0 + (\rho_0 U)(v_0 - v_1) \quad (2.9)$$

$$\text{Declive} = \rho_0^2 U^2 \quad (2.10)$$

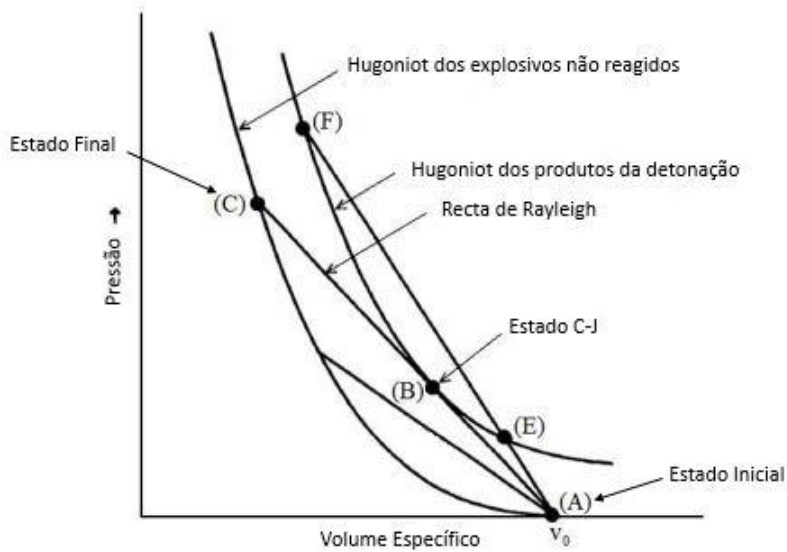


Figura 2.9 - Representação da detonação no plano P-v [14].

O ponto onde a recta de Rayleigh é tangente à Hugoniot dos produtos da detonação representa o estado de Chapman-Jouguet [14], [15]. As condições de uma detonação ideal (autossustentada e estacionária) são definidas por esse estado [17].

2.4.3 Perfil de uma onda de detonação

A propagação da onda de choque através do explosivo mostra-nos que a pressão varia em função da distância como é ilustrado na figura 2.10. A reacção química no explosivo inicia-se na frente da onda de choque onde o pico de pressão é conhecido como pico de Von Neuman ("Von Neuman spike"). A zona de reacção, onde se desencadeia a combustão do explosivo, situa-se atrás deste pico. No modelo falado anteriormente (modelo ZND) este pico é ignorado e a zona de reacção é considerada nula (a maioria dos explosivos tem um comprimento da zona de reacção aproximadamente igual a 1 mm [10]).

No final da zona de reacção encontra-se o ponto CJ que representa o estado dos produtos da detonação. A expansão dos produtos da reacção é descrita pela onda de rarefacção e é conhecida como a onda de Taylor [10].

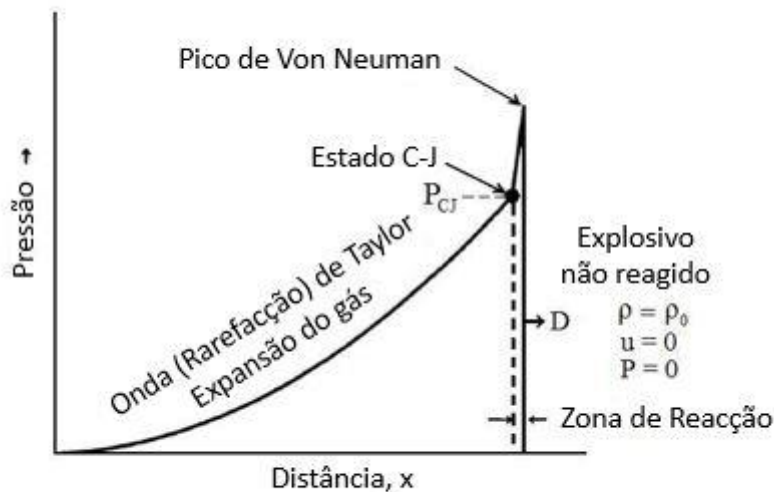


Figura 2.10 - Curva pressão-distância de uma onda de detonação [10].

2.5 *Onda de choque*

As altas temperaturas (entre 3000 °C e 4000 °C) e os elevados valores de pressão (variando entre os 100 e os 300 Kbar) são características dos produtos gasosos gerados na detonação de um explosivo [19]. Estes produtos gasosos actuam sobre o meio ambiente, formando ondas de choque que comprimem e aumentam a temperatura do ar [20]. Na figura 2.11 pode observar-se este efeito.



Figura 2.11 - Detonação de 500 toneladas de explosivo no ar [19].

2.5.1 *Perfil de uma onda de choque*

A curva de Friedlander, representada na figura 2.12, é utilizada para explicar a onda de choque gerada por uma explosão no ar em regime de detonação [10], [17], [21]. Note-se que a curva de Friedlander não tem, contudo, qualquer interesse prático sendo apesar disso muitas vezes referida, dada a forma simples e eficaz como permite descrever o efeito da passagem de uma onda de choque explosiva.

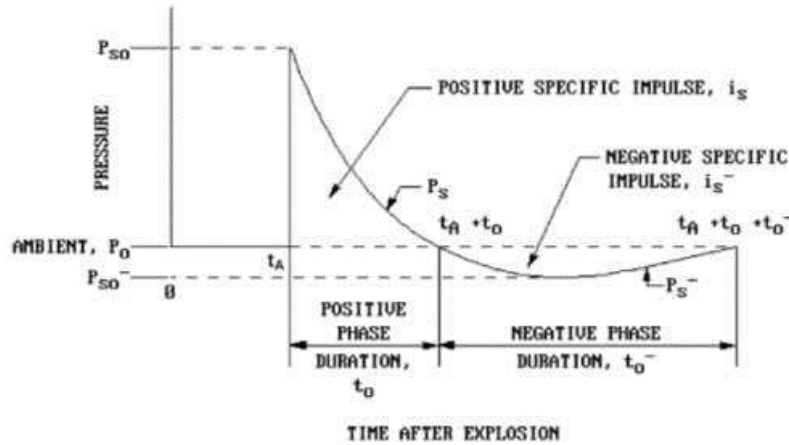


Figura 2.12 - Representação esquemática do perfil da curva de pressão de uma onda de choque em função [4].

Pela figura 2.12 constata-se que a onda de choque provoca um aumento súbito da pressão ambiente levando-a a um pico de sobre-pressão incidente, P_{SO} . Após o tempo t_0 (duração da fase positiva) esta sobre-pressão incidente decai exponencialmente para a pressão atmosférica. Imediatamente a seguir existe a fase negativa com duração de t_0^- caracterizada por uma pressão negativa máxima (abaixo da pressão ambiente), P_{SO}^- .

Integrando as áreas das fases, positiva e negativa, obtém-se os impulsos das pressões incidentes, positiva e negativa. Os impulsos positivo e negativo são calculados pelas expressões (2.11) e (2.12), respectivamente [1], [12], [21].

$$i_S^+ = \int_{t_A}^{t_A+t_0} [P(t) - P_0] dt \quad (2.11)$$

$$i_S^- = \int_{t_A+t_0}^{t_A+t_0+t_0^-} [P_0 - P(t)] dt \quad (2.12)$$

Onde $P(t)$ representa a relação pressão-tempo, P_0 é a pressão ambiente, t_0 é a duração da fase positiva, t_0^- é a duração da fase negativa e t_A é o tempo de chegada da onda de choque.

2.6 A lei de escala de Hopkinson e Cranz

É possível obter as mesmas propriedades para duas ondas de choque provenientes de duas cargas explosivas com igual geometria e tipo de explosivo mas de massas diferentes, detonadas na mesma atmosfera. Para tal ser possível utiliza-se um factor de escala estabelecido na lei de escala de Hopkinson e Cranz [12], [16].

Na figura 2.13 encontram-se duas cargas explosivas esféricas de massas diferentes, onde R refere-se à distância entre o centro do explosivo e um ponto de interesse, W é a massa do explosivo e d é o diâmetro do explosivo. O factor de escala é calculado pela equação (2.13).

$$\lambda = \frac{R_2}{R_1} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{\sqrt[3]{W_2}}{\sqrt[3]{W_1}} \quad (2.13)$$

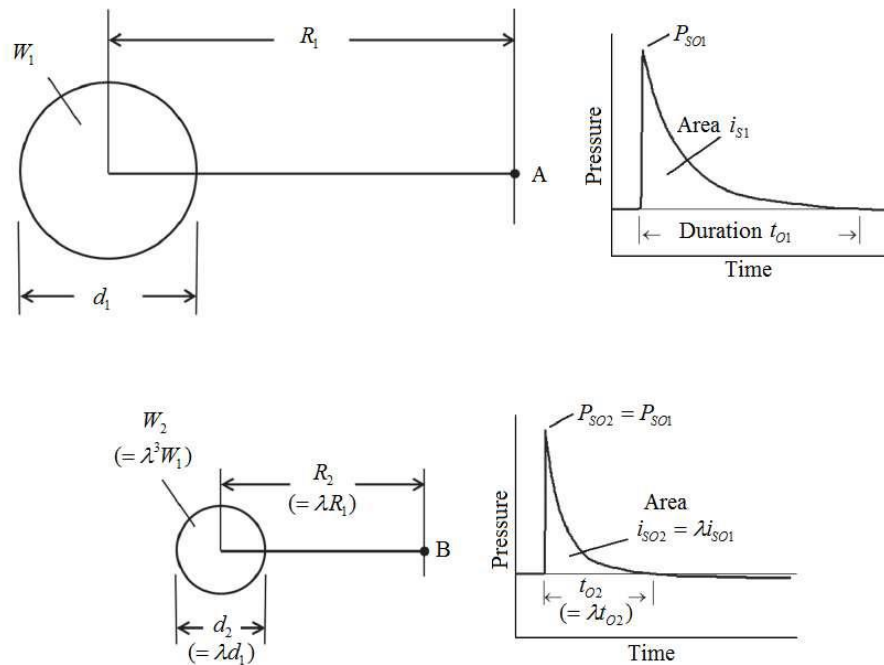


Figura 2.13 - Propriedades de uma onda de choque relacionadas com o fator de escala para uma carga [16].

Na tabela 2.2 estão alguns dos parâmetros de uma onda de choque relacionados com o factor de escala (λ). l representa o comprimento, ρ a densidade, m a massa, t o tempo, v a velocidade, a a aceleração, F a força, P a pressão e I o impulso.

Tabela 2.2 - Parâmetros de uma onda de choque relacionados com o fator de escala (λ) [16].

	l	ρ	m	t	v	a	F	P	I
Unidade (S.I.)	m	kg/m ³	kg	s	m/s	m/s ²	kg.m/s ²	kg/m.s ²	kg.m/s
Símbolo	L	ML ⁻³	M	T	LT ⁻¹	LT ⁻²	MLT ⁻²	ML ⁻¹ T ⁻²	MLT ⁻¹
Factor	λ	Const.	λ^3	λ	Const.	λ^{-1}	λ^2	Const.	λ^3

A lei de Hopkinson e Cranz pode ser expressa também pela equação (2.14), onde Z é a distância escalada e e é um parâmetro dimensional.

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \left[\frac{m}{\sqrt[3]{Kg}} \right] \quad (2.14)$$

2.7 TNT equivalente

O explosivo TNT é uma referência na área dos carregamentos explosivos e nos seus efeitos em estruturas [1]. Quando um outro explosivo diferente de TNT é detonado recorre-se à conversão da sua massa, com uma forma específica, numa massa equivalente de TNT. Para tal multiplica-se a massa do explosivo em questão por um factor de conversão [4], [22].

A equação (2.15) dá-nos o factor de conversão que é representado pela relação entre a energia produzida pelo explosivo em questão e a energia produzida pelo explosivo TNT.

$$W_E = \frac{H_{EXP}^d}{H_{TNT}^d} W_{EXP} \quad (2.15)$$

Aqui, W_E representa a massa da carga efectiva, W_{EXP} a massa do explosivo em questão, H_{EXP}^d o calor específico do explosivo em questão e H_{TNT}^d o calor específico do TNT.

Capítulo 3 Alumínio

3.1 Teoria da Elasticidade e Plasticidade

O comportamento elástico dos materiais é reversível e ao mesmo tempo independente da história de deformação. A reversibilidade é determinada pela existência de uma dependência única entre a tensão e a deformação em que as deformações produzidas no material são totalmente recuperadas não causando alterações físicas permanentes após o descarregamento. Ao ser independente da história, ou seja, do trajecto percorrido pela variável deformação, significa que a energia elástica armazenada não depende da forma como o material se deforma [23].

Por outro lado, em regime elasto-plástico, um material quando submetido a deformações plásticas, sofre deformações irreversíveis e, em geral, dependentes do seu curso. Tal se deve a alterações na micro-estrutura do material, resultantes da deformação imposta pelo carregamento, as quais não recuperam depois do descarregamento.

Estas deformações irreversíveis caracterizam os estados de deformação plástica [23].

3.1.1 Estrutura interna dos Metais

A composição estrutural dos metais pode ser estudada a várias escalas, nomeadamente aos níveis da macroestrutura, microestrutura e arranjo atómico. A um nível macroestrutural consideram-se as variáveis de campo normalmente observáveis, considerando-se que a sua distribuição se faz de forma regular pelo material. Ao nível microestrutural a preocupação centra-se na observação e modelação das alterações da estrutura cristalina dos materiais, sendo exigível equipamento técnico (microscópio óptico) com capacidade de ampliação de 50 a 1000 vezes para que possam ser caracterizadas as heterogeneidades do material devido aos elementos de liga, ou

simplesmente impurezas. O estudo ao nível da estrutura atômica está fora do âmbito deste trabalho e é raramente considerado na análise do comportamento dos materiais em engenharia. A figura 3.1 ilustra a composição estrutural do alumínio a diferentes ampliações [23].

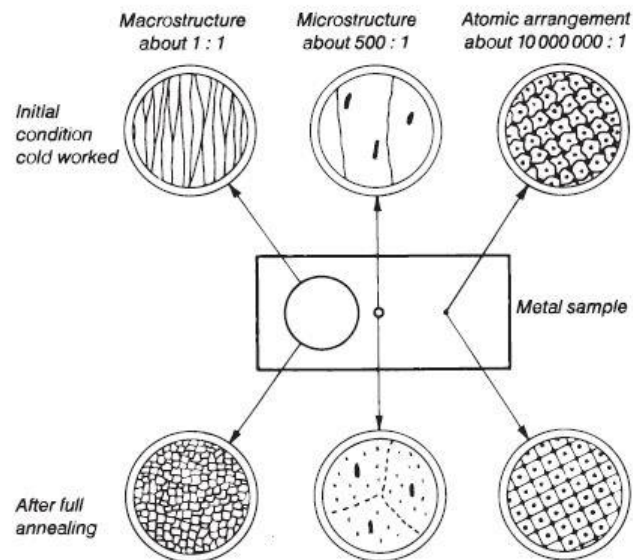


Figura 3.1 - Estrutura interna do alumínio a diferentes ampliações [22].

3.1.2 Estruturas cristalinas em células unitárias

Apenas uma pequena parte de todos os sólidos, quer sejam naturais ou produzidos artificialmente, não possuem uma estrutura cristalina. Este tipo de estrutura tem como base a periodicidade e a repetição de um arranjo específico das suas moléculas ou átomos. As características do material e as propriedades físicas estão intrinsecamente ligadas às propriedades da estrutura da célula unitária. Estas células são, na sua maioria, constituídas por átomos nos seus centros e podem ter átomos adicionais no centro da face ou mesmo no meio da célula.

Apesar de existirem 14 tipos diferentes de estruturas cristalinas, a maioria dos metais têm estruturas descritas por cúbicas de corpo centrado (*body centered cubic* – BCC), cúbicas de face centrada (*face centered cubic* – FCC) ou hexagonais compactas (*hexagonal closed packed* – HCP). Por norma, metais BCC são menos dúcteis mas mais

resistentes, os metais FCC são menos tenazes mas mais dúcteis e os metais HCC são, em geral, frágeis.

A densidade do material, o processo de deformação e a capacidade para se ligarem a outros elementos são outras características dependentes da estrutura cristalina. A figura 3.2 mostra estes 3 tipos de estruturas cristalinas e os seus arranjos atômicos [23].

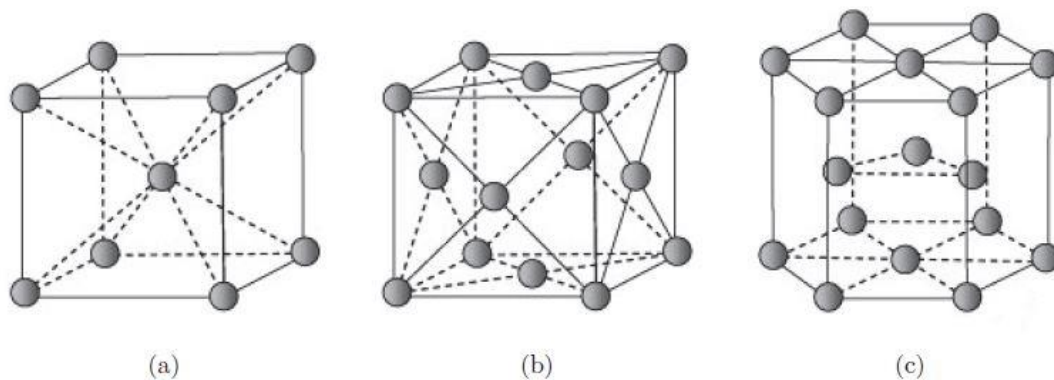


Figura 3.2 - a) Estrutura cúbica de corpo centrado (BCC), b) Estrutura cúbica de face centrada (FCC) e c) Estrutura hexagonal compacta [22].

Como se observa na figura 3.2 a estrutura cúbica de corpo centrado (BCC) é constituída por um átomo no meio da célula e um em cada canto, sendo 9 no total. Cada átomo no canto irá pertencer a um canto de outra célula fazendo com que cada átomo no canto seja partilhado por 8 células.

A estrutura cúbica de face centrada é constituída por átomos em cada face e em cada canto da célula. Como na estrutura BCC os átomos do canto irão ser partilhados por 8 células porém cada átomo da face será apenas partilhado com a célula adjacente.

A estrutura hexagonal compacta é composta por 3 camadas de átomos. Sendo a camada superior e inferior igual no número de átomos (6 átomos) e no arranjo entre eles (na forma de hexágono possuindo 1 átomo ao centro). A camada intermédia será diferente das outras duas, onde 3 átomos constituem um formato triangular.

3.2 Alumínio

O alumínio é um material versátil e com características muito específicas. Em muitas aplicações tem substituído outros metais como o cobre, o aço e o ferro. A sua baixa densidade, uma relação resistência-peso muito boa, boa resistência à corrosão, o preço acessível e a relativa abundância são algumas das suas excelentes características. Existem várias séries de ligas de alumínio em que a combinação com outros elementos associada a tratamentos térmicos e mecânicos permitem obter um vasto leque de propriedades mecânicas, permitindo obter gamas de propriedades e características, a tensão de cedência ou a ductilidade para fins específicos [23].

3.2.1 Ligas de alumínio

As ligas de alumínio podem ser divididas em duas grandes categorias, as ligas forjadas e as ligas fundidas. As ligas fundidas contêm uma maior quantidade de elementos de liga do que as forjadas, sendo as fundidas mais apropriadas para peças de fundição enquanto as forjadas se enquadram mais em processos de moldagem como a laminação e a extrusão.

Existe um sistema de designação das ligas de alumínio que é bastante usado e reconhecido por cerca de 90% da indústria do alumínio. São usados 4 algarismos como notação, sendo o primeiro a referência ao grupo de liga (elemento de liga mais presente), o segundo define as modificações à liga original ou impurezas e os dois últimos são usados para diferenciar as ligas dentro da mesma série. A tabela 3.1 resume o sistema de designação das ligas de alumínio e suas características [23].

Tabela 3.1 - Designação das ligas de alumínio e suas características [23].

<i>Liga</i>	<i>Principal(ais) elemento(s) de liga</i>	<i>Comportamento básico e características de desempenho</i>
<i>1XXX</i>	Principalmente alumínio puro	Baixa resistência, formabilidade e ductilidade extremamente altas, excelente condutor eléctrico e muito boa resistência à corrosão
<i>2XXX</i>	Cobre (Cu)	Resistência relativamente elevada, baixa ductilidade, menos resistente à corrosão, facilmente soldado e tratado termicamente
<i>3XXX</i>	Manganês (Mn)	Aumento moderado da resistência, formabilidade e ductilidade relativamente elevadas, muito boa resistência à corrosão, facilmente soldado
<i>4XXX</i>	Silício (Si)	Baixa a média resistência, menor resistência à corrosão, excelente fluência e características de acabamento, facilmente soldado
<i>5XXX</i>	Magnésio (Mg)	Resistência muito elevada, facilmente soldado, excelente resistência à corrosão
<i>6XXX</i>	Magnésio (Mg) e Silício (Si)	Resistência muito elevada, excelente resistência à corrosão, facilmente extrudida, facilmente soldada e tratada termicamente
<i>7XXX</i>	Zinco (Zn)	Pode fornecer a maior resistência de entre todas as ligas, menos resistente à corrosão, tratada termicamente
<i>8XXX</i>	Outros elementos	Contém os elementos de liga menos frequentes como o Ferro (Fe) ou o Estanho (Sn), as características dependem do elemento de liga principal
<i>9XXX</i>	Não atribuído	-

3.2.2 Liga de alumínio 5083

A liga de alumínio 5083 contém 5,2% magnésio, 0,1% manganês e 0,1% cromo. Quando temperado possui grande resistência e uma boa formabilidade devido à sua excelente

ductilidade (melhor que a maioria das ligas da série 5000). Esta liga tem, também, uma grande resistência à corrosão e é muito utilizado na construção naval. Como todas as ligas de alumínio possui baixa densidade e é um excelente condutor térmico. Além da indústria naval esta liga tem outras aplicações como reservatórios de pressão soldados, torres de televisão, máquinas de perfuração, equipamentos de transporte, placas de protecção (blindagem) [24].

3.2.2.1 *Propriedades da liga de Alumínio 5083*

3.2.2.1.1 *Composição química da liga de Alumínio 5083*

Na tabela 3.2 encontra-se a composição química da liga de alumínio 5083.

Tabela 3.2 - Composição química da liga de alumínio 5083 [24].

<i>Elemento</i>	<i>%</i>	<i>Elemento</i>	<i>%</i>
Alumínio	Restante	Silício	0,4 máx
Magnésio	4,0 - 4,9	Ferro	0,4 máx
Manganês	0,4 - 1,0	Cobre	0,1 máx
Crómio	0,05 - 0,25	Outros, cada	0,05 máx
		Outros, total	0,15 máx

3.2.2.1.2 *Resistência à corrosão*

A liga de alumínio 5083 tem uma excelente resistência à corrosão. Esta resistência é boa em soluções aquosas cujo pH varia de 4 a 9.

A resistência à corrosão das ligas de alumínio assenta numa película de óxido que forma uma superfície de protecção que quando danificada é prontamente reparada pela rápida reacção entre o alumínio e o oxigénio. Para aumentar a sua resistência à corrosão, esta liga pode ser ainda anodizada aumentando-se a espessura da película de protecção.

Por ser um metal reactivo, o alumínio pode corroer mais rapidamente que a maioria dos outros metais quando sujeito a correntes galvânicas [24].

3.2.2.1.3 *Propriedades físicas*

Algumas das propriedades físicas da liga de alumínio 5083 estão presentes na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Propriedades físicas da liga de alumínio 5083 [24].

<i>Propriedade</i>	<i>a</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>
Densidade	20 °C	2,66	Kg/m ³
Módulos de elasticidade	Tensão	20 °C	70,3
	Torção		26,4
	Compressão	20 °C	71,7
Temperatura de fusão		574-638	°C
Coefficiente de expansão médio	20 °C	24,2	x10 ⁻⁶ /°C
Condutividade térmica	25 °C	120	W/m.°C
Resistividade térmica	20 °C	59,5	Nano-ohm.m

3.2.2.1.4 *Soldabilidade*

A liga de alumínio 5083 pode ser soldada usando os processos TIG e MIG. O alumínio, para ser soldado, necessita de estar bastante seco e limpo para evitar a contaminação e as porosidades na soldadura. É essencial que todos os vestígios deixados pela soldadura ou brasagem sejam removidos, esfregando com água quente [24].

3.2.2.1.5 *Tratamento térmico*

A liga 5083 é recozida a 350 °C, sendo que o tempo e a taxa de arrefecimento não são importantes. O alívio de tensões raramente é necessário, porém podem ser feitos a uma temperatura de 220 °C. Se a perda de resistência for um importante parâmetro devem ser realizados testes de alívio de tensões [24].

Resumo das características

Um breve resumo das características da liga de alumínio 5083 encontra-se na tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Resumo das características da liga de alumínio 5083 [24].

Resistência à corrosão	Muito bom
Formabilidade	Bom
Soldabilidade	Muito bom
Maquinabilidade	Razoável
Brasagem	Fraco

3.3 Modelos constitutivos dos materiais

Um modelo constitutivo é uma descrição matemática do comportamento de um determinado material quando sujeito a esforços. Basicamente estabelece a relação entre as tensões aplicadas ao material e as deformações sofridas. Muitos e sofisticados modelos constitutivos têm sido desenvolvidos na tentativa de procurar ferramentas para uma melhor descrição do comportamento mecânico dos materiais possibilitando até o desenvolvimento ou melhoramento de novos produtos.

Desenvolver um modelo constitutivo capaz de capturar todos os fenómenos, quer a nível macroscópico quer a nível microscópico, que ocorrem na deformação plástica ou na fractura dúctil de um material é tarefa praticamente impossível. A plasticidade pode ser estudada a várias escalas porém, ao nível microscópico tal análise é raramente feita sem ser em ambiente laboratorial, tal a quantidade de informação e a dificuldade da modelação dos fenómenos a tais escalas. Assim sendo, os modelos macroscópicos tornam-se mais atractivos. Não sendo possível acompanhar a evolução de todas as características microscópicas em detalhe, englobam-se estas em poucas variáveis macroscópicas [25], mais fáceis de acompanhar e controlar.

Para materiais como metais e ligas, foi proposto como se disse, nas últimas décadas, um grande número de modelos mas apenas alguns foram usados eficazmente em códigos que usam o método dos elementos finitos (FEM).

O facto da maioria dos modelos serem complexos e de envolverem um grande número de parâmetros leva a que estes modelos não sejam tão utilizados. Além do mais a sua calibração é complexa, sendo difícil a identificação dos diversos parâmetros necessários através de simples testes macroscópicos [26].

3.3.1 Modelo constitutivo do alumínio

Existem vários modelos disponíveis que traduzem bem o comportamento do alumínio. Entre eles encontram-se o modelo proposto por Zerilli e Armstrong em [27] e [28], o modelo proposto por Perzyna em [29] e [30], o modelo proposto por Bodner e Partom em [31], o modelo proposto por Johnson e Cook [32]. Nesta tese será focado o modelo de material de Johnson-Cook (JC).

3.3.1.1 Modelo de Zerilli-Armstrong

O modelo Zerilli-Armstrong tem um fundamento físico e foi objecto de uma vasta gama de modificações. A tensão de cedência é dada por

$$Y = A + [C_1 + C_2\sqrt{\dot{\varepsilon}}]e^{(-C_3 + C_4 \ln \dot{\varepsilon})T} + C_5 \varepsilon^n \quad (3.1)$$

onde ε é a deformação, $\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação e T é a temperatura. Uma escolha apropriada das constantes (A , C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 e n) determina que o modelo possa ser aplicado tanto a estruturas cúbicas de face centrada ($C_1=C_5=0$), como a estruturas cúbicas de corpo centrado ($C_2 = 0$), em metais. O modelo é descrito em *Zerilli and Armstrong* [28], [28].

O modelo pode ser usado na análise de diferentes materiais (estrutura cúbica de face centrada e cúbica de corpo centrado) e a diferentes regimes de taxas de deformação e para uma gama de temperaturas entre a temperatura ambiente e $0.6T_m$ (T_m é a

temperatura de fusão). Uma versão modificada do modelo Zerilli-Armstrong pode prever o comportamento dos materiais a altas temperaturas, acima de $0.6T_m$, numa vasta gama de deformações, taxas de deformação e temperaturas [33].

3.3.1.2 Modelos do tipo Arrhenius

Não se trata verdadeiramente de um modelo mas de uma lei de variação resultante de observações de Arrhenius sobre a existência de estados de activação em reacções químicas. Verifica-se que a taxa de deformação plástica segue frequentemente uma lei de Arrhenius, facto que é frequentemente citada em artigos sobre a matéria. Esta lei tem sido aplicada com sucesso na previsão do comportamento da tensão de escoamento a elevadas temperaturas.

Os efeitos da temperatura e da taxa de deformação no comportamento do material podem ser representados por Z numa equação exponencial como a equação 3.2.

$$Z = \dot{\epsilon} e^{\left(\frac{Q}{RT}\right)} \quad (3.2)$$

$$\dot{\epsilon} = Af(\sigma)e^{-\left(\frac{Q}{RT}\right)} \quad (3.3)$$

Onde

$$f(\sigma) = \begin{cases} \sigma^{n'} & \text{se } \alpha\sigma < 0.8 \\ e^{(\beta\sigma)} & \text{se } \alpha\sigma > 1.2 \\ [\sinh(\alpha\sigma)]^n & \text{para todo } \sigma \end{cases} \quad (3.4)$$

Onde $\dot{\epsilon}$ é a taxa de deformação em s^{-1} , R é a constante dos gases ideais ($R = 8.3145 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$), T é a temperatura absoluta em K, Q é a energia de activação da deformação em Jmol^{-1} , A , n' , β , α e n são constantes do material e $\alpha = \beta/n'$.

Para determinar as constantes do material no modelo constitutivo são efectuados testes de compressão isotérmicos onde é comparada a tensão verdadeira com a deformação verdadeira [33].

3.3.1.3 *Modelo de Bodner-Partom*

O modelo Bodner-Partom [31] foi proposto nos anos 70. Este modelo tem sido usado frequentemente na modelação do endurecimento elasto-viscoplástico de vários materiais em regimes de elevada taxa de deformação. Para demonstrar as equações Bodner-Partom, primeiro é necessário assumir que o material é isotrópico e está sujeito a uma deformação, onde a taxa de deformação total $\dot{\epsilon}$ é decomposta na parte elástica $\dot{\epsilon}^E$ e na parte inelástica $\dot{\epsilon}^I$ de acordo com a fórmula

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^E + \dot{\epsilon}^I \quad (3.5)$$

Sendo assim, a relação entre a taxa de tensão $\dot{\sigma}$ e a taxa de deformação $\dot{\epsilon}^E$ é descrita por

$$\dot{\sigma} = B^* : \dot{\epsilon}^E = (1 - D).B : (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}^I) \quad (3.6)$$

Onde $D \in \langle 0,1 \rangle$ é o parâmetro escalar do dano isotrópico e B^* é o tensor efectivo da elasticidade para o material deformado que é dado pelo tensor de elasticidade B reduzido pelo parâmetro de dano [34].

Uma descrição detalhada das equações de Bodner-Partom, bem como algumas alterações efectuadas ao modelo ao longo do tempo, podem ser encontradas em [31], [34], [35].

3.3.1.4 *Modelo de Johnson-Cook (JC)*

Proposto por Johnson e Cook em [32], este modelo de natureza fenomenológica é bastante popular e largamente usado na modelação do comportamento dos materiais.

Envolve poucos parâmetros e está comprovado que se ajusta bem às simulações numéricas de análises estáticas e dinâmicas. A maior vantagem deste modelo prende-se com o facto de poder ser calibrado com um pequeno grau de dificuldade recorrendo apenas a alguns dados experimentais, sendo capaz de prever a tensão de escoamento a diferentes taxas de deformação e temperaturas. No entanto, estes dois parâmetros aparecem desacoplados neste modelo levando a que sejam independentes um do outro, o que na maioria dos metais não corresponde à verdade, pois como já foi investigado a taxa de deformação aumenta com o aumento da temperatura [23], [36].

Existe alguma literatura onde este modelo foi usado em ligas de alumínio 5083 e 5086. Borvik *et al.* [37] estudou a perfuração de chapas de alumínio AA5083-H116 com várias espessuras, através de projecteis de aço de ponta cónica. Também Grytten *et al.* [38] centrou-se na perfuração de chapas de alumínio AA5083-H116 com a diferença da velocidade de perfuração ser baixa. Abdulhamid *et al.* [39] investigou, numérica e experimentalmente, o impacto a média velocidade de projecteis em placas quadradas de alumínio AA5086-H111.

No modelo Johnson-Cook é assumido que o material é isotrópico, sendo que grande parte do sucesso ao usar este modelo se deve à sua simplicidade e ao ajuste dos seus parâmetros para vários materiais. O modelo original pode ser descrito por

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (3.7)$$

Onde σ é a tensão de escoamento equivalente, ε é a deformação plástica equivalente. A , B , n , m e C são constantes do material que precisam de ser determinadas [23], [32], [36]. $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ é a taxa de deformação adimensional ($\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação e $\dot{\varepsilon}_0$ a taxa de deformação de referência). T^* é a temperatura homóloga e é expressa por

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (3.8)$$

onde T é a temperatura ambiente, T_m é a temperatura de fusão e T_r é a temperatura de referência ($T \geq T_r$).

Na expressão 3.7, o primeiro conjunto de parênteses dá-nos o efeito da deformação na tensão de escoamento, o segundo conjunto representa o efeito da taxa de deformação e o terceiro conjunto representa a dependência da temperatura da tensão de escoamento.

O modelo original Johnson-Cook tem algumas limitações ao não considerar a deformação e de não considerar o efeito de amolecimento resultante do aumento da temperatura mas é simples de implementar e os parâmetros são facilmente obtidos a partir de um limitado número de experiências. O modelo JC assume que os diversos efeitos considerados são multiplicativos, nomeadamente a deformação, taxa de deformação e a temperatura [36].

Por todas as vantagens inerentes a este modelo aqui referenciadas foi este o modelo usado nas simulações numéricas efectuadas neste trabalho.

Nas situações onde existem taxas de deformação muito pequenas, a função logarítmica $\ln \dot{\epsilon}^*$ na equação 3.7 irá aproximar-se de $-\infty$, o que resulta em dificuldades numéricas. Para evitar tal situação surge a versão modificada do modelo de Johnson-Cook que pode ser descrita por

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + \dot{\epsilon}^*)^C(1 - T^{*m}) \quad (3.9)$$

São usados os mesmos parâmetros e constantes do material que aparecem na equação 3.7 mas a constante C tomará outro valor devido à alteração na formulação [23].

Capítulo 4 Ensaio experimental

Neste capítulo descrevem-se os ensaios experimentais, realizados no âmbito de um outro projecto de investigação mas que se revestem de interesse para a realização da presente tese de mestrado.

O objectivo foi a recolha de dados experimentais que permitam validar um modelo constitutivo que descreva o comportamento de chapas planas de alumínio (AA 5083-H111 ou H116) quando expostas ao impacto de uma onda de choque resultante de uma explosão ao ar livre.

4.1 Preparação do ensaio experimental

Foram preparadas 15 chapas de teste, de dimensão 400x400 mm e com espessura de 3,1 mm numa liga de alumínio-magnésio AA 5083-H111. Foi desenhada uma grelha rectangular (260x260 mm) na zona de trabalho de cada chapa com espaçamentos, vertical e horizontal, de 20 mm. Em cada chapa foi ainda marcado o centro para colocação do explosivo.

As chapas de alumínio foram aparafusadas a uma estrutura em aço, semelhante a uma moldura. Em todos os ensaios o dispositivo foi nivelado, colocado um *stand-off* (objecto que permite dar a distância pretendida do explosivo à chapa) em espuma de poliuretano expandido, no centro da chapa e verificado o binário de aperto dos parafusos (15 kNm). Foi, também, determinado o peso específico do explosivo através da medição do volume em provete graduado. Ao volume medido de 72 ml correspondeu um peso de 98.89 g, o que corresponde a um peso específico de 1373 Kg/m^3 . A figura 4.1 ilustra a estrutura montada para dar início à detonação.

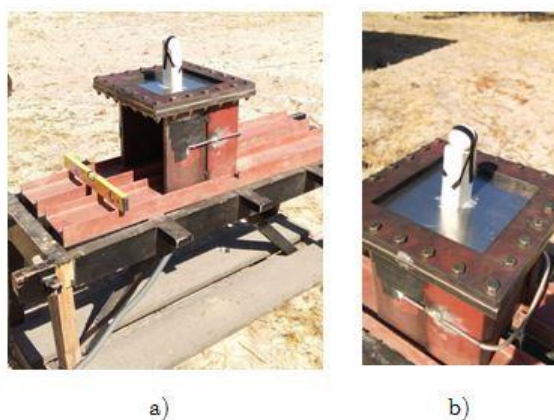


Figura 4.1 - a) Estrutura montada, b) Vista aproximada da colocação do explosivo no centro da chapa (com stand-off).

Após ter sido dado por concluído o ensaio experimental, isto é, as 15 chapas terem sido sujeitas a uma onda de choque explosiva, em que houve variação da distância usada e da massa do explosivo, foi necessário excluir duas das chapas pois atingiram o ponto de ruptura. Para a investigação realizada nesta tese não é do interesse o estudo da ruptura, apenas a deformação plástica das chapas. Na tabela 4.1 está disponível a informação da massa do explosivo bem como o *stand-off* de todos os ensaios realizados.

Tabela 4.1 - Massa e stand-off de cada ensaio realizado.

<i>Chapa n^o</i>	<i>Massa do explosivo (g)</i>	<i>Stand-off do explosivo ao centro da chapa (mm)</i>
1	43	150
2	62	150
3	89	150
4	40	130
5	59	130
6	87	130
7	42	125
8	61	130
9	85	135
10	41	100
11	80	100
12	60	100
13	90	80
14	60	81
15	75	85

4.2 Resultados experimentais

Após submeter as chapas à onda de choque explosiva obteve-se uma deformação plástica no material formando uma concavidade. Esta deformação plástica foi medida em laboratório, sendo construído um dispositivo de medição para o efeito, e posteriormente usados para comparar com a simulação efectuada no *software* LS-DYNA.

A figura 4.2 mostra algumas das chapas após o impacto da onda de choque proveniente da detonação.

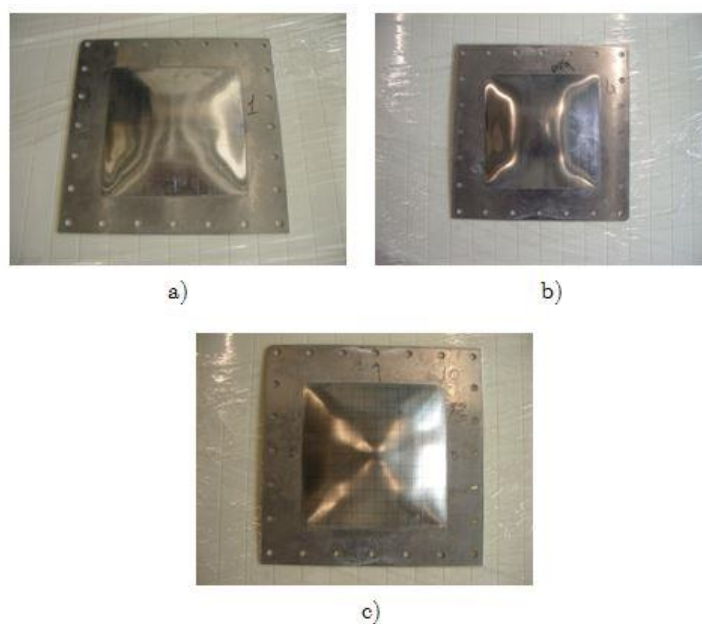


Figura 4.2 - Chapas deformadas. a) Ensaio nº 1, b) Ensaio nº 4 e c) Ensaio nº 10.

Na medição da deformação foram usados determinados pontos marcados na chapa através da grelha desenhada inicialmente. A figura 4.3 mostra um esquema básico da marcação desses pontos e a respectiva numeração.

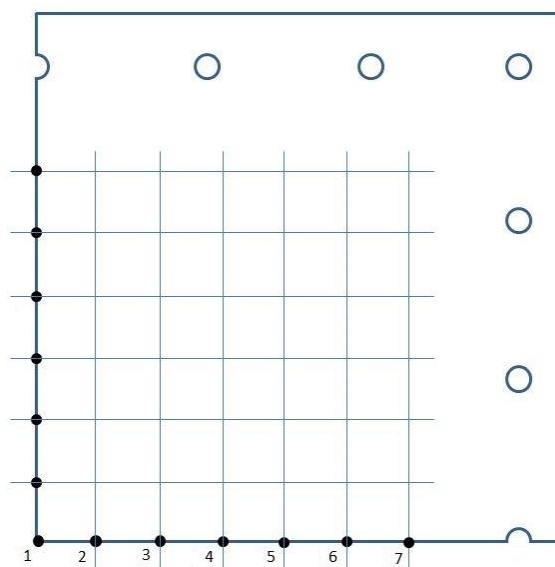


Figura 4.3 - Esquema da marcação dos pontos da medição da deformação.

A figura 4.3 mostra apenas $1/4$ da chapa pois, devido à simetria, não é necessário a representação total.

Na tabela 4.2 encontram-se as coordenadas dos pontos marcados para efeitos de comparação com a deformação obtida numericamente.

Tabela 4.2 - Coordenadas dos pontos marcados para efeitos de medição da deformação.

Ponto	Coordenadas		
	(mm)		
	x	y	z
1	0	0	0
2	20	0	0
3	40	0	0
4	60	0	0
5	80	0	0
6	100	0	0
7	120	0	0

Na figura 4.4 encontra-se o dispositivo fabricado e usado para a medição da deformação das chapas que consiste numa placa de acrílico com uma grelha idêntica à marcada nas chapas e onde as intersecções são furadas para permitir a passagem de uma haste. A placa de acrílico é apoiada em 4 pontos e é possível garantir o nivelamento desta através de um fuso nesses 4 apoios. Com a chapa posicionada por baixo da chapa, as grelhas coincidentes e medindo o comprimento da haste nos vários pontos retira-se as deformações ocorridas na chapa.

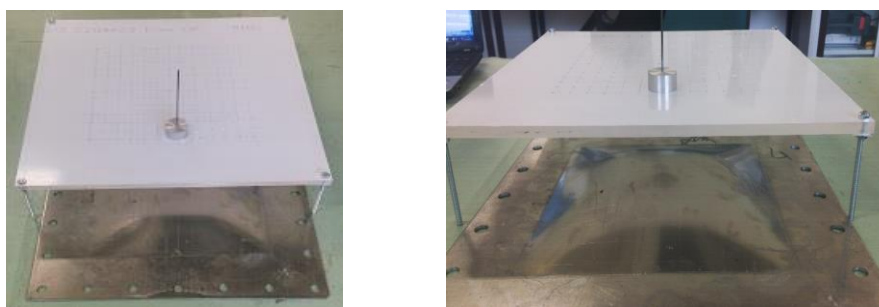


Figura 4.4 - Dispositivo fabricado para medir as deformações das chapas.

Após concluídos os ensaios procedeu-se à medição das chapas deformadas para a obtenção dos pontos de interesse na comparação entre os perfis deformados.

As deformações obtidas encontram-se na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Resultados obtidos na medição da deformação das chapas.

Ponto	Deformação (mm)												
	Chapa n°1	Chapa n°2	Chapa n°3	Chapa n°4	Chapa n°5	Chapa n°6	Chapa n°7	Chapa n°8	Chapa n°9	Chapa n°10	Chapa n°11	Chapa n°12	Chapa n°14
1	25,3	32,9	38,0	29,4	46,9	51,3	28,7	35,4	45,9	44,0	72,3	54,9	63,7
2	23,8	31,5	35,7	28,4	45,3	49,9	26,8	33,9	44,2	39,9	69,0	50,2	57,9
3	20,9	28,2	33,1	26,6	41,4	46,5	24,7	31,6	39,9	33,3	60,3	43,0	48,5
4	17,6	23,7	28,3	23,4	35,5	40,6	21,3	27,3	33,8	28,2	52,4	37,5	40,7
5	13,8	18,1	22,2	18,1	27,3	30,5	15,4	20,6	25,6	21,5	43,3	30,3	30,1
6	9,1	11,5	13,1	11,3	17,5	18,0	8,8	12,8	15,6	13,4	24,3	20,2	17,3
7	3,8	4,7	4,5	4,1	7,3	5,6	2,9	4,4	5,5	5,4	9,4	9,1	4,0

Os dados da deformação referentes às chapas n° 13 e n° 15 não se encontram na tabela 4.3 devido à ruptura das mesmas durante a realização dos ensaios.

Para uma melhor percepção dos efeitos da massa do explosivo e do *stand-off* na deformação das chapas apresentam-se, nas figuras 4.5, 4.6 e 4.7, o perfil de deformação de todos os ensaios.

Os perfis de deformação foram agrupados em três conjuntos (de acordo com o *stand-off*). De notar que os ensaios n° 7 e n° 9, apesar de não terem um *stand-off* igual aos outros ensaios do mesmo conjunto (125 mm e 135 mm, respectivamente), foram incluídos no mesmo devido à diferença de *stand-off* ser mínima. Faz-se uma referência também ao ensaio n° 14 por ter sido incluído no conjunto onde o *stand-off* se situa nos 100 mm, apesar do *stand-off* usado neste ensaio ser de 81 mm. Seria o único ensaio com esta gama de *stand-off*, pois as chapas usadas nos ensaios n° 13 e n° 15 originaram ruptura. Assim, optou-se por essa decisão.

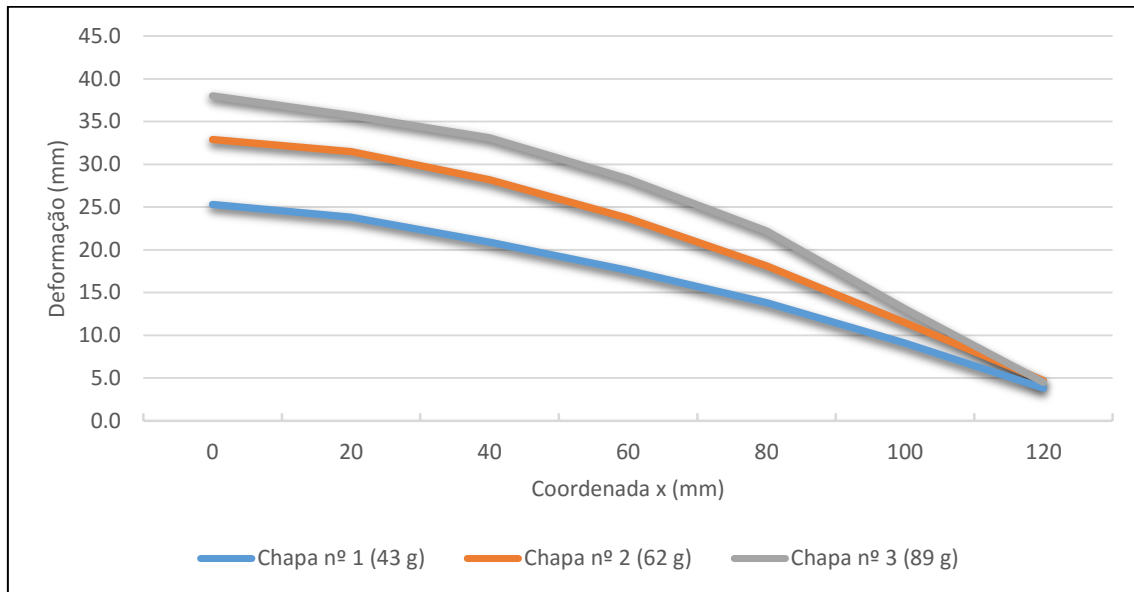


Figura 4.5 - Comparação entre os perfis de deformação com stand-off de 150 mm.

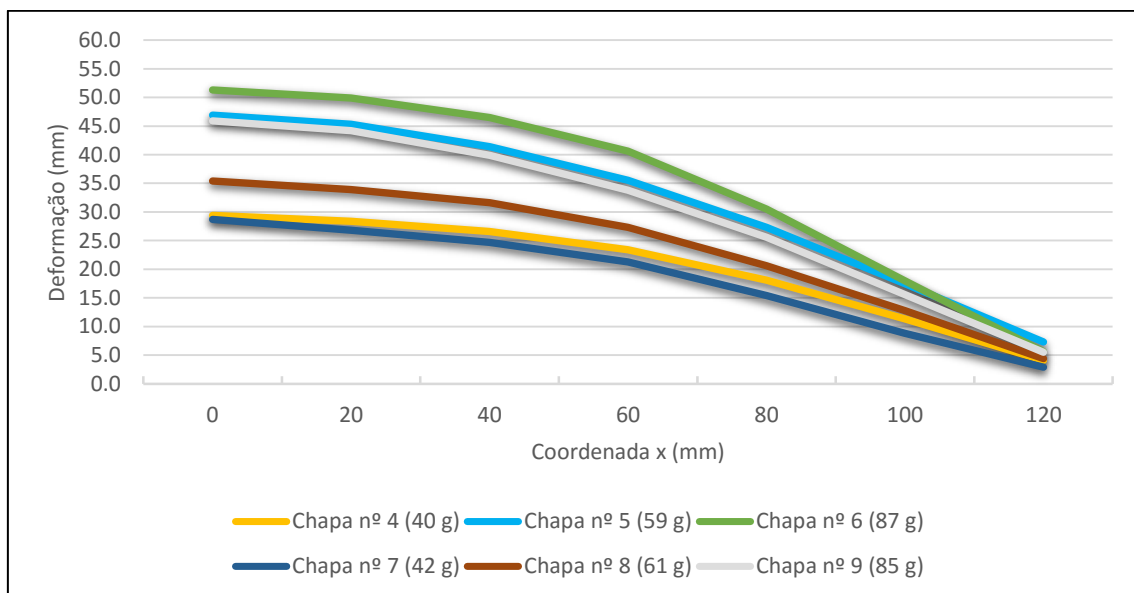


Figura 4.6 - Comparação entre os perfis de deformação com stand-off de 130 mm.

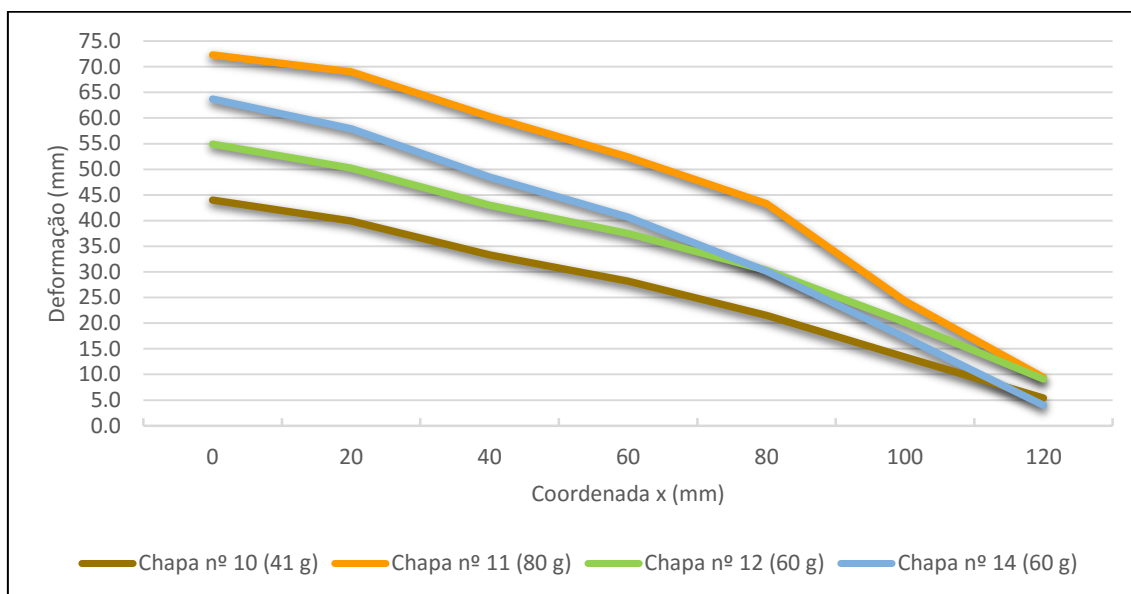


Figura 4.7 - Comparação entre os perfis de deformação com stand-off de 100 mm.

Notam-se alguns detalhes nas curvas obtidas das deformadas.

O caso da chapa nº 10 onde se nota um pico na deformação no centro da mesma que indica a aproximação ao ponto de ruptura e no caso da chapa nº 11 que demonstra uma certa irregularidade na zona próxima ao encastramento da chapa na moldura. Estes fenómenos intensificam-se com a conjugação de dois parâmetros, a quantidade de carga explosiva usada e a distância entre esta e o alvo.

Capítulo 5 Software de análise ao fenómeno explosivo

Serve este capítulo de introdução ao funcionamento do *software* (LS-DYNA) usado na realização deste trabalho. Este *software* assenta em dois métodos tradicionais de fazer avançar a solução numérica no tempo, são eles o método implícito e o método explícito. Será dado um maior foco ao método explícito por ser este o utilizado. Para a solução de problemas de elementos finitos serão introduzidas as abordagens Lagrangeana, Eulereana e o método Arbitrário Lagrangeano-Eulereano.

5.1 Solver LS-DYNA

O LS-DYNA é um software desenvolvido pela empresa Livermore Software Technology Corporation (LSTC) e serve como ferramenta de análise por elementos finitos de problemas dinâmicos e não lineares tais como testes de impacto em veículos, para análise da segurança dos passageiros, moldagem de chapas, maquinagem de peças de metal, etc. O LS-DYNA utiliza os dois métodos de integração direta no tempo (implícito e explícito), mas o método explícito é o mais adequado para problemas dinâmicos transientes não lineares como impactos e explosões. Trata-se de um método que se baseia nas diferenças finitas centrais [40].

O LS-DYNA utiliza três metodologias de elementos finitos para a análise de problemas não lineares, sendo eles: o método Lagrangiano, o método Euleriano e o método Arbitrário Lagrangiano-Euleriano (ALE). A principal diferença entre eles está na interação entre o movimento da malha de elementos finitos e o movimento do material [41].

5.1.1 Método Lagrangiano

O método Lagrangiano está presente na maior parte dos casos que utilizam o método de integração explícito. Na abordagem Lagrangiana a malha de elementos finitos move-se juntamente com o material, os nós da malha de elementos finitos permanecem coincidentes com os nós da malha do material. As suas vantagens prendem-se com o facto de conseguir lidar com interfaces complexas e com a sua capacidade de analisar pontos do material. Em geral os seus resultados são os mais precisos. As suas limitações estão ligadas ao facto de em análises dinâmicas, não lineares envolvendo grandes deformações, a excessiva distorção da malha de elementos finitos poder conduzir a resultados menos precisos, podendo tornar a análise muito demorada ou mesmo impossível [42], [43], [44].

Na figura 5.1 é possível ver que a configuração da malha de referência é igual à configuração da malha do material. A malha de elementos finitos (traço contínuo) contém o ponto m que coincide com um ponto do material (ponto X). A malha do material (traço descontínuo) segue coincidente com a malha de elementos finitos como se pode ver na deformação ocorrida.

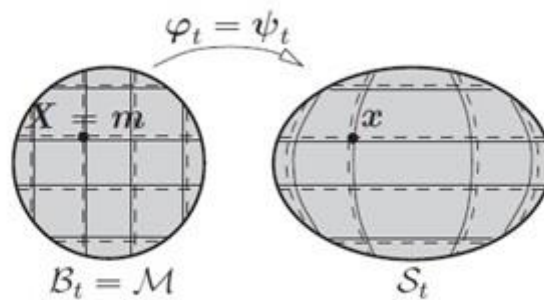


Figura 5.1 - Descrição da formulação Lagrangiana [43].

É possível prosseguir com a simulação quando existem grandes deformações na malha utilizando uma técnica (*manual rezoning* ou reconstrução manual da malha) de maneira a controlar essas deformações [43], [44], [45]. Porém esta técnica é difícil de efectuar e leva muito tempo a concretizar, além de produzir resultados diferentes para cada indivíduo que executa a operação [45].

5.1.2 *Método Euleriano*

O método Euleriano consiste numa sobreposição de duas malhas distintas. A malha de referência permanece fixa no espaço enquanto a malha do material flui através desta. A vantagem do método reside no facto de estando a malha de elementos fixa no espaço a mesma não está sujeita a grandes deformações e não existe o risco de o programa bloquear por excessiva distorção dos elementos. Este método é principalmente usado em problemas onde ocorrem deformações severas como é o caso da dinâmica de fluidos, a sua vantagem prende-se, então, com o facto de os elementos não se deformarem com o material. O facto de o material "fluir" através da malha obriga a complexos algoritmos de advecção (transporte) que reduzem também a precisão dos resultados. Além disso as interfaces entre materiais diferentes são difíceis de definir com precisão que leva a complicações em problemas com mais de uma dimensão, sendo esta uma limitação do método [42], [43], [44].

Na figura 5.2 encontra-se um caso ilustrativo deste método onde a malha de elementos finitos (traço contínuo) é fixa no domínio espacial e a malha do material (traço descontínuo) flui através desta.

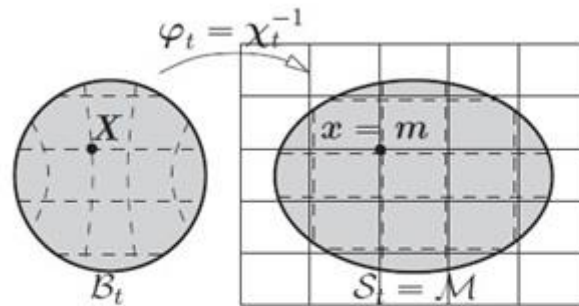


Figura 5.2 - Descrição da formulação Euleriana [43].

5.1.3 Método ALE

No método Arbitrário Lagrangiano-Euleriano a malha de referência move-se de forma arbitrária e independente do material. Este método capta as vantagens dos dois métodos anteriores (método Lagrangiano e método Euleriano) ao manter os nós na interface como no método Lagrangiano e ao mesmo tempo faz uma boa distribuição dos elementos no domínio espacial como no método Euleriano. As desvantagens dos dois métodos anteriores são ainda minimizadas por este no caso do transporte de material entre elementos, aumentando a precisão dos resultados [42], [43], [44]. Ou seja apesar de existir transporte de material entre células, o mesmo é minimizado pelo facto de a malha de elementos finitos ter algum movimento arbitrário, acompanhando parcialmente o material.

A figura 5.3 ilustra a abordagem ALE.

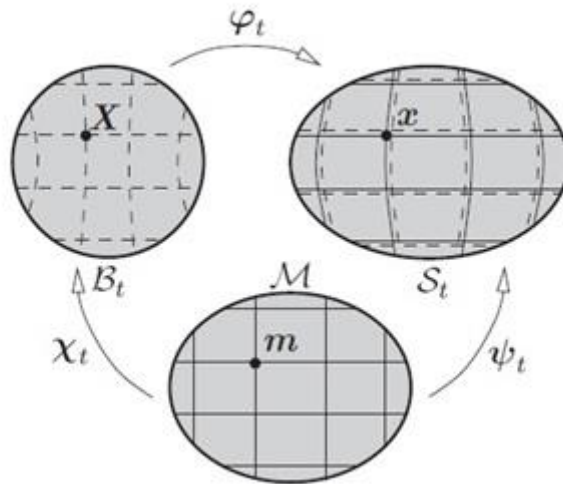


Figura 5.3 - Descrição da formulação ALE [43].

Este método é, também, adequado para a análise de explosões onde se apresentam vários materiais em cada elemento como é o caso do ar e dos produtos da reacção do explosivo, produzidos na detonação. Para tal são usadas técnicas que admitem a coexistência de vários materiais no mesmo elemento integrando as equações dos balanços (massa, momento e energia) [46].

5.2 Integração temporal

Um problema não-linear de variação no tempo pode ser resolvido pelo método dos elementos finitos usando tanto a integração implícita como a integração explícita.

Uma integração implícita requer um equilíbrio no tempo t_{n+1} , sendo que para isso é necessário resolver iterativamente um considerável sistema de equações a cada “time step”. É sempre numericamente estável e convergente mas, por norma, com um custo computacional maior que no método explícito.

Usando uma integração explícita é considerado um equilíbrio no tempo t_n e as acelerações são calculadas para encontrar o equilíbrio do sistema. Este método permite

calcular o deslocamento do tempo t_{n+1} a partir da variável obtida no passo de tempo anterior, t_n , e assim sucessivamente e de forma simples. Assim, não será necessário resolver sistemas de equações relativamente grandes, porém o método explícito é apenas condicionalmente estável dependendo do “*time step*” usado [42], [47].

Para o tipo de problemas como a detonação de um explosivo e a propagação da onda proveniente da mesma, impactos a grande velocidade, o número de “*steps*” necessários usando o método explícito não se torna excessivo. Usando o método implícito com um “*time step*” semelhante implica um consumo de tempo bastante maior, e se o “*time step*” aumentar muito a solução apresentará erros pois as características essenciais não são tidas em conta (apesar de se manter estável). Assim, independentemente da natureza do problema, a integração explícita será o método recomendado [42].

Numa integração implícita é usado o método de Newmark, enquanto numa integração explícita é aplicado o método das diferenças centrais [40].

5.2.1 Método de Newmark

Considere-se a equação de equilíbrio (5.1):

$$[M]\ddot{U} + [C]\dot{U} + [K]U = R \quad (5.1)$$

Onde $[M]$ é a matriz da massa, $[C]$ é a matriz do amortecimento, $[K]$ é a matriz da rigidez, U é o vector deslocamento, \dot{U} é o vector velocidade, \ddot{U} é o vector aceleração e R é o vector do carregamento aplicado ao sistema.

A integração de Newmark assume que o deslocamento, a velocidade e a aceleração no tempo t e $t + \Delta t$ são:

$$\dot{U}_{n+1} = \dot{U}_n + [(1 - \delta)\ddot{U}_n + \delta\ddot{U}_{n+1}]\Delta t \quad (5.2)$$

$$U_{n+1} = U_n + \dot{U}_n \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{U}_n + \alpha \ddot{U}_{n+1} \right] \Delta t^2 \quad (5.3)$$

Onde α e δ são parâmetros a serem determinados para obter precisão e estabilidade na integração. No método de Newmark $\alpha = \frac{1}{4}$ e $\delta = \frac{1}{2}$. Para determinar o deslocamento, velocidade e aceleração no tempo $t + \Delta t$, a equação de equilíbrio (5.1) pode ser escrita como:

$$M\ddot{U}_{n+1} + C\dot{U}_{n+1} + KU_{n+1} = R_{n+1} \quad (5.4)$$

Para determinar (5.4) é primeiro determinado \ddot{U}_{n+1} (aceleração no tempo $t + \Delta t$) pela equação (5.3), em função do deslocamento U_{n+1} , sendo depois substituído na equação (5.2). Assim, a aceleração \ddot{U}_{n+1} e a velocidade \dot{U}_{n+1} são determinadas, as duas em função de uma única incógnita, U_{n+1} (deslocamento no tempo $t + \Delta t$).

A velocidade \dot{U}_{n+1} e a aceleração \ddot{U}_{n+1} , previamente determinadas, são substituídas na equação (5.4) para determinar o deslocamento U_{n+1} . Por fim, a velocidade \dot{U}_{n+1} e a aceleração \ddot{U}_{n+1} , podem ser calculadas usando as equações (5.2) e (5.3) [40].

5.2.2 Método das diferenças finitas centrais

Os métodos populares usados para resolver problemas dinâmicos transientes são explícitos. A solução passa por avançar do tempo t^n para t^{n+1} sem recorrer a qualquer iteração, sendo a diferença entre eles definida como “*time step*”, $\Delta t^{n+\frac{1}{2}}$ [42], [48].

O método das diferenças centrais é usado na maioria dos hidrocódigos para fazer avançar a posição da malha no tempo. É baseado na aproximação da diferença central de segunda ordem, facilmente obtida da expansão das séries de Taylor [42]:

$$f^n = f^{n+\frac{1}{2}} - \dot{f}^{n+\frac{1}{2}} \left(\frac{\Delta t^{n+\frac{1}{2}}}{2} \right) + \frac{1}{2} \ddot{f}^{n+\frac{1}{2}} \left(\frac{\Delta t^{n+\frac{1}{2}}}{2} \right)^2 \dots \quad (5.5)$$

$$f^{n+1} = f^{n+\frac{1}{2}} + \dot{f}^{n+\frac{1}{2}} \left(\frac{\Delta t^{n+\frac{1}{2}}}{2} \right) + \frac{1}{2} \ddot{f}^{n+\frac{1}{2}} \left(\frac{\Delta t^{n+\frac{1}{2}}}{2} \right)^2 \dots \quad (5.6)$$

Onde

$$\Delta t^{n+\frac{1}{2}} = \frac{\Delta t^n + \Delta t^{n+1}}{2} \quad (5.7)$$

No método das diferenças centrais é assumido que:

$$\ddot{U}_n = \frac{1}{\Delta t^2} (U_{n-1} - 2U_n + U_{n+1}) \quad (5.8)$$

$$\dot{U}_n = \frac{1}{2\Delta t} (U_{n+1} - U_{n-1}) \quad (5.9)$$

Onde U corresponde ao deslocamento, \dot{U} corresponde à velocidade e \ddot{U} corresponde à aceleração. A formulação contém ainda os estados de tempo t , $t + \Delta t$ e $t - \Delta t$.

Considerando a equação de equilíbrio (5.10) no tempo t :

$$M\ddot{U}_n + C\dot{U}_n + KU_n = R_n \quad (5.10)$$

Substituindo as equações (5.8) e (5.9) na equação (5.10) obtém-se:

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C \right) U_{n+1} = R_n - \left(K - \frac{2}{\Delta t^2} M \right) U_n - \left(\frac{1}{\Delta t^2} M - \frac{1}{2\Delta t} C \right) U_{n-1} \quad (5.11)$$

Da equação (5.11) nota-se que U_{n+1} (deslocamento no tempo $t + \Delta t$) é determinado por U_n (deslocamento no tempo t) e U_{n-1} (deslocamento no tempo $t - \Delta t$). Primeiramente é necessário determinar o deslocamento no tempo $t = -1$ (U_{-1}), usando as equações (5.8) e (5.9) para tal, onde $n = 0$:

$$U_{-1} = U_0 - \Delta t \dot{U}_0 + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{U}_0 \quad (5.12)$$

Depois de determinar U_{-1} é possível determinar \ddot{U}_{n+1} (aceleração no tempo $t + \Delta t$), \dot{U}_{n+1} (velocidade no tempo $t + \Delta t$) e U_{n+1} (deslocamento no tempo $t + \Delta t$) [40].

Por ser um método explícito, é preciso ter em conta o valor crítico do “*time step*” que é definido pelo limite de Courant. O limite de Courant representa o tempo necessário para que uma onda elástica atravesse um elemento na malha. Este limite é função tanto da geometria do elemento como da velocidade do som no material [42].

A solução implícita requer o cálculo de matrizes inversas para determinar U_{n+1} , o que não acontece na solução explícita. Assim, a integração explícita terá um custo computacional menor e chega à solução do problema dinâmico com maior rapidez. No entanto, há que ter em atenção ao *time step* usado, sendo que a integração implícita é incondicionalmente estável, a estabilidade da integração explícita só é garantida se o *time step* for menor que o valor crítico [40].

O valor crítico não amortecido do *time step* é $\frac{2}{\omega_n}$, sendo ω_n a maior frequência natural, que não é constante durante o cálculo da resposta. Este valor é, usualmente, muito pequeno [40].

5.3 Métodos de advecção

Maioritariamente são utilizados dois algoritmos de advecção no transporte do fluxo de material entre elementos no LS-DYNA. São eles o método de advecção de Donor Cell (método de 1ª ordem) e o método de advecção de Van Leer (método de 2ª ordem) [48], [49]. Ambos os métodos são estáveis, monotónicos e conservativos [42], [49], [50].

Um algoritmo de advecção é monotónico quando não introduz valores máximos ou mínimos na solução das variáveis, durante esta fase [42], [50], [51]. Um algoritmo de advecção é conservativo se, durante a fase de advecção, propriedades como a massa e o momento forem conservados [50], [52].

5.3.1 Método de advecção de Donor Cell

O método de advecção de Donor Cell é um algoritmo de primeira ordem e caracteriza-se por ser estável, monotónico e de rápida execução embora seja também muito dissipativo e dispersivo [50], [52]. Devido à forte dissipação o uso deste método está limitado aos fluidos. Neste algoritmo o valor da variável na superfície de um elemento é definido pelo valor médio no elemento no qual o material se distribui. A distribuição da variável ϕ no centro do elemento, entre os nós j e $j+1$, durante um período de tempo Δt é dada pela expressão (5.13) [50], [52].

$$\phi_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \phi_{j+\frac{1}{2}}^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} (f_j^\phi - f_{j-1}^\phi) \quad (5.13)$$

Onde

$$f_j^\phi = \frac{a_j}{2} (\phi_{j-\frac{1}{2}}^n + \phi_{j+\frac{1}{2}}^n) + \frac{|a_j|}{2} (\phi_{j-\frac{1}{2}}^n - \phi_{j+\frac{1}{2}}^n) \quad (5.14)$$

e a variável a_j é a velocidade no nó j . Os valores $\phi_{j-\frac{1}{2}}^n$ e $\phi_{j+\frac{1}{2}}^n$ representam o valor inicial da variável ϕ à esquerda e à direita do nó j , respectivamente.

5.3.1 Método de advecção de Van Leer

O método de advecção de Van Leer é também um método monotónico, conservativo mas de segunda ordem. É um algoritmo muito mais demorado em termos computacionais que o método de advecção de Donor Cell. Os princípios deste algoritmo assentam na introdução de uma variação linear da variável ϕ num elemento, onde a função linear, ϕ_L , assume a sua importância. O declive, S , desta função linear num elemento em uma dimensão pode ser calculada usando o método das diferenças centrais como é apresentado na equação (5.15) [50], [52].

$$S_i = \frac{\phi_{i+1} - \phi_{i-1}}{L} \quad (5.15)$$

Nesta equação i representa o elemento. Usando apenas o método das diferenças centrais para calcular o declive pode introduzir um novo máximo e mínimo como mostra a figura 5.4 e por isso é necessário uma outra formulação para assegurar que o método continue monotónico. Nesta nova formulação o declive máximo permitido à esquerda e à direita de um elemento é calculado. A figura 5.5 mostra como estes declives são definidos juntamente com o declive encontrado pelo método das diferenças centrais [50], [52]. O declive máximo à esquerda, s^L , e à direita, s^R , são assim representadas:

$$s^L = \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{L^-} \quad (5.16)$$

$$s^R = \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{L^+} \quad (5.17)$$

Quando estão definidos os declives máximos num elemento, a função linear com comportamento monotónico é definida como

$$\frac{\partial \phi_L}{\partial x} = \frac{1}{2} (sgn(s^L) + sgn(s^R)) \min(|s^L|, |s^R|, |S|) \quad (5.18)$$

onde a função sgn é definida como

$$sgn(x) = \begin{cases} -1 & \text{se } x < 0 \\ 0 & \text{se } x = 0 \\ 1 & \text{se } x > 0 \end{cases} \quad (5.19)$$

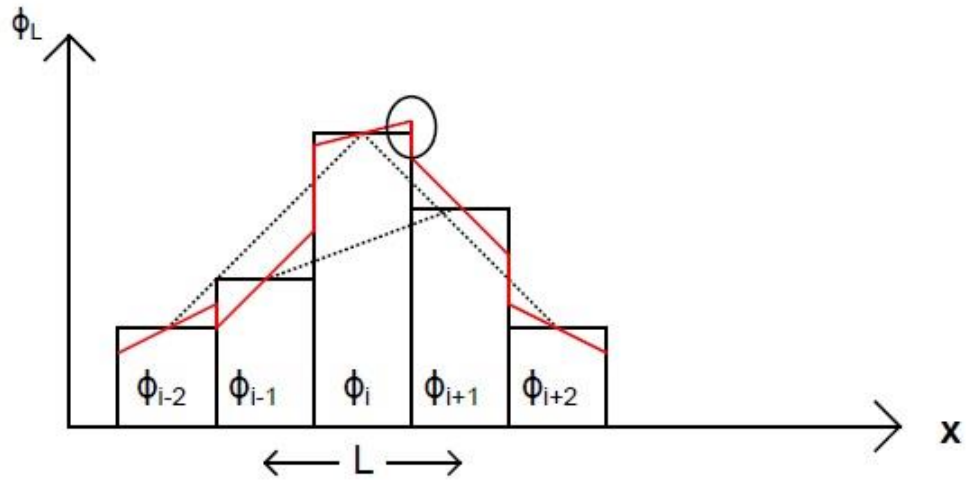


Figura 5.4 - A variação linear da variável ϕ_L é descrita pela linha a vermelho e a linha a tracejado define o declive de ϕ_L sobre um elemento usando o método das diferenças centrais. O círculo indica a introdução de um novo máximo nessa posição [50].

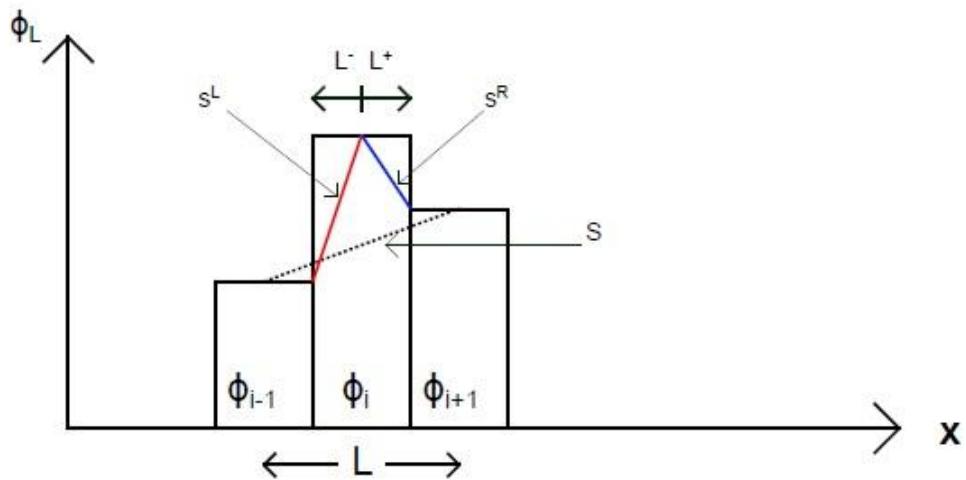


Figura 5.5 - Exemplo de como o declive máximo à esquerda (linha a vermelho), s^L , à direita (linha a azul), s^R e o declive das diferenças centrais, S , são definidos no elemento ϕ_i [50].

Capítulo 6 Simulação numérica

Neste capítulo fala-se dos *softwares* usados nesta dissertação. Para a modelação e simulação das detonações serão descritos alguns dos comandos numéricos essenciais implementados no LS-DYNA. Modelos constitutivos e equações de estado para diversos materiais serão, também, descritos.

A fase do pré-processamento onde se procede à modelação é realizada no LS-PrePost, uma ferramenta específica do LS-DYNA. Finalizada a modelação no LS-PrePost este gera um ficheiro de entrada *.k* que é lido pelo *solver* LS-DYNA onde são realizados os cálculos numéricos. As malhas de elementos finitos usadas nesta tese foram geradas no pré-processador LS-PrePost.

Para proceder à realização das simulações numéricas foi utilizado um computador com processador Intel(R) Core(TM) 3820 3.60 GHz, com 32 Gb de memória RAM e 8 CPUs (Unidade Central de Processamento).

6.1 Modelos Constitutivos e equações de estado

As equações de estado, bem como as características dos vários materiais, são imprescindíveis para se proceder à modelação da detonação de um explosivo no LS-DYNA. Assim, serão definidas as equações de estado para o explosivo, meio circundante (ar) e para o alumínio.

6.1.1 Equações de estado (EOS)

As equações de estado são utilizadas no LS-DYNA para relacionar a energia interna, a pressão, a densidade e o volume de certos materiais [53]. Estas podem ser usadas para inicializar as características internas dos elementos [53], tais como o ar e o explosivo. Os modelos usados para as estruturas em aço e alumínio não requerem equações de estado.

Para o ar será usada uma equação polinomial linear onde a pressão é definida pela equação (6.1).

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5 + C_6\mu^2)E \quad (6.1)$$

onde μ é

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (6.2)$$

A equação de estado do ar baseia-se na lei dos gases perfeitos [46]. A equação do gás perfeito (equação (6.3)) deriva da equação polinomial linear acima descrita (equação (6.1)) [46].

Para um gás ideal, a equação (6.1) pode ser reduzida atribuindo os coeficientes apropriados, neste caso $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0, C_4 = C_5 = \gamma - 1$ dando origem à equação (6.3).

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (6.3)$$

Onde ρ_0 e ρ são as densidades inicial e actual do ar, respectivamente, E é a energia específica interna e γ é a relação politrópica de calores específicos cujo valor é 1,4.

Vários tipos de equações de estado podem descrever o estado dos produtos de detonação, neste caso será usada a Jones-Wilkins-Lee (JWL) devido à sua simplicidade e por esta definir bem a maior parte dos altos explosivos [46]. Nesta equação de estado a pressão é definida pela expressão (6.4).

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (6.4)$$

Onde p é a pressão dos produtos da reacção, $V = \frac{\rho_0}{\rho}$ é o volume relativo ou relação entre a densidade inicial do material sólido do explosivo e a densidade actual, E é a energia interna por unidade de volume. A , B , R_1 , R_2 e ω são constantes respeitantes ao explosivo [46].

6.1.2 Modelos constitutivos dos materiais

Para modelar o ar no LS-DYNA utiliza-se o modelo de material *MAT_NULL juntamente com a equação de estado de gás perfeito. Este modelo apenas necessita do valor da densidade do ar [48].

Para o explosivo usa-se o modelo *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN de maneira a conseguir modelar a detonação. Neste modelo é usada uma função, *burn fraction*, que controla a dissipação de energia química para simular detonações [48]. Na fase de iniciação, o tempo de detonação, t_I , é calculado para cada elemento dividindo a distância, desde o ponto de detonação até ao centro do elemento, pela velocidade de detonação D . Se forem definidos vários pontos de detonação, o ponto mais próximo determina t_I . A função F (burn fraction) é tomada pelo máximo de dois valores [48].

$$F = \max(F_1, F_2) \quad (6.5)$$

Onde

$$F_1 = \begin{cases} \frac{2(t-t_l)D}{3\left(\frac{v_e}{A_{e_{max}}}\right)} & \text{se } t > t_l \\ 0 & \text{se } t \leq t_l \end{cases} \quad (6.6)$$

$$F_2 = \frac{1-V}{1-V_{CJ}} \quad (6.7)$$

V_{CJ} é o volume relativo Chapman-Jouguet, V é o volume relativo, t é o tempo actual, v_e é o volume de um elemento e $A_{e_{max}}$ é a área da maior secção de um elemento.

Se o valor de F exceder 1, este é inicializado a 1. O cálculo de F , por norma, requer várias iterações para chegar à unidade distribuindo, assim, a onda de detonação por vários elementos. Ao alcançar a unidade, este é mantido constante [48].

Para o alumínio utiliza-se o modelo *MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK onde a distribuição da tensão é descrita pela expressão (6.8).

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^p)(1 + c \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (6.8)$$

Onde A , B , C e n são constantes de entrada, definidas pelo utilizador. $\bar{\epsilon}^p$ é a deformação plástica efectiva, $\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}$ é a taxa de deformação plástica efectiva para $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$.

A tensão máxima é limitada por $sigmax$ e $sigmat$ (parâmetros deste modelo presentes no LS-DYNA) pela equação (6.9).

$$\sigma_y = \min\{\min[A + B\bar{\epsilon}^p, sigmax](1 + c \ln(\dot{\epsilon}^*)), sigmat\} \quad (6.9)$$

A fractura ocorre quando a deformação plástica efectiva excede *psfail*.

Se a opção de viscoplasticidade estiver activa, $VP = 1.0$, os parâmetros SIGMAX e SIGSAT são ignorados pois tornam a convergência da iteração da deformação viscoplástica difícil de atingir. A opção de viscoplasticidade substitui a deformação plástica nas equações subsequentes pela deformação viscoplástica e a taxa de deformação pela taxa de deformação viscoplástica [48].

Para o aço usou-se o modelo *MAT_ELASTIC, presente no LS-DYNA, onde é calculada a taxa co-rotacional do tensor das tensões de Cauchy através da equação (6.10) [48].

$$S_{ij}^{\nabla^{n+1/2}} = 2G\dot{\varepsilon}_{ij}^{n+1/2} \quad (6.10)$$

E a pressão é calculada através da equação (6.11).

$$p^{n+1} = -K \ln(V^{n+1}) \quad (6.11)$$

Onde G e K são e, respectivamente, e V é o volume relativo, isto é, o quociente entre o volume actual e o volume inicial.

6.2 Mapping 2D para 3D

Esta ferramenta de mapear resultados de 2D para 3D no domínio Euleriano, apesar de se encontrar disponível há vários anos no hidrocódigo Autodyn, só mais recentemente foi implementado no LS-DYNA. O objectivo desta técnica passa por diminuir o tempo de processamento e aumentar a precisão dos resultados pois a resolução em 2D será maior do que o correspondente no modelo 3D devido às limitações computacionais.

Quando a simulação chega ao fim no modelo 2D é criado um ficheiro binário onde são armazenados os dados das variáveis de estado do domínio Euleriano do modelo 2D. Este ficheiro é depois usado para preencher o domínio Euleriano do modelo 3D como condição inicial onde a simulação prossegue [54]. É possível, também, mapear resultados de modelos 2D para outros modelos 2D. Aquelet e Souli em [55], demonstram a técnica do *mapping* do LS-DYNA com os mesmos tamanhos dos elementos em 2D e 3D.

Com esta técnica poupa-se, também, bastante tempo de processamento em simulações com condições iniciais idênticas pois o mesmo ficheiro pode ser usado para vários casos.

Devido às suas especificidades, a técnica do *mapping* é o método perfeito para estudar casos onde a qualidade da iniciação do processo é um parâmetro crucial. Ter uma malha bastante refinada é de extrema importância pois permite uma boa energia inicial que leva a uma aproximação bastante boa aos resultados experimentais. Este método combina uma boa precisão dos resultados com um tempo de processamento aceitável e por isso ajusta-se bem à simulação da detonação de explosivos, onde a detonação e o início da propagação são essenciais para completar o cálculo [51].

A figura 6.1 descreve o campo de pressão antes de se proceder à técnica do *mapping*, tratando-se de uma simulação num modelo 2D. Na figura 6.2 apresenta-se o resultado do *mapping* desse campo de pressão do modelo 2D num modelo 3D.

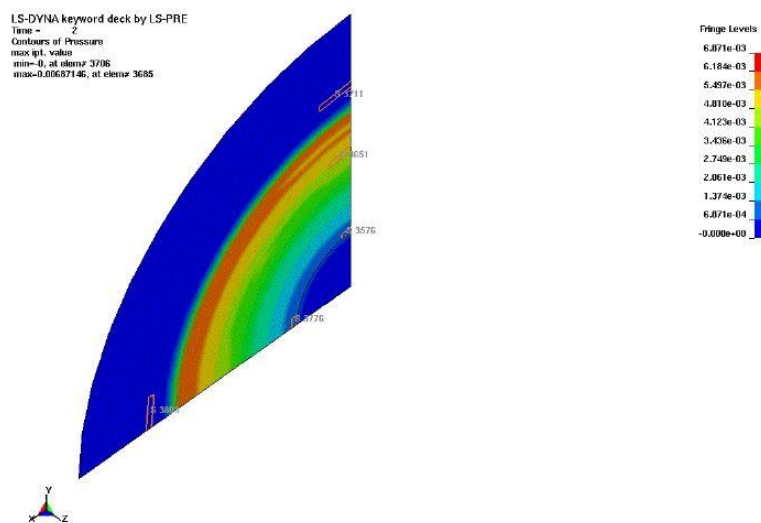


Figura 6.1 - Campo de pressão no modelo 2D (antes do *mapping*) [55].

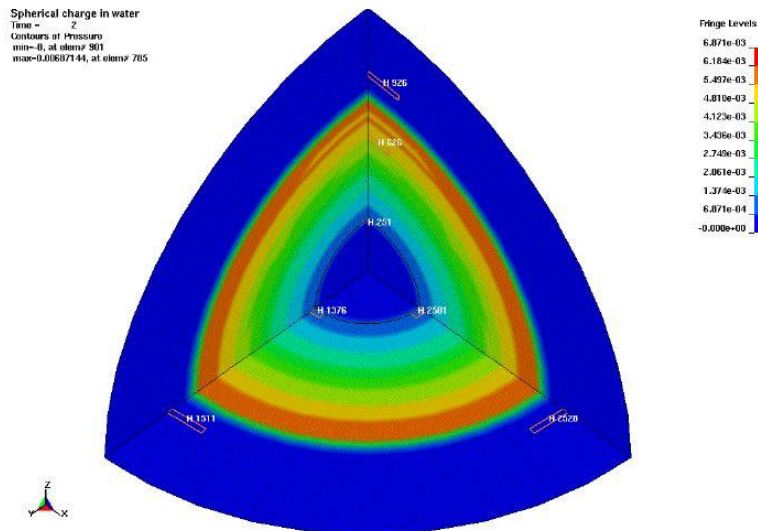


Figura 6.2 - Campo de pressão no modelo 3D (depois do mapping) [55].

6.3 Interação fluido-sólido (FSI)

As interações fluido-estrutura desempenham um papel importante em diferentes tipos de situações do mundo real e nas aplicações industriais envolvendo grandes deformações estruturais e não-linearidades geométricas e de material [56]. Na engenharia naval, soluções empíricas e certos cálculos têm sido usados para estimar forças devido aos efeitos hidrodinâmicos. As forças hidrodinâmicas são aplicadas como esforços externos ao modelo dinâmico da estrutura para prever falhas, fadiga e fracturas nesta [57]. Com o algoritmo Eulereano-Lagrangeano (fluido-estrutura), as partes eulereanas podem interagir com as partes lagrangeanas no mesmo modelo [56].

No algoritmo de acoplamento fluido-estrutura, duas malhas sobrepostas são consideradas, a malha eulereana fixa ou a malha ALE para o fluido e a malha lagrangeana deformável para a estrutura. O problema da interação fluido-estrutura pode ser solucionado usando dois algoritmos de interface diferentes. O método de contacto é um deles, onde a interface de contacto é usada para separar a malha do

fluido da malha da estrutura. Este método é baseado num algoritmo de interpolação de primeira ordem, é não conservativo e dissipativo numericamente. A alternativa a este método para evitar distorções na malha do fluido é o algoritmo de acoplamento Euler-Lagrange onde existe uma formulação eulereana para o fluido e uma formulação lagrangeana para a estrutura. Usando este algoritmo permite-nos trabalhar com problemas de impacto envolvendo fluídos devido ao acoplamento entre as duas malhas [57]. A figura 6.3 descreve a interação das duas malhas, onde a malha eulereana é fixa no espaço deixando que o fluido flua através dela (caso particular do método ALE) e a malha lagrangeana é envolvida na malha eulereana.

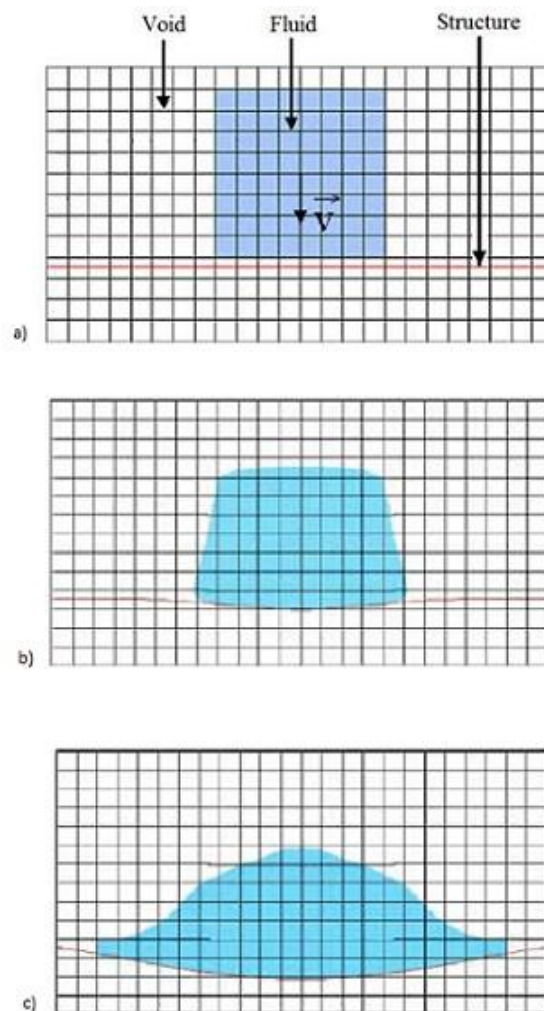


Figura 6.3 - a) Acoplamento entre duas malhas lagrangeana e eulereana, tempo = 0 ms, b) tempo = 0.15 ms, c) tempo = 0.5 ms [57].

Na interface das duas malhas, lagrangeana e eulereana, um nó da estrutura é considerado nó escravo e um nó no elemento eulereano (fluido) é considerado nó mestre. Este método de acoplamento comporta-se como um sistema de molas e as forças a ela associadas são calculadas proporcionalmente à profundidade de penetração e à rigidez das molas [57]. Como é demonstrado na figura 6.4 uma extremidade da mola é ligada à estrutura ou nó escravo e a outra extremidade é ligada ao nó mestre pertencente ao elemento eulereano (fluido) que é interceptado pela estrutura.

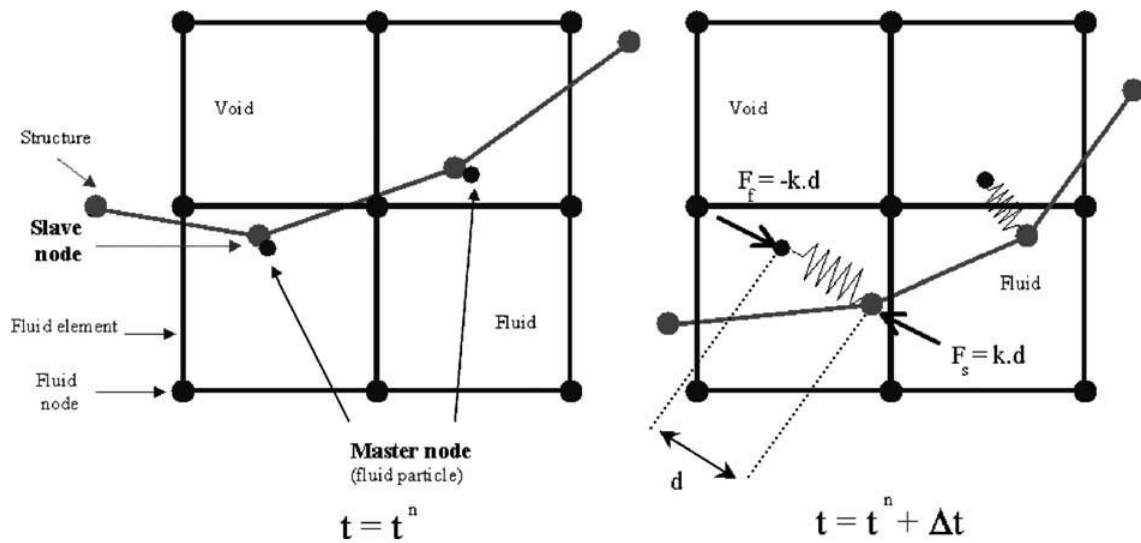


Figura 6.4 - Demonstração do método de acoplamento [57].

Semelhante ao método de contacto, a força de acoplamento é descrita pela equação (6.12).

$$F = k \times d \tag{6.12}$$

Onde k representa a rigidez da mola e d a profundidade de penetração. A força F é aplicada tanto no nó mestre como no nó escravo em direcções opostas para satisfazer o

equilíbrio de forças na interface de acoplamento. A força de acoplamento nos nós da estrutura é dada pela equação (6.13).

$$F_s = -F \quad (6.13)$$

Para o fluido, a força de acoplamento é distribuída pelos nós do elemento do fluido e descrita pela equação (6.14).

$$F_f^i = N_i \times F \quad (6.14)$$

Onde N_i é a função forma no nó i ($i = 1, \dots, 8$). Desde que $\sum_{i=1}^8 F_f^i = N_i \times F$, o princípio da acção-reacção é satisfeito na interface de acoplamento. A força de acoplamento cumpre o equilíbrio de forças na interface fluido-estrutura e reduz a penetração do fluido na estrutura [57].

Para a rigidez da mola (k) (equação (6.15)), esta é dada em termos de módulo volumétrico (K) do elemento do fluido contendo o nó escravo da estrutura, o volume (V) do elemento do fluido que contém o nó mestre do fluido e a média das áreas (A) dos elementos da estrutura conectados ao nó da estrutura.

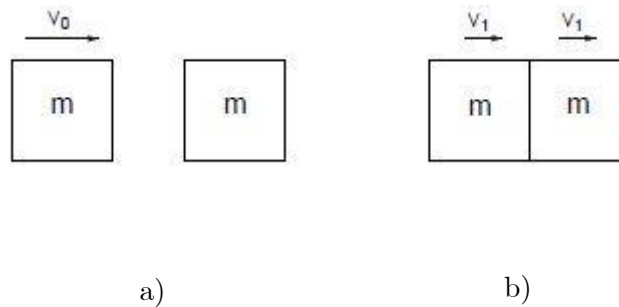
$$k = p_f \frac{KA^2}{V} \quad (6.15)$$

Para evitar instabilidades numéricas, um factor de escala (p_f), $0 \leq p_f \leq 1$, é introduzido no método de contacto.

6.3.1 Ligação fluido-estrutura

Em muitas aplicações é recomendável trabalhar com partes com diferentes formulações, como por exemplo na interacção fluido-estrutura onde o fluido assume a formulação ALE ou eulereana e a estrutura assume a formulação lagrangeana. Quando elementos eulereanos ou ALE interagem com elementos lagrangeanos é necessário definir uma ligação na interacção fluido-estrutura. Nesta ligação define-se dois ou três pontos de acoplamento por comprimento do elemento ALE e onde é preciso ter atenção na sua escolha pois demasiados pontos levam a instabilidades mas, por outro lado, poucos pontos podem originar fugas. No LS-DYNA, esta ligação pode ser definida pela função **CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID* onde a parte lagrangeana é determinada como a parte escrava e a parte ALE é determinada como a parte mestre [50].

Nesta abordagem de acoplamento existe conservação de momento mas não de energia. Considere-se uma partícula ALE com massa m e velocidade v_0 que entra em contacto com uma estrutura estática com massa m como ilustrado na figura 6.5.



*Figura 6.5 - a) Partícula ALE (à esquerda) em direcção a uma estrutura estática (à direita)
 b) Após o impacto a partícula ALE e a estrutura assumem a mesma velocidade [50].*

$$I_0 = mv_0 \quad (6.16)$$

$$W_0 = \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (6.17)$$

Quando a partícula ALE atinge a estrutura lagrangeana esta fica presa à estrutura, o momento é conservado no impacto que determina uma velocidade $v_1 = \frac{1}{2}v_0$ para o

sistema depois do impacto e que pode ser concluído pela equação 6.18. Como resultado desta nova velocidade, a energia cinética depois do impacto é mais pequena que anteriormente como pode ser visto na equação 6.19 [50].

$$I_1 = (m + m)v_1 = 2mv_1 = I_0 \quad (6.18)$$

$$W_1 = \frac{1}{2}(2m)(v_1)^2 = \frac{1}{2}(2m)\left(\frac{1}{2}v_0\right)^2 = \frac{1}{4}mv_0^2 < W_0 \quad (6.19)$$

6.4 Definição das partes no modelo numérico

Na modelação da detonação de um explosivo é necessário modelar duas partes (*PART) correspondentes ao explosivo e ao ar envolvente. O LS-DYNA permite fazer isso atribuindo a cada parte um tipo de material, um tipo de elemento e uma equação de estado.

A obtenção de uma modelação correcta destas duas partes requer tempo e fazer a conexão das duas malhas tem a sua dificuldade. No entanto, o LS-DYNA possui uma função capaz de contornar essa dificuldade que permite numa mesma malha criar duas *PART diferentes definindo o volume que cada uma ocupa na malha.

Assim, a função INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY do LS-DYNA permite a iniciação de diferentes materiais num único elemento de um modelo MMALE (Modelo Multi-Material Arbitrário Lagrangeano-Eulereano). Isto é conseguido usando o método de fracção de volume onde determinadas formas geométricas ou partes de uma malha são definidas e o seu interior ou exterior são preenchidas com o material específico. Este método produz o mesmo resultado como se fossem modeladas duas malhas distintas e correctamente conectadas [44].

6.5 Condições de fronteira

Através da função *BOUNDARY_SPC_SET é possível definir o estado de constrangimento (1 ou 2) de cada grau de liberdade dos nós numa superfície ou aresta. No caso de uma malha 2D os deslocamentos e as rotações dos eixos x, y e no caso de uma malha 3D os deslocamentos para os planos normais aos eixos x, y, z e rotações dos mesmos podem ser constrangidos [58].

É possível, também, definir o constrangimento usando as formulações de Euler (EBC). Estas definem automaticamente restrições de velocidade na fronteira. Uma vez definidas as restrições, estas são aplicadas a todos os nós das superfícies livres do domínio Euleriano. Para a opção *off* o LS-DYNA permite velocidades sem restrições nas fronteiras. Para a opção *on with stick condition* é imposto que a velocidade de um nó ou conjunto de nós na fronteira seja igual a zero. Na opção *on with slip condition* a componente normal da velocidade do material é igual a zero para todos os nós na fronteira [58].

6.6 Controlo de Hourglass

Uma consequência de usar elementos quadriláteros de tensão constante é o aparecimento de modos de energia nula. Estes modos são também chamados de modos de "hourglass" devido à sua forma. Os modos não são resistidos pelas tensões dentro do elemento e podem crescer sem limite. É necessário a inclusão de um certo mecanismo para os controlar, caso isso não aconteça os elementos serão "virados ao contrário" [42]. Uma forma de evitar *hourglassing* indesejado é usando amortecimento viscoso ou uma pequena rigidez elástica capaz de parar a formação de modos anómalos mas tendo um efeito desprezável nos modos globais estáveis [48]. Na figura 6.5 estão alguns dos modos *hourglass* para elementos 3D, hexaedros.

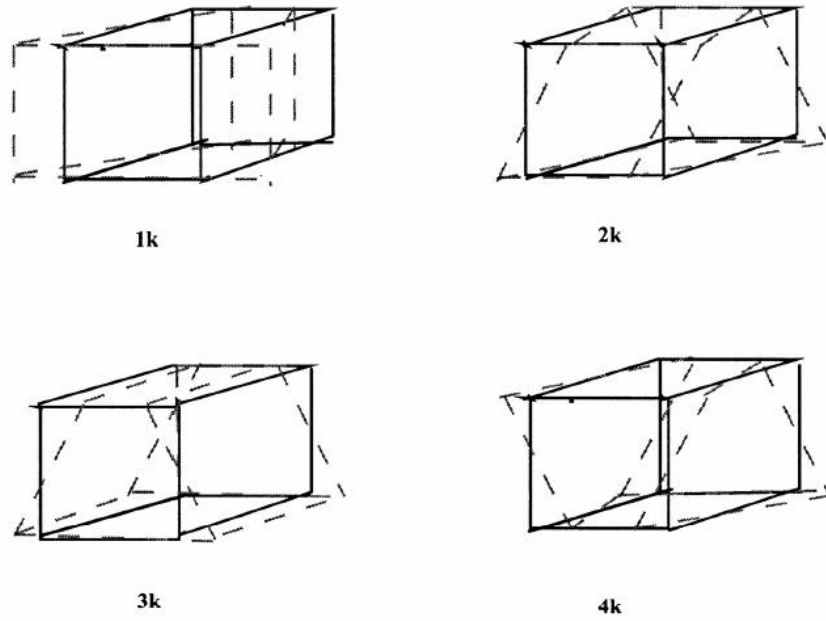


Figura 6.6 - Modos hourglass para elementos 3D, hexaedros [48].

Para controlar a solução numérica é recomendado definir alguns parâmetros de controlo que introduzam alguma viscosidade interna que limite a ocorrência desses modos de energia nula. Definindo os parâmetros $IHQ = 1$ e $QM = 1E-6$ na função *HOURLASS, do LS-DYNA, consegue-se obter o desejado controlo [59].

Capítulo 7 Validação numérica

Neste capítulo procede-se à validação do modelo de material de Johnson-Cook e da metodologia ALE utilizados pelo *software* LS-DYNA na simulação deste tipo de fenómenos explosivos. Será simulada a detonação do explosivo ao ar livre a uma certa distância do alvo (chapa de alumínio), descrita no capítulo 4 e os resultados numéricos daí obtidos serão comparados com os resultados experimentais obtidos no ensaio.

7.1 Validação do modelo de material

****SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK implementado no LS-DYNA usando elementos sólidos e elementos shell***

7.1.1 Descrição das malhas de elementos finitos

As malhas correspondentes à moldura em aço e à chapa em alumínio foram geradas no pré-processador LS-PrePost, tendo, numa primeira etapa, sido construídas as malhas com elementos *shell* e, numa segunda etapa, substituído a malha da chapa com elementos *shell* por uma malha com elementos sólidos hexaedrais não uniformes. Os elementos das malhas da moldura e da chapa têm aproximadamente o mesmo tamanho. Na figura 7.1 estão presentes as malhas modeladas para esta simulação.

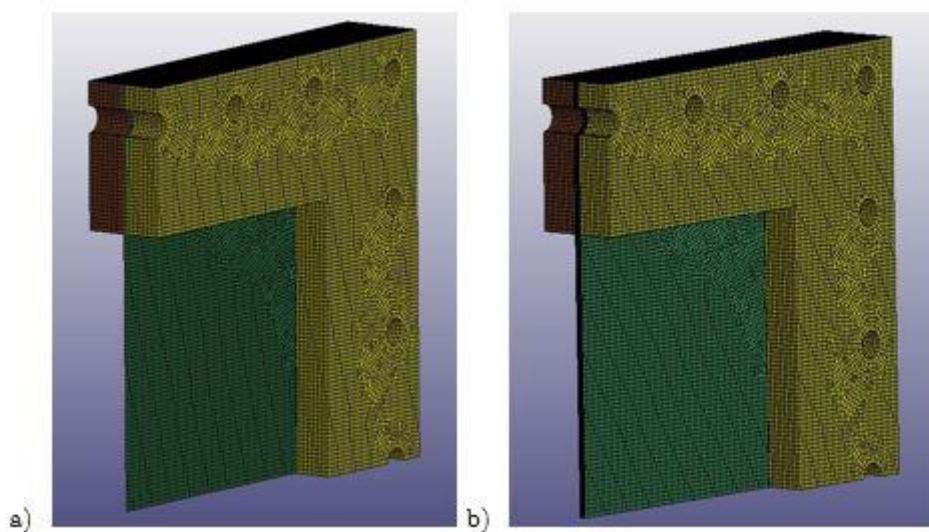


Figura 7.1- a) Malha da estrutura usando elementos shell na chapa. b) Malha da estrutura usando elementos sólidos na chapa (2 elementos a cada 3 mm de espessura).

7.1.2 Definição do problema usando a função *LOAD_BLAST*

Trata-se de um método puramente Lagrangiano onde não existe uma malha ALE para ser preenchida pelo ar e pelos gases resultantes da detonação. É definido um conjunto de segmentos na superfície da chapa onde irá ser aplicada uma onda de pressão, simulando a onda de choque explosiva, usando a função

**LOAD_BLAST_ENHANCED* do LS-DYNA. Nesta função é necessário definir a massa equivalente de TNT (secção 2.7) do explosivo em questão, bem como as coordenadas da origem da detonação. A massa equivalente de TNT usada neste caso foi 1.37. As superfícies sujeitas à onda de pressão são definidas através da função **LOAD_BLAST_SEGMENT_SET*, em que se aplica a cada segmento uma curva de pressão empiricamente calculada em função dos dados de entrada acima indicados. Neste caso serão consideradas duas superfícies, sendo elas a chapa de alumínio e a face exposta da moldura anterior.

Para a moldura em aço foi usado o modelo de material **MAT_ELASTIC* cujos parâmetros se encontram na tabela 7.1. Para a chapa em alumínio foi definido o modelo de material **MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK* cujos parâmetros se apresentam na tabela 7.2.

Tabela 7.1 - Parâmetros do modelo de material *MAT_ELASTIC para o aço.

ρ (g/cm ³)	E (Mbar)	PR
7,85	2,1	0,3

Tabela 7.2 - Parâmetros do modelo de material *MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK para o alumínio.

ρ (g/cm ³)	E (Mbar)	PR	A (Mbar)	B (Mbar)	N	C
2,7	0,7	0,3	1,47E ⁻³	1,492E ⁻³	3,96E ⁻¹	1,04E ⁻¹

O facto da estrutura usada possuir dois eixos de simetria, possibilita a redução do modelo, representando apenas $\frac{1}{4}$ do mesmo. Ao fazer isso é necessário garantir a simetria das condições de fronteira nas zonas onde se efectuaram os cortes no modelo estrutural, assegurando deste modo que o comportamento do modelo reduzido é compatível com o modelo global. O LS-DYNA possui para isso a função *BOUNDARY_SPC_SET que permite ao utilizador definir os constrangimentos dos graus de liberdade dos nós pretendidos. Este comando possui várias opções uma das quais permite, por exemplo, fixar globalmente uma estrutura de corpo rígido, dando-lhe liberdade apenas nos graus pretendidos.

Sendo a estrutura do dispositivo de ensaio composta por dois corpos em contacto mútuo, a moldura e a placa em teste, é necessário definir também, um modelo de contacto que evite a interpenetração das respectivas malhas, o que não sendo fisicamente possível, se deseja evitar para não corromper os resultados. Para garantir que não ocorram interferências entre as malhas da moldura e da chapa foi definido um modelo de contacto entre as duas, através da introdução do comando *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE. Este comando activa um

algoritmo de detecção de interferência entre os nós de cada uma das malhas. Através deste comando são definidas as partes *Master* e *Slave* de tal modo que quando um nó da parte *Master* penetra na superfície definida como *Slave*, uma força de recuperação é aplicada nesse nó, de forma proporcional à profundidade da penetração e da rigidez da parte em causa. Esta força de recuperação irá fazer com que o nó em causa regresse à superfície de contacto entre as duas partes, *Master* e *Slave*. Desta forma preserva-se o momento e a energia cinética no contacto entre as duas partes.

A duração da simulação foi definida como sendo de 1000 μ s, para tal é usado o comando *ENDTIM e definido o valor como 1000.

7.1.3 Apresentação e análise de resultados

Primeiramente, foram comparadas simulações em que se variou o tamanho dos elementos que constituem a chapa de alumínio (1 mm e 2 mm). Esta comparação foi corrida usando elementos *shell* e usando elementos sólidos. Para fazer esta comparação seleccionaram-se 3 chapas de teste (Chapa 1, 4 e 10). A escolha destas chapas deveu-se ao facto das massas explosivas usadas serem idênticas. Nas tabelas 7.3 e 7.4 apresentam-se os resultados provenientes da simulação destes casos usando a função LOAD_BLAST com elementos *shell*, considerando os dois tamanhos de elementos acima indicados. Os gráficos mostram o perfil de deformação das chapas ao longo de um dos seus eixos de simetria, desde o bordo até ao centro da chapa. Os pontos indicados nas tabelas correspondem aos apresentados na figura 4.3 do capítulo 4.

Tabela 7.3 - Deformação máxima nos pontos marcados usando elementos shell com elementos de tamanho 1 mm.

Ponto	Deformação (mm)		
	Chapa n°1	Chapa n° 4	Chapa n°10
1	25,4	24,4	34,3
2	25,7	25,9	33,0
3	23,9	25,4	30,2
4	20,2	21,7	25,7
5	15,0	16,3	19,7
6	9,4	10,2	12,2
7	2,8	3,1	3,8

Tabela 7.4 - Deformação máxima nos pontos marcados usando elementos shell com elementos de tamanho 2 mm.

Ponto	Deformação (mm)		
	Chapa n° 1	Chapa n° 4	Chapa n° 10
1	24,7	25,8	30,4
2	24,0	25,3	29,7
3	22,1	23,6	27,6
4	19,3	20,6	24,2
5	15,3	16,1	18,7
6	9,9	10,3	11,7
7	3,4	3,5	4,1

As figuras 7.2, 7.3 e 7.4 mostram a comparação do perfil deformado das três chapas (chapa n° 1, n° 4 e n° 10) usando elementos *shell* com tamanho de 1 mm e 2 mm.

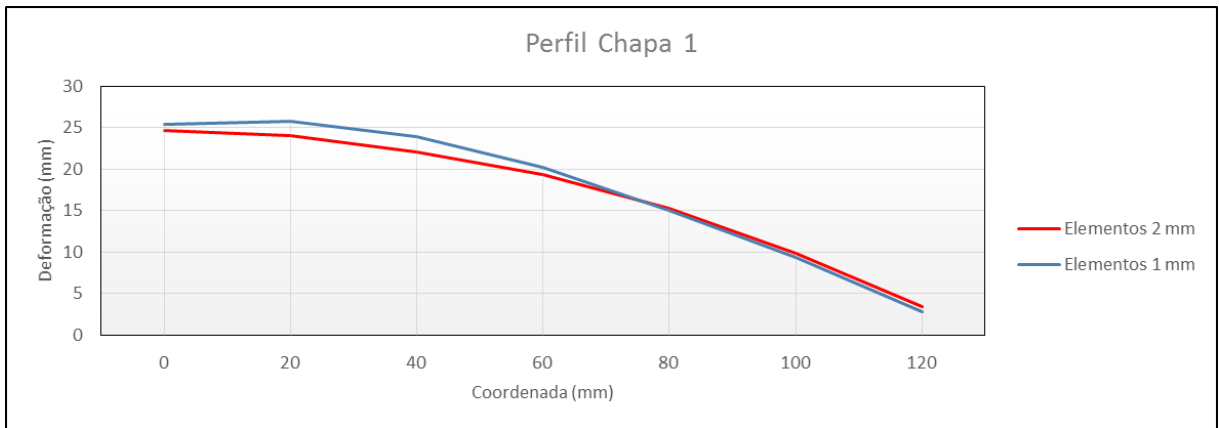


Figura 7.2 - Perfil deformado da chapa nº 1 com elementos shell de 1 mm e 2 mm.

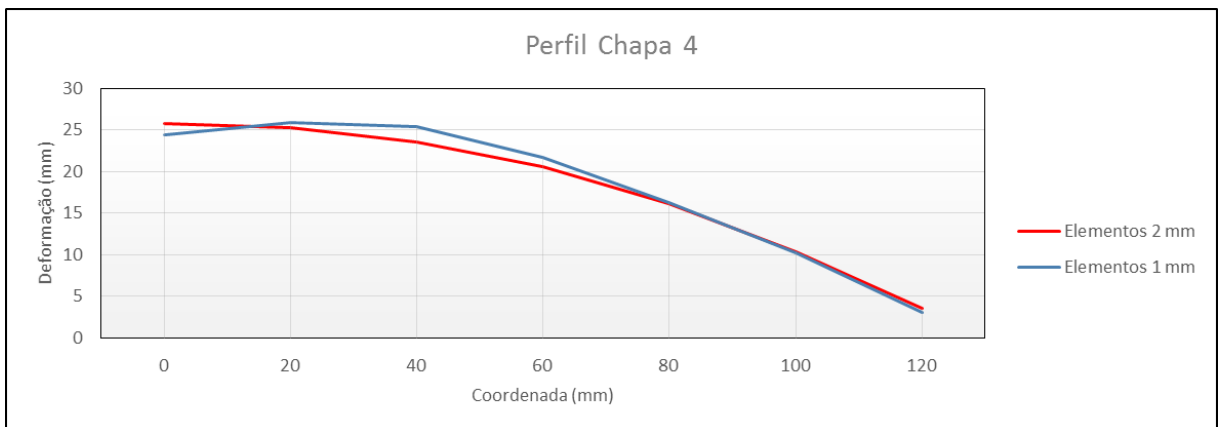


Figura 7.3 - Perfil deformado da chapa nº 4 com elementos shell de 1 mm e 2 mm.

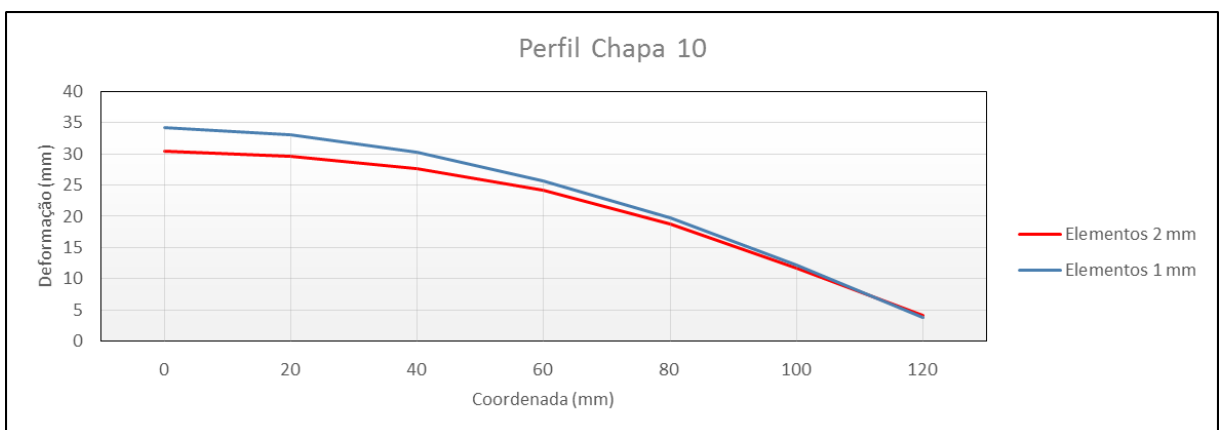


Figura 7.4 - Perfil deformado da chapa nº 10 com elementos shell de 1 mm e 2 mm.

Nas tabelas 7.5 e 7.6 apresentam-se os resultados obtidos com elementos sólidos com os mesmos tamanhos de elementos usados na análise com elementos *shell*.

Tabela 7.5 - Deformação máxima nos pontos marcados usando elementos sólidos com elementos de tamanho 1 mm.

Ponto	Deformação (mm)		
	Chapa n° 1	Chapa n° 4	Chapa n° 10
1	27,0	28,0	32,9
2	27,1	28,0	32,9
3	25,4	26,0	31,5
4	20,9	21,4	27,2
5	15,4	16,0	20,4
6	9,7	10,4	13,0
7	3,6	3,9	5,0

Tabela 7.6 - Deformação máxima nos pontos marcados usando elementos sólidos com elementos de tamanho 2 mm.

Ponto	Deformação (mm)		
	Chapa n° 1	Chapa n° 4	Chapa n° 10
1	26,9	27,6	33,4
2	25,6	26,8	32,8
3	23,3	24,5	30,7
4	19,7	20,9	26,4
5	15,2	15,9	19,9
6	9,6	10,0	12,3
7	3,3	3,5	4,5

As figuras 7.5, 7.6 e 7.7 mostram a comparação do perfil deformado das três chapas (chapa n° 1, n° 4 e n° 10, respectivamente) usando elementos sólidos com tamanho de 1 mm e 2 mm.

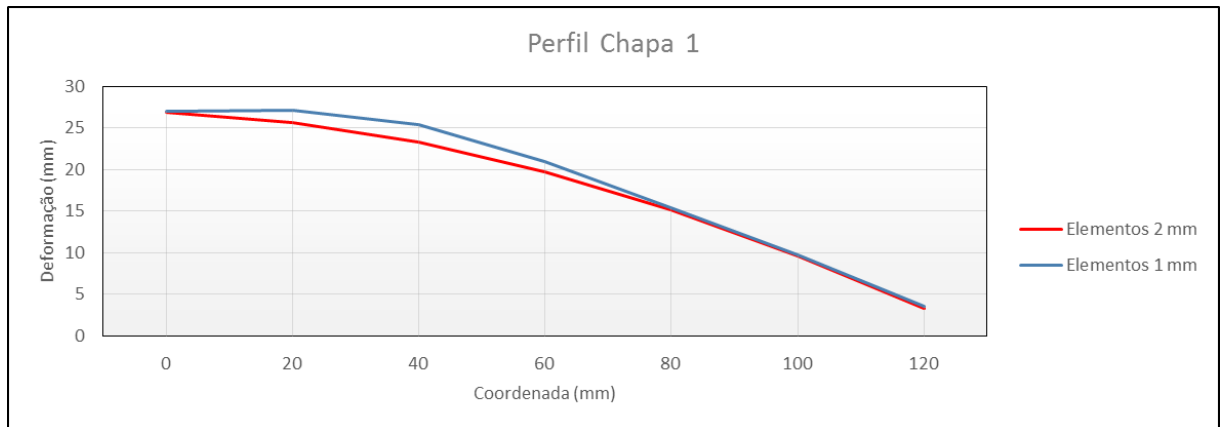


Figura 7.5 - Perfil deformado da chapa n° 1 usando elementos sólidos.

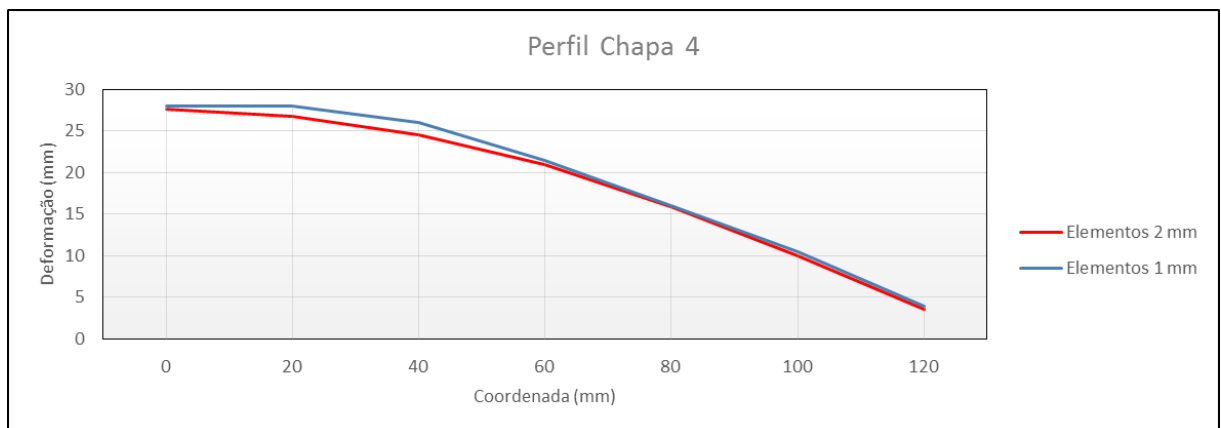


Figura 7.6 - Perfil deformado da chapa n° 4 usando elementos sólidos.

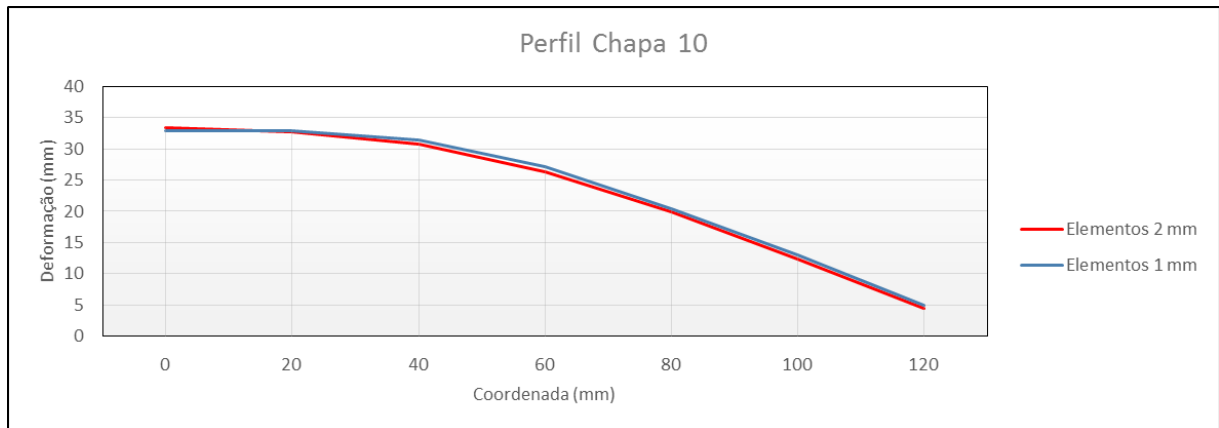


Figura 7.7 - Perfil deformado da chapa nº 10 usando elementos sólidos.

Nos três casos comparativos, quer usando elementos *shell* quer usando elementos sólidos, nota-se uma grande aproximação no perfil de deformação das chapas. Elementos mais pequenos levam a uma maior informação a processar pelo computador e daí o acréscimo no tempo da simulação. As duas malhas (1 mm e 2 mm) apresentam resultados muito idênticos, por vezes quase sobrepostos. Assim sendo, para a continuação das simulações decidiu-se utilizar malhas com elementos de 2 mm pois o seu custo computacional é menor.

Nas tabelas 7.7 e 7.8 apresentam-se os resultados obtidos para o resto das chapas de teste, com elementos *shell* e com elementos sólidos, usando malhas com elementos de 2 mm. De notar a ausência das chapas nº 13 e nº 15 pois, como referido no capítulo 4, sofreram ruptura no ensaio experimental efectuado.

Tabela 7.7 - Deformações obtidas nas restantes chapas usando elementos shell.

Ponto	Deformação (mm)									
	Chapa n°2	Chapa n°3	Chapa n°5	Chapa n°6	Chapa n°7	Chapa n°8	Chapa n°9	Chapa n°11	Chapa n°12	Chapa n°14
1	31,6	41,5	33,4	44,9	27,3	34,2	43,0	51,3	40,3	48,9
2	30,8	40,3	32,5	43,8	26,8	33,2	41,9	50,3	39,5	47,6
3	28,4	37,2	30,1	41,1	25,0	30,8	39,0	47,4	37,1	43,7
4	24,6	32,1	26,1	35,9	21,8	26,8	34,0	42,1	32,8	38,3
5	19,0	24,7	20,2	27,8	16,9	20,7	26,3	32,9	25,6	30,3
6	12,0	15,5	12,7	17,6	10,7	13,0	16,6	21,1	16,2	19,8
7	4,1	5,7	4,4	6,7	3,7	4,5	6,2	8,5	5,8	7,8

Tabela 7.8 - Deformações obtidas nas restantes chapas usando elementos sólidos.

Ponto	Deformação (mm)									
	Chapa n°2	Chapa n°3	Chapa n°5	Chapa n°6	Chapa n°7	Chapa n°8	Chapa n°9	Chapa n°11	Chapa n°12	Chapa n°14
1	37,1	50,6	39,6	54,6	29,6	40,8	52,2	62,0	48,3	57,4
2	35,7	48,9	38,4	53,3	28,7	39,6	50,8	60,8	47,3	55,7
3	32,0	44,1	35,0	48,9	26,3	36,2	46,5	57,0	44,0	51,5
4	26,6	36,9	29,3	41,5	22,3	30,3	39,3	49,0	37,6	44,3
5	19,8	27,9	21,9	31,7	16,9	22,6	29,9	37,6	28,5	34,5
6	12,4	17,9	13,7	20,6	10,7	14,2	19,3	24,8	18,3	22,9
7	4,5	7,4	5,2	8,9	3,8	5,4	8,2	11,4	7,6	10,0

As figuras 7.8-7.20 representam a comparação do perfil de deformação de todas as chapas usando elementos *shell* e elementos sólidos com elementos de 2 mm, cujos valores se apresentam nas tabelas acima referidas, incluindo ainda o perfil de deformação obtido com os resultados experimentais.

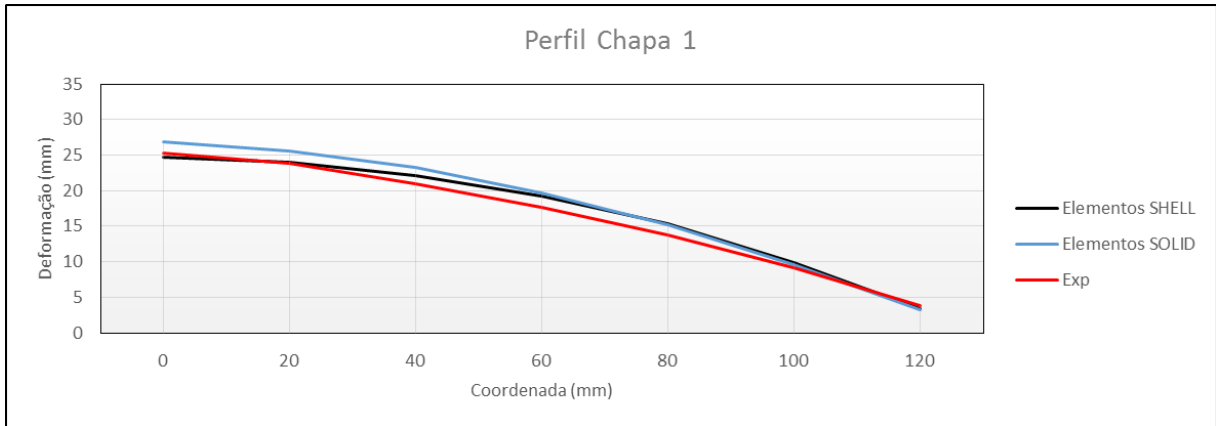


Figura 7.8 - Chapa nº 1. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos shell, elementos solid e resultados experimentais.

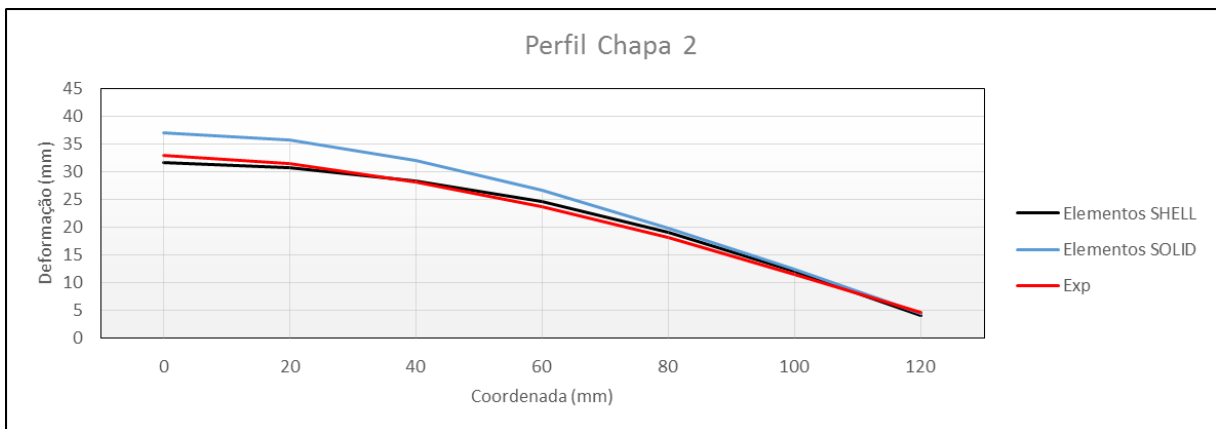


Figura 7.9 - Chapa nº 2. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos shell, elementos solid e resultados experimentais.

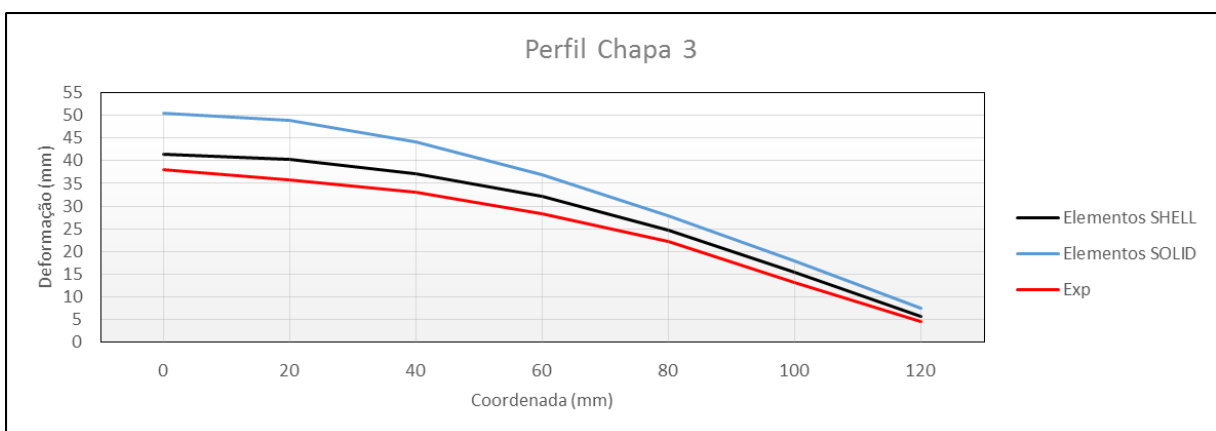


Figura 7.10 - Chapa nº 3. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos shell, elementos solid e resultados experimentais.

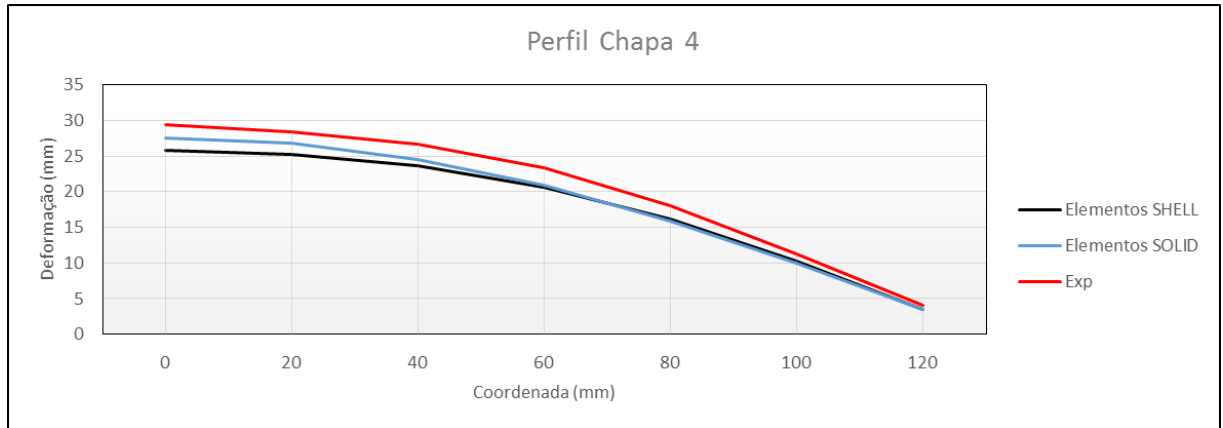


Figura 7.11 - Chapa nº 4. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos shell, elementos solid e resultados experimentais.

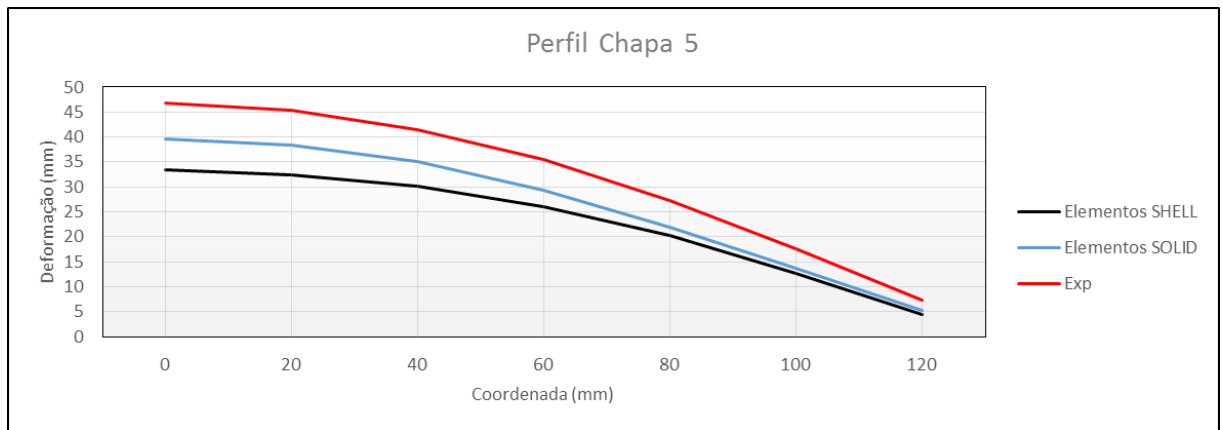


Figura 7.12 - Chapa nº 5. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos shell, elementos solid e resultados experimentais.

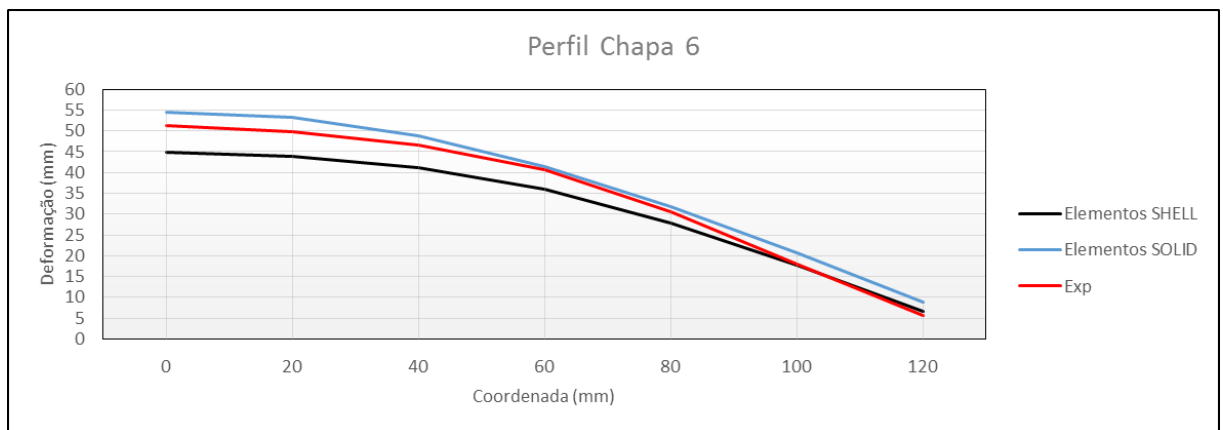


Figura 7.13 - Chapa nº 6. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos shell, elementos solid e resultados experimentais.

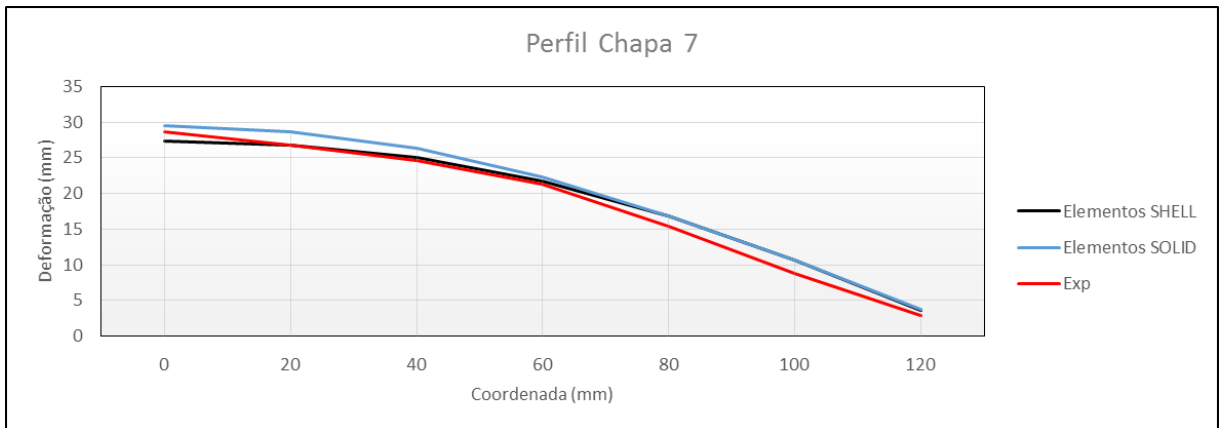


Figura 7.14 - Chapa nº 7. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos shell, elementos solid e resultados experimentais.

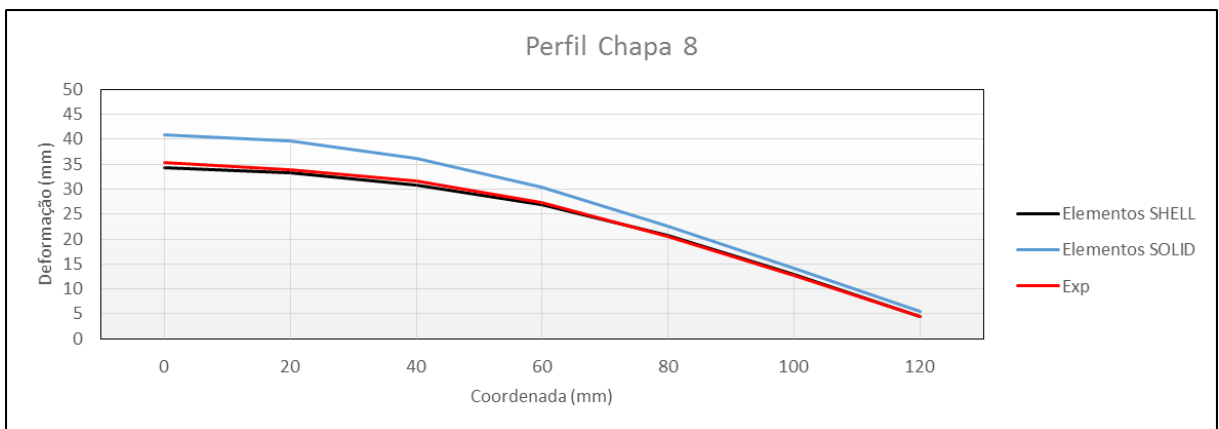


Figura 7.15 - Chapa nº 8. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos shell, elementos solid e resultados experimentais.

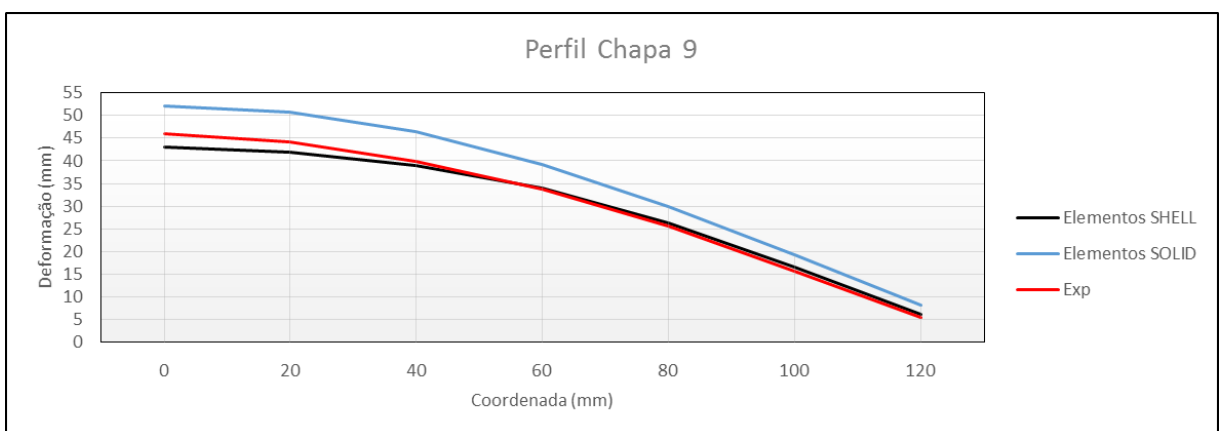


Figura 7.16 - Chapa nº 9. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos shell, elementos solid e resultados experimentais.

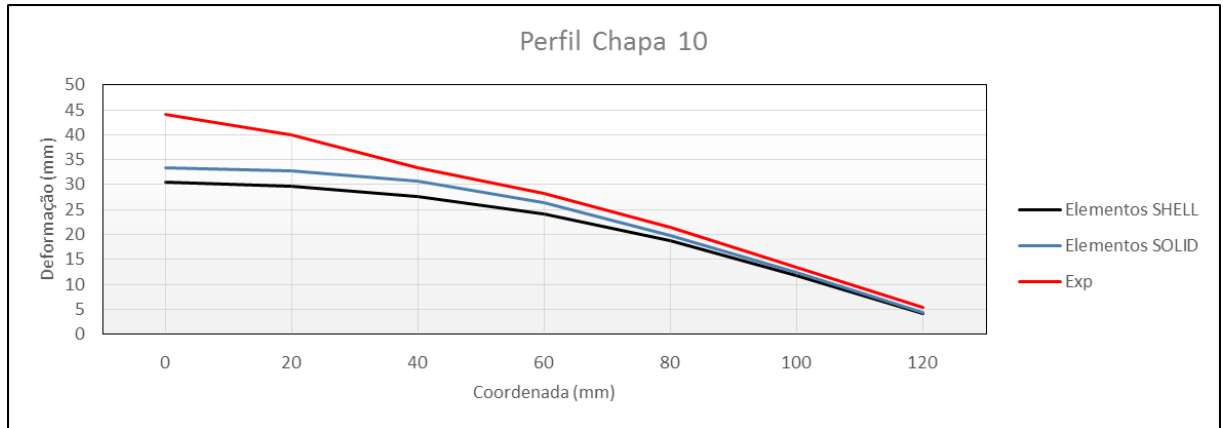


Figura 7.17 - Chapa nº 10. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos shell, elementos solid e resultados experimentais.

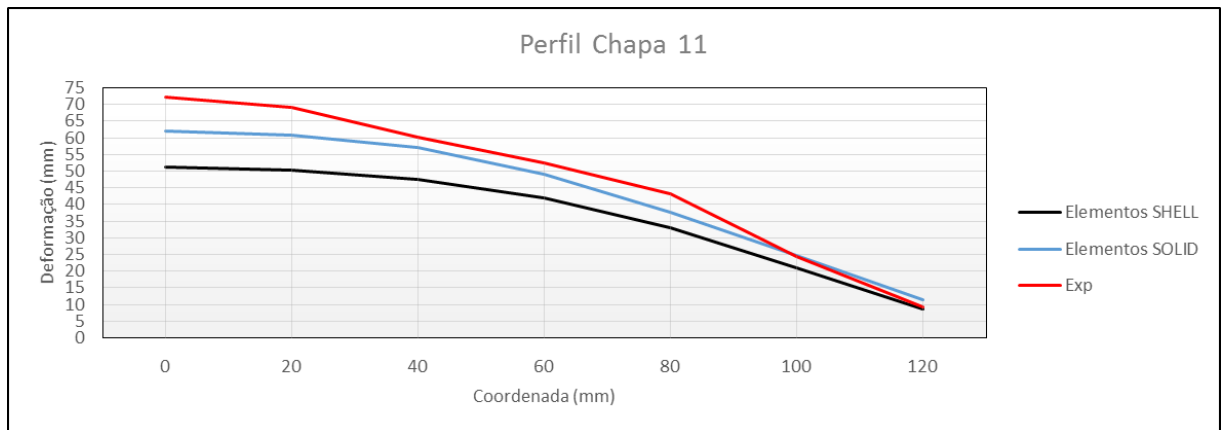


Figura 7.18 - Chapa nº 11. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos shell, elementos solid e resultados experimentais.

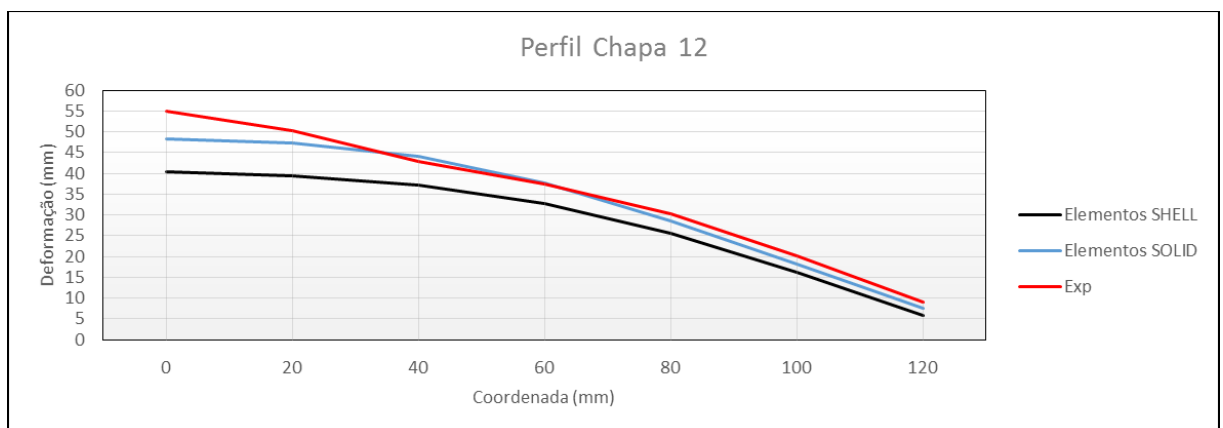


Figura 7.19 - Chapa nº 12. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos shell, elementos solid e resultados experimentais.

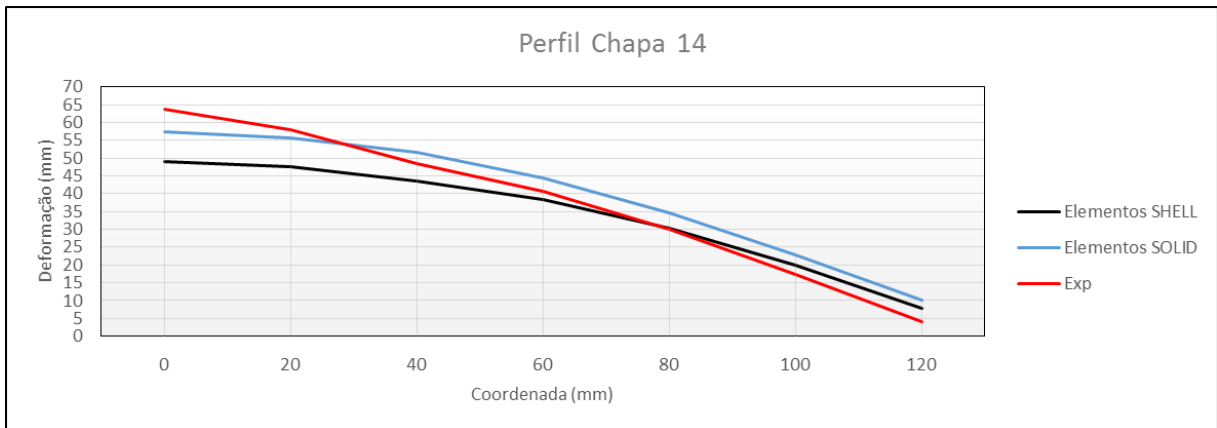


Figura 7.20 - Chapa nº 14. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a função *LOAD_BLAST com elementos shell, elementos solid e resultados experimentais.

Na análise às figuras 7.8-7.20 onde se comparam os perfis de deformação pode-se constatar que, quer usando elementos *shell* quer usando elementos sólidos, existe uma aproximação entre estes apesar da simulação com elementos sólidos determinar deformações maiores, embora com poucas diferenças.

Nota-se, também, que estes dois conjuntos de curvas acompanham bem as curvas obtidas a partir dos resultados experimentais apesar de, em certos casos, esta demonstrar um comportamento inconstante, possivelmente causados por erros cometidos durante o processo experimental (imprecisões na determinação dos pesos das cargas, forma não exactamente esférica das cargas, posição não exactamente centrada das cargas).

É visível ainda que a maior diferença entre as curvas acontece na zona de maior deformação, sendo que essa diferença se vai atenuando em direcção ao encastramento.

Salienta-se ainda um maior afastamento entre as curvas (elementos *shell*, elementos sólidos e Exp) na zona de maior deformação, no centro da chapa, nos casos onde a distância entre a carga explosiva e o alvo é menor.

7.2 Validação da metodologia ALE

7.2.1 Verificação da capacidade do LS-DYNA em simular explosões e os efeitos da sua onda de choque em estruturas usando a metodologia ALE

Embora o explosivo utilizado no ensaio experimental não fosse exactamente C-4, é um composto muito similar (PG2), pelo que se decidiu adoptar os parâmetros do C4 nas entradas de dados do LS-DYNA. Foi novamente considerada a simplificação anterior de modelar apenas $1/4$ do domínio nos modelos 2D e $1/8$ nos modelos 3D de forma a reduzir o tempo computacional.

Para simular este fenómeno explosivo no LS-DYNA usando a metodologia ALE recorreu-se à técnica do *mapping* 2D para 3D descrita no capítulo 6 (secção 6.3) com o objectivo de reduzir o tempo computacional sem prejudicar o rigor da análise. A técnica do *mapping* consiste na divisão do problema em duas fases. Numa primeira fase o modelo é corrido em duas dimensões, aproveitando o facto a carga explosiva ser esférica e existir simetria axial, numa malha extremamente refinada a fim de permitir uma boa inicialização do processo da reacção explosiva e formação da onda de choque. Numa segunda fase um modelo 3D, com uma malha menos refinada, é inicializado com os dados de saída da fase anterior em que os seus valores são mapeados na malha 3D. Desta forma a fase que requer uma malha mais refinada é corrida em 2D, com grande economia de esforço computacional, prosseguindo o problema na fase 3D, numa malha menos refinada e por isso, novamente, sem grandes custos computacionais.

7.2.2 Descrição das malhas de elementos finitos

Para gerar as malhas de elementos finitos, tanto 2D como 3D, usou-se o pré-processador LS-PrePost. Sendo a malha 2D uma malha simples com elementos *Shell* quadriláteros uniformes, a malha 3D é de maior complexidade pois contém a malha onde se propagam os fluidos e a malha que representa a estrutura. A malha onde propagam os fluidos (malha ALE) foi contruída com elementos sólidos hexaedrais

uniformes e a malha representativa da chapa de alumínio foi contruída com elementos *shell*. Nesta simulação não está presente a malha que corresponde à moldura de aço pois optou-se por simular a sua presença através de uma escolha criteriosa de condições de fronteira para a chapa.

7.2.3 Definição do problema no LS-DYNA

Como foi dito anteriormente foi usada a técnica do *mapping* para simular a detonação do C-4. Começando pela simulação 2D a malha correspondente foi dividida em duas partes (*PART) onde se encontram o explosivo e o ar envolvente. Para isso utilizou-se a função *INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY. A cada parte foi, depois, atribuído um material, uma equação de estado e um tipo de elemento.

Para modelar o explosivo foram usadas a equação de estado de Jones-Wilkins-Lee (*EOS_JWL) e o modelo de material *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN apropriado para a modelação de explosivos. Os valores dos parâmetros da equação de estado do explosivo encontram-se na tabela 7.9 e os valores dos parâmetros do modelo de material do explosivo encontram-se na tabela 7.10.

Tabela 7.9 - Parâmetros para a EOS de JWL do explosivo C-4.

A (Mbar)	B (Mbar)	R_1	R_2	ω	E (Mbar)
5.9815502	0.1375	4.5	1.5	0.32	0.087

*Tabela 7.10 - Parâmetros para o modelo de material *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN do explosivo C-4.*

ρ (g/cm ³)	D (cm/ μ s)	P_{CJ} (Mbar)
1.601	0.804	0.281

Na modelação do ar foram usadas a equação de estado linear polinomial (*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL) e o modelo de material *MAT_NULL encontrando-se os valores dos parâmetros da equação de estado na tabela 7.11 e os valores dos parâmetros do modelo de material na tabela 7.12.

Tabela 7.11 - Parâmetros para a EOS linear polinomial do ar.

C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_0 (Mbar)
0	0	0	0	0.4	0.4	0	$2.5E^{-6}$

*Tabela 7.12 - Parâmetros do modelo de material *MAT_NULL para o ar.*

ρ (g/cm ³)	P_{CJ} (Mbar)
$1.293E^{-3}$	0

Tanto o explosivo como o ar foram modelados com elementos multi-material ALE com um ponto de integração usando a função *SECTION_ALE2D com ELFORM = 11. Ao usar este tipo de elementos torna-se necessário definir um modo de controlo do *hourglass mode* gerado neste tipo de elementos. Foi usado o modo recomendado pelo LS-DYNA em que IHQ = 1 (tipo de controlo de *hourglass*) e QM = $1E^{-6}$ (coeficiente de *hourglass*) na função *HOURLASS.

A função *CONTROL_ALE serviu para definir a análise ALE e os métodos de advecção a usar através de DCT = 1 e METH = 2 ou 3 (sendo que o 2 corresponde ao método de advecção de Van Leer e o 3 corresponde ao método de advecção de Donor Cell).

Para controlar o tempo da simulação utilizou-se a função *CONTROL_TERMINATION através de ENDTIM = 15 o que leva a simulação no modelo 2D a correr de 0 a 15 μ s. Este tempo é suficiente para se dar início à detonação e simular os instantes iniciais da expansão dos gases libertados.

A simulação 2D é idêntica para o caso de todas as chapas com excepção da definição do raio do explosivo consoante a carga pretendida no comando *INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY.

Foi feita uma análise de sensibilidade da malha correndo, para o caso da chapa nº 1, quatro simulações com diferentes tamanhos de elementos (0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm e 3 mm) e retirado o pico de pressão ao longo do tempo. A tabela 7.13 apresenta os dados obtidos do pico de pressão ao longo do tempo para as quatro malhas usadas.

Tabela 7.13 - Dados obtidos da pressão ao longo do tempo para quatro malhas com diferentes tamanhos de elementos.

Tempo de simulação (μs)	Pico de pressão (E^{-3} Mbar)			
	Elementos de 0,5 mm	Elementos de 1,0 mm	Elementos de 1,5 mm	Elementos de 3,0 mm
2	5,14	4,64	3,98	2,50
4	3,38	3,22	2,91	2,39
6	2,60	2,44	2,34	1,84
8	2,04	1,92	1,84	1,41
10	1,64	1,56	1,48	1,29
12	1,34	1,29	1,22	1,09
14	1,11	1,07	0,95	0,92

A figura 7.21 ilustra o pico de pressão e o seu decaimento ao longo do tempo para estas quatro malhas.

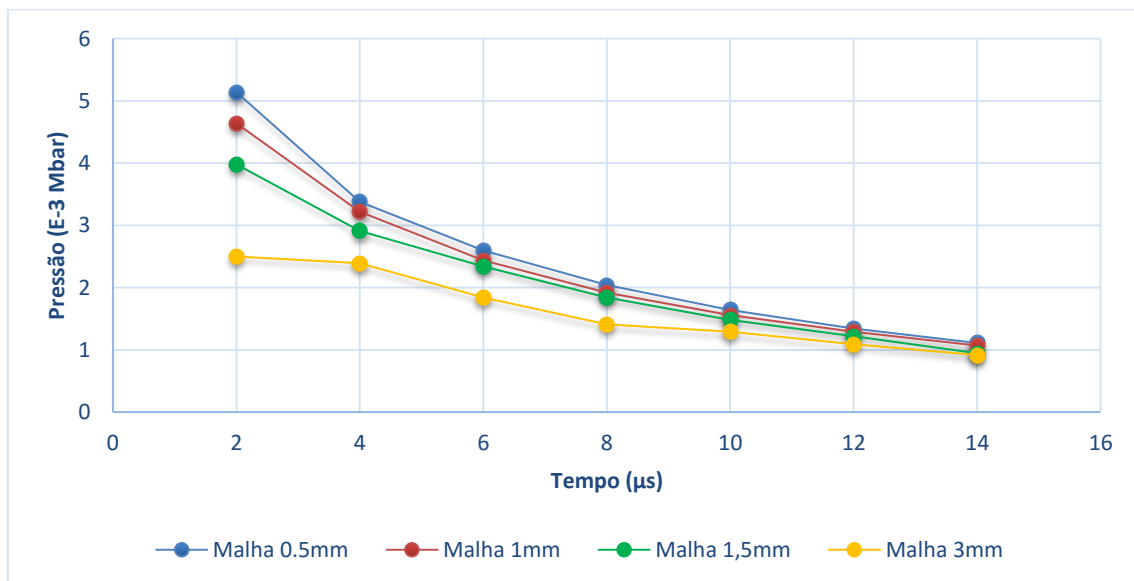


Figura 7.21 - Onda de pressão das quatro malhas simuladas.

O início da detonação é um momento crítico do fenómeno explosivo devido à expansão dos gases libertados e por isso é conveniente o uso de uma malha bem refinada no modelo 2D. Como se observa na figura 7.21, a malha com elementos de 3 mm já traduz

um comportamento da onda de pressão bem diferente das outras. Entre as outras 3 malhas nota-se uma quebra no pico de pressão à medida que se alarga a malha. Foi escolhida a malha com elementos de 0,5 mm para prosseguir com a simulação 3D para todos os casos.

Como dito anteriormente, na simulação 3D estão presentes duas malhas, correspondentes, respectivamente, à chapa de alumínio e ao ar envolvente onde se propagam os fluidos. A figura 7.22 ilustra a conjugação das duas malhas. A malha correspondente à chapa de alumínio mantém-se inalterada para todos os casos, porém na malha onde se propagam os fluidos, foi variada a dimensão segundo a direcção z a fim de acomodar as várias distâncias “*stand-off*” (distâncias entre a chapa e o ponto de detonação) tendo sido mantidas iguais as distâncias nas direcções segundo os eixos x e y.

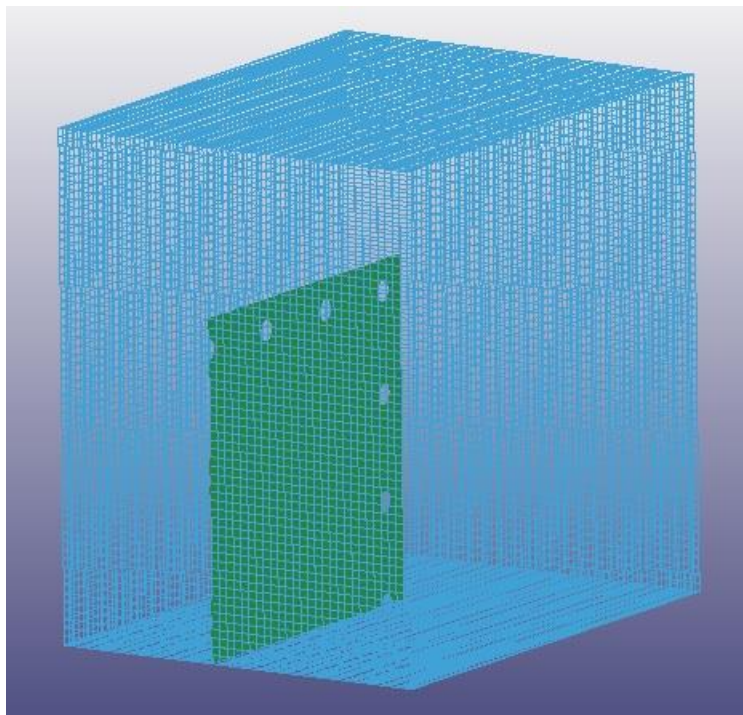


Figura 7.22 - Conjugação das malhas correspondentes à chapa de alumínio (verde) e ao ar envolvente onde se propagam os fluidos (azul).

Para mapear os resultados provenientes da simulação no modelo 2D no modelo 3D é necessário que estejam definidas as partes correspondentes ao explosivo e ao ar no

modelo 3D, também as equações de estado, os modelos de materiais e o tipo de elemento definidos no modelo 2D terão de estar definidos no modelo 3D.

Para a chapa em alumínio foi definido o modelo de material

*MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK cujos parâmetros se apresentam na tabela 7.14.

Tabela 7.14 - Parâmetros do modelo de material *MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK para o alumínio.

ρ (g/cm^3)	E (Mbar)	PR	A (Mbar)	B (Mbar)	N	C
2.7	0.7	0.3	$2.238E^{-3}$	$4.233E^{-3}$	$4.41E^{-1}$	$2E^{-3}$

Os resultados da simulação no modelo 2D podem ser mapeados em qualquer parte do modelo 3D tendo, para isso, que ser definida a origem do sistema de coordenadas (x,y,z) e a direcção do eixo de simetria através da função *INITIAL_ALE_MAPPING. Nesta simulação os mapeamentos tiveram diferentes origens consoante os *stand-off* desejados. A figura 7.23 mostra o *mapping* dos resultados do modelo 2D para o modelo 3D.

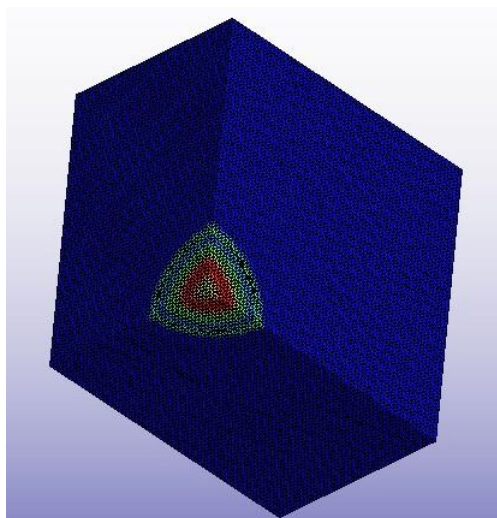


Figura 7.23 - Mapping de resultados no modelo 3D ($t = 15 \mu s$).

De notar que para reduzir o tempo computacional e sendo possível, devido à simetria do problema, o modelo 2D apresenta apenas $\frac{1}{4}$ do seu domínio dando origem a que, depois do *mapping*, o modelo 3D apresente apenas $\frac{1}{8}$ do seu domínio.

Neste problema foi também utilizada a tecnologia do FSI (interação fluido-sólido) descrita no capítulo 6 (secção 6.4) permitindo assim transmitir as forças provenientes da onda de choque explosiva à estrutura. Como referido anteriormente, esta tecnologia necessita de duas malhas, sendo elas uma malha Lagrangiana para a estrutura e uma malha ALE para os fluidos (gases provenientes da detonação e o ar envolvente). O método de acoplamento é definido pela função

*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID em que se seleccionou a opção CTYPE = 4, correspondente à opção de um método de penalidade para o controlo das interferências entre as malhas lagrangeana e ALE. Um problema difícil de resolver neste tipo de acoplamento é o chamado “*leakage*” em que uma parte da massa de fluido que impacta a chapa consegue atravessar a malha. Para prevenir esse fenómeno pode ser definido o número de pontos de acoplamento, ou seja, o número de pontos que constituirão a rede que, no interior de cada elemento *shell* ou sólido da chapa, irá detectar existência de penetração por parte de nós da malha ALE. A opção NQUAD permite definir a densidade dessa tal rede de pontos, que em cada elemento serão utilizados para se opor à penetração por nós da malha ALE.

As condições de fronteira seleccionadas preveem ausência de restrições nos nós nas superfícies livres da malha ALE (opção EBC = 0 em *CONTROL_ALE) com excepção das superfícies de corte que permitem a redução do domínio para $\frac{1}{8}$ do seu volume, onde a condição de fronteira eleita foi a de a velocidade normal à superfície ser nula.

A simulação no modelo 3D ocorreu de 15 μ s a 1000 μ s.

Na figura 7.24 estão presentes alguns dos vários estados da simulação, onde em a) existe a propagação da onda de pressão, b) ilustra o impacto da onda de pressão com a estrutura, c) o início da deformação da estrutura e propagação dos fluidos e d) a estrutura já totalmente deformada.

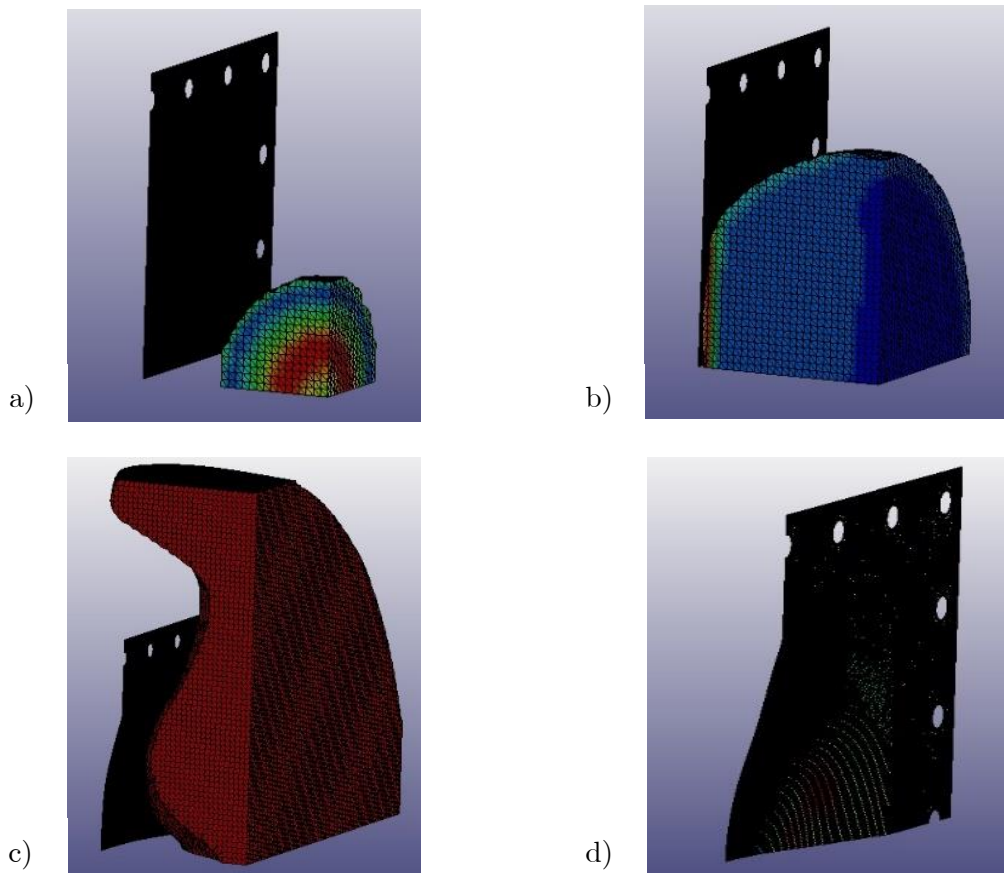


Figura 7.24 - Alguns dos estados da simulação. a) $t = 15 \mu s$, b) $t = 45 \mu s$, c) $t = 255 \mu s$ e d) $t = 1000 \mu s$.

7.2.4 Apresentação e análise de resultados

Na tabela 7.15 encontram-se os resultados provenientes da simulação deste problema usando a tecnologia do FSI e mapeando resultados de um modelo 2D para um modelo 3D. Os resultados apresentam a deformação máxima em certos nós previamente escolhidos (sobrepostos aos pontos onde se registaram as deformações no ensaio experimental) em cada um dos casos.

Tabela 7.15 - Resultados das deformações obtidas com a metodologia ALE.

Ponto	Deformação (mm)												
	Chapa n°1	Chapa n°2	Chapa n°3	Chapa n°4	Chapa n°5	Chapa n°6	Chapa n°7	Chapa n°8	Chapa n°9	Chapa n°10	Chapa n°11	Chapa n°12	Chapa n°14
1	22,7	30,5	41,0	24,9	31,9	44,9	27,4	32,8	27,1	29,7	50,2	39,2	33,6
2	21,3	29,2	39,2	23,9	30,8	43,9	26,2	31,6	25,4	29,1	49,7	38,9	33,4
3	18,3	26,1	33,9	20,8	27,8	39,0	22,9	28,5	21,7	26,6	46,4	36,3	31,6
4	14,7	20,9	26,1	16,1	22,7	31,8	17,8	23,2	17,4	21,9	39,6	30,6	26,8
5	10,4	14,6	18,9	11,0	16,7	23,6	12,1	17,2	13,4	16,2	30,0	23,0	20,4
6	6,3	8,4	11,9	6,7	10,4	14,5	7,3	10,8	9,5	10,5	18,8	14,6	14,1
7	2,0	2,6	3,9	2,2	3,3	4,8	2,4	3,5	3,1	3,5	6,7	5,2	5,6

As figuras 7.25-7.37 representam o perfil de deformação obtido com a metodologia ALE em comparação com o perfil de deformação obtido experimentalmente.

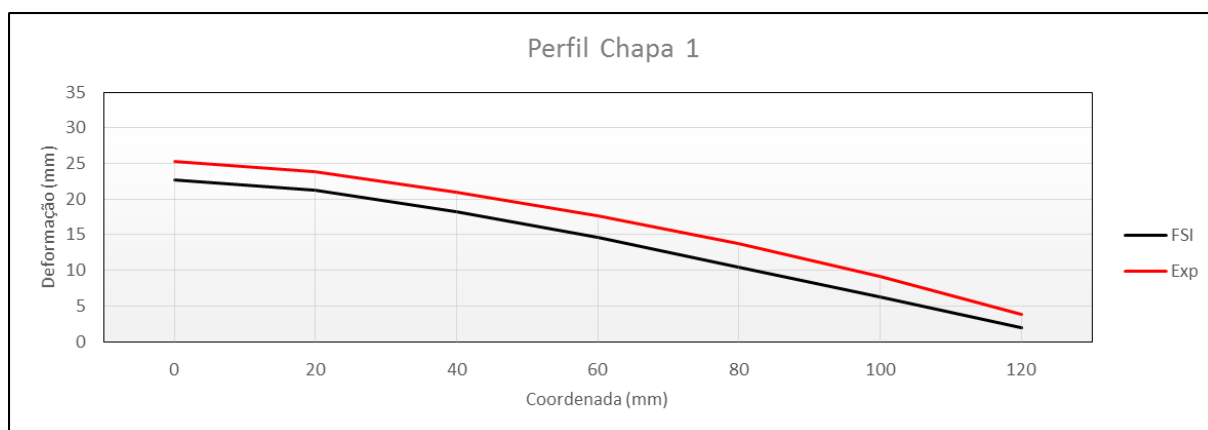


Figura 7.25 - Chapa nº 1. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.

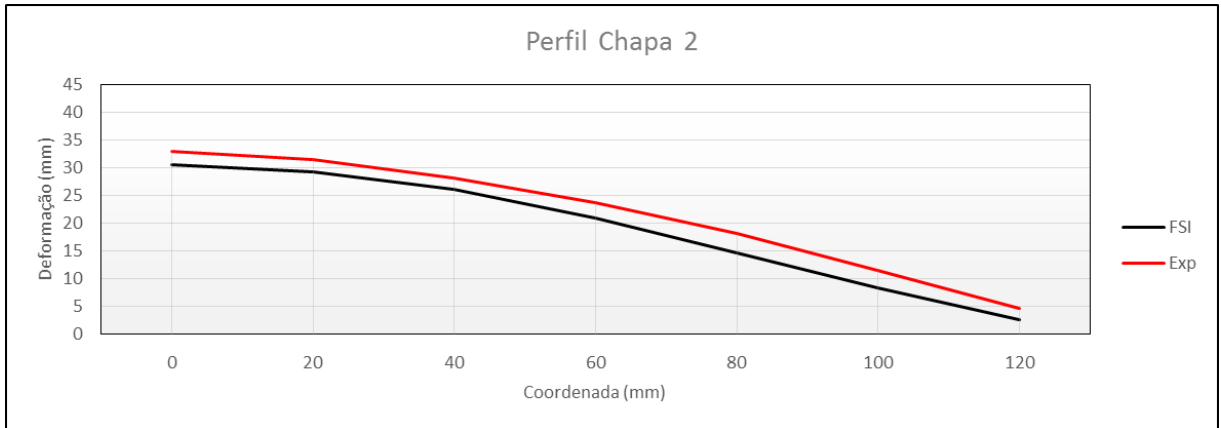


Figura 7.26 - Chapa nº 2. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.

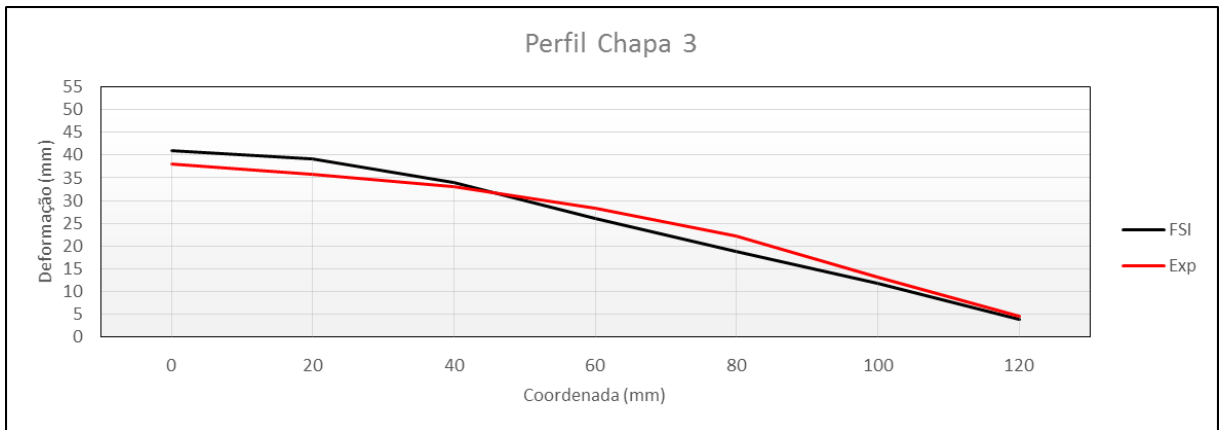


Figura 7.27 - Chapa nº 3. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.

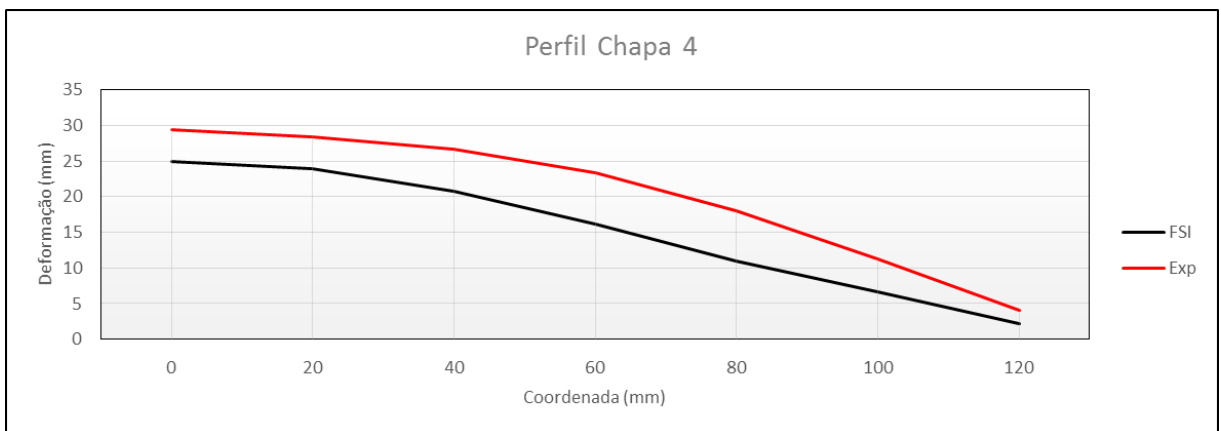


Figura 7.28 - Chapa nº 4. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.

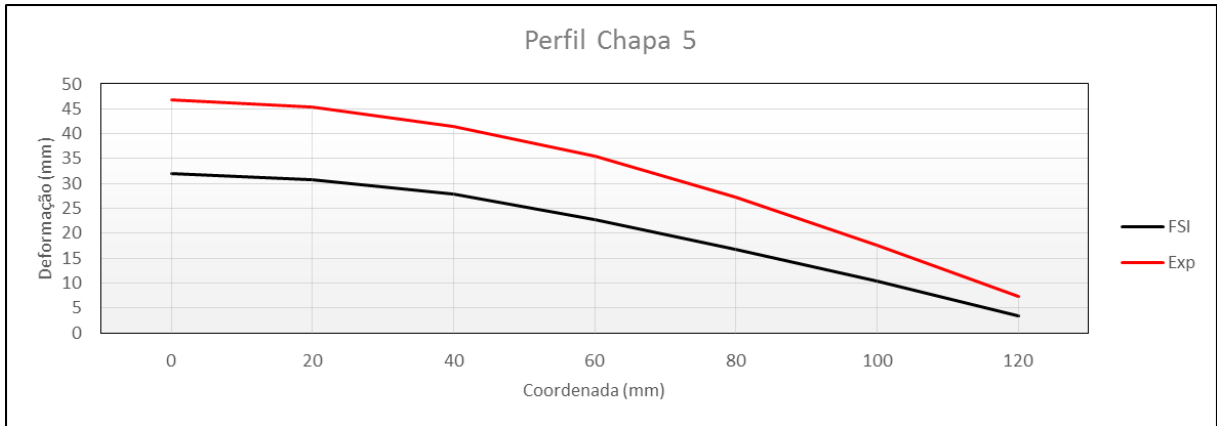


Figura 7.29 - Chapa nº 5. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.

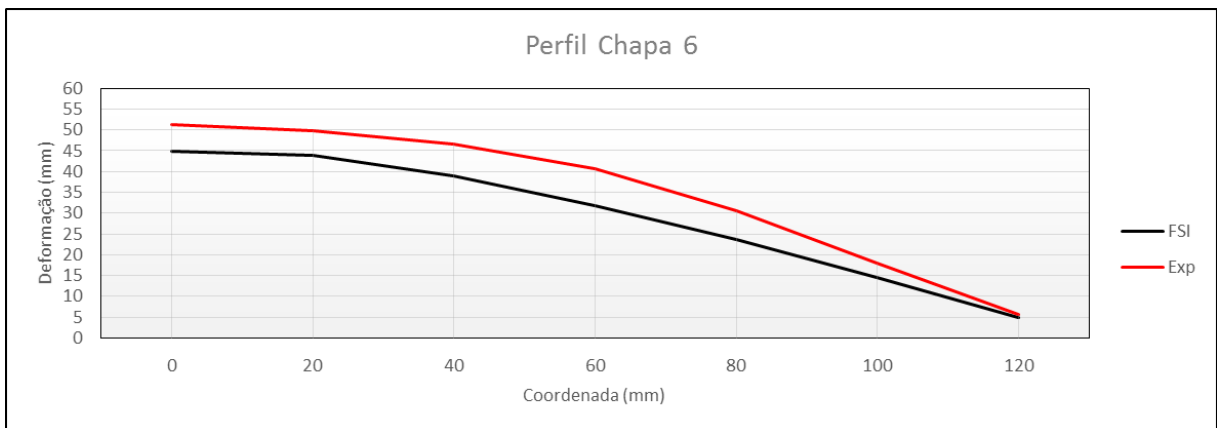


Figura 7.30 - Chapa nº 6. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.

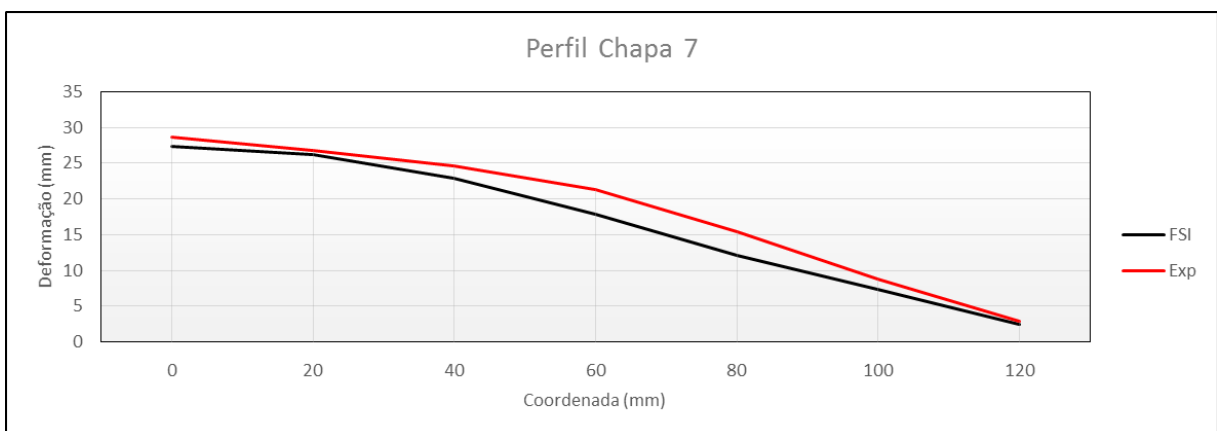


Figura 7.31 - Chapa nº 7. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.

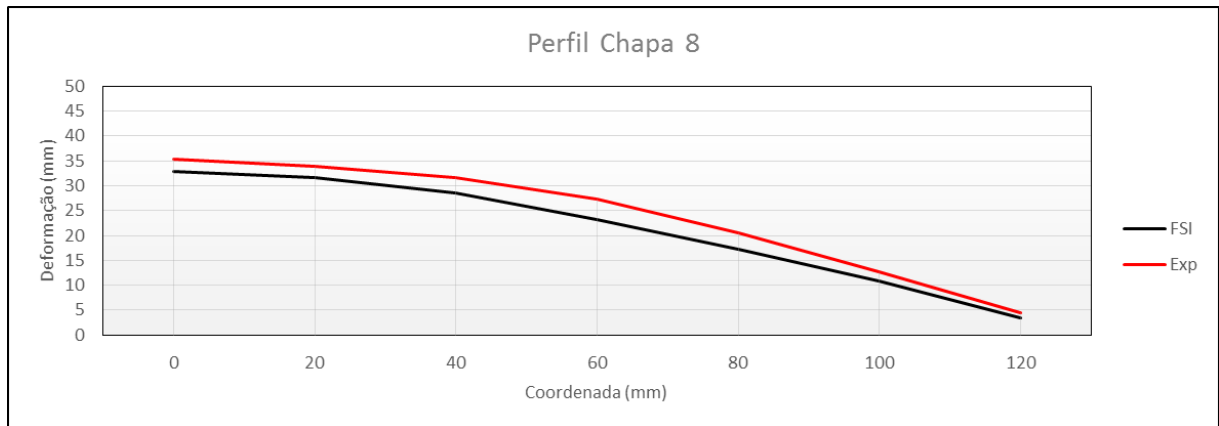


Figura 7.32 - Chapa nº 8. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.

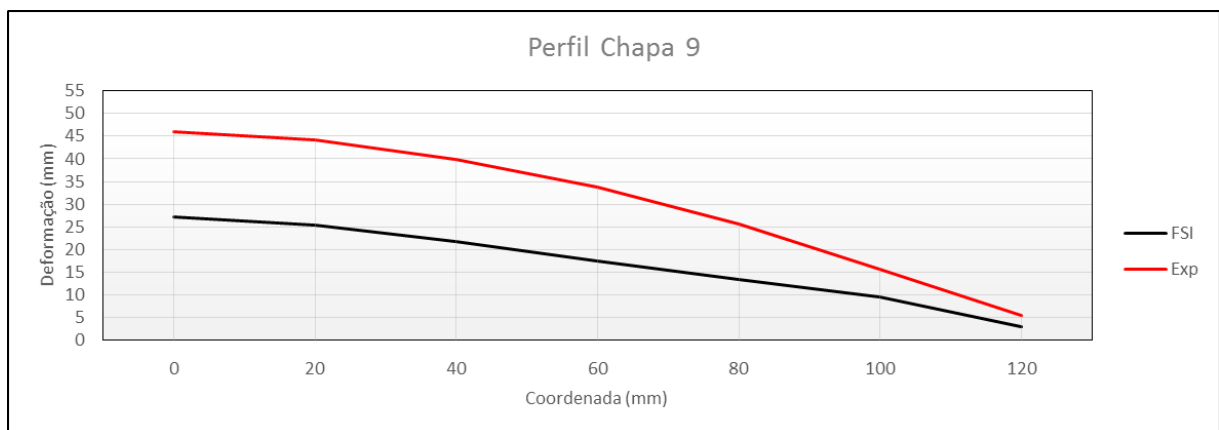


Figura 7.33 - Chapa nº 9. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.

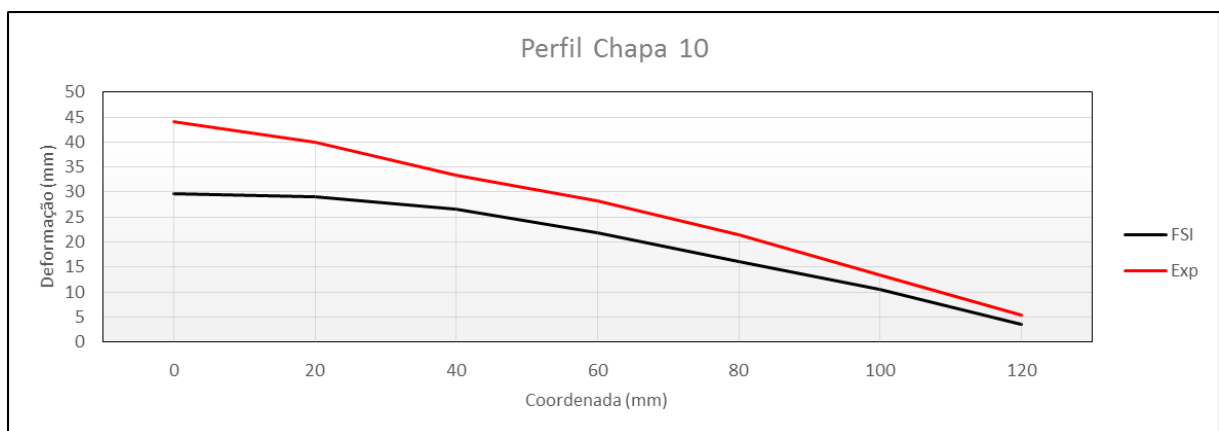


Figura 7.34 - Chapa nº 10. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.

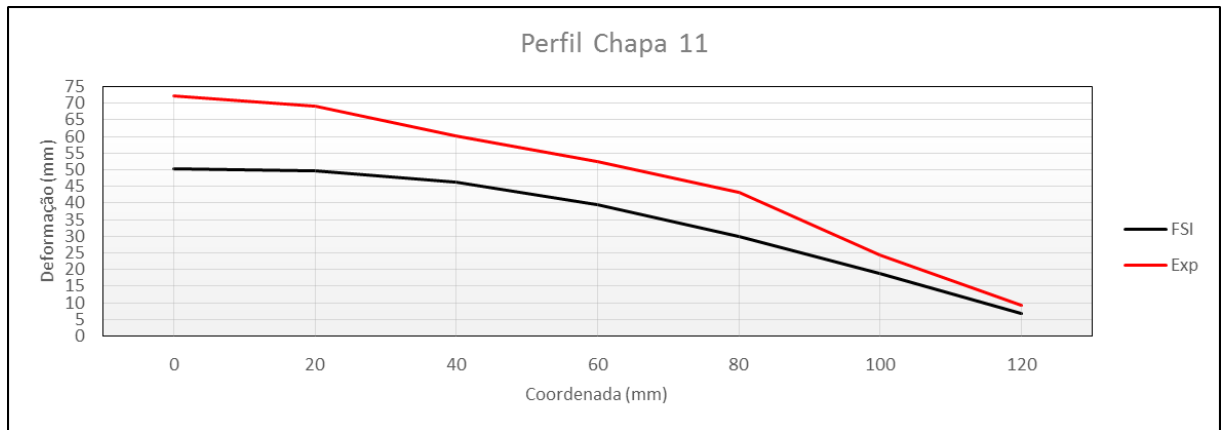


Figura 7.35 - Chapa nº 11. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.

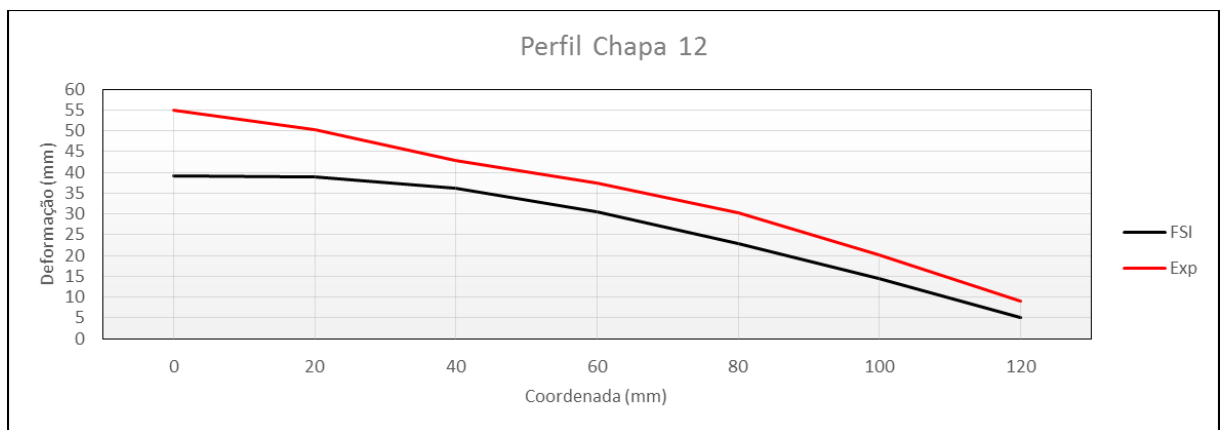


Figura 7.36 - Chapa nº 12. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.

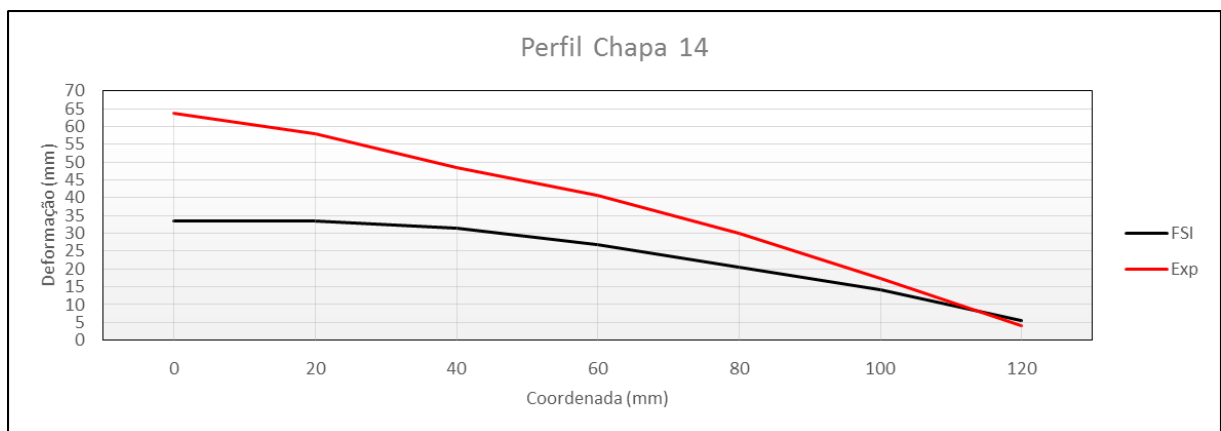


Figura 7.37 - Chapa nº 14. Comparação dos perfis de deformação obtidos usando a metodologia ALE e resultados experimentais.

Ao analisar as figuras 7.25-7.37 que representam os perfis de deformação de todas as chapas submetidas à detonação de um explosivo, numérica e experimentalmente, observa-se uma boa aproximação entre as duas curvas. Porém, ao conjugar uma aproximação do explosivo ao alvo com uma carga de explosivo maior torna-se evidente um certo desfasamento na zona de maior deformação (centro da chapa) como são os casos das chapas nº 9, nº 10, nº 11, nº 12 e nº 14. O método de análise ALE é otimista na medida em que subestima sistematicamente os resultados de deformação em comparação com outros métodos e com os resultados experimentais.

Verifica-se que o método ALE tem, contudo, potencial para este tipo de análises existindo múltiplos parâmetros quer no método FSI, quer nas equações de estado, quer no grau de refinamento da malha, que podem ainda ser afinados de forma a obter melhor aproximação aos resultados experimentais.

Capítulo 8 Conclusões

8.1 Conclusões

Foram realizados ensaios experimentais com o intuito de medir o perfil de deformação de chapas de alumínio sujeitas a uma onda de choque proveniente da detonação de um explosivo e posteriormente, usando o hidrocódigo LS-DYNA, conseguir validar tanto o modelo de material como o método ALE usados.

Através das simulações efectuadas foi possível validar tanto o modelo de material como o método ALE na propagação da onda de choque proveniente da detonação do explosivo e seus efeitos no impacto com a chapa de alumínio. Foi ainda possível retirar outras conclusões.

- ❖ Ocorrem certos fenómenos no encastramento da chapa de alumínio produzindo deformações irregulares;
- ❖ Existem dois factores principais na deformação do material sujeito ao impacto da onda de choque proveniente da detonação de um explosivo, são eles a massa de carga explosiva e a distância desta ao material alvo;
- ❖ A combinação de uma massa elevada com uma distância diminuta entre o explosivo e o material alvo produz um pico de deformação na zona mais afectada (centro da chapa) onde poderá ocorrer mesmo a ruptura do material.
- ❖ Na simulação do fenómeno explosivo, o refinamento das malhas afecta os resultados obtidos. Um refinamento exagerado introduz, também, erros nos resultados aumentando ainda o tempo de computação.
- ❖ Podem ser usados elementos *shell* ou elementos sólidos na modelação do material alvo. Concluiu-se que ao usar elementos *shell* consegue-se resultados bastantes aceitáveis e com a vantagem de a solução ser obtida muito mais rapidamente.

- ❖ Admite-se que o modelo utilizado ao não contemplar os mecanismos de falha não reproduziu correctamente os estados de deformação nas situações de pré-ruptura.

8.2 Trabalho futuro

Em análises futuras deverão ser experimentados modelos constitutivos que contemplem a falha do material.

É necessário um estudo mais aprofundado do modelo de material e método ALE usados na simulação para uma melhor correspondência ao fenómeno explosivo. Analisar os parâmetros que mais efeito têm nos resultados obtidos e proceder à identificação dos mesmos.

Seria do interesse o estudo de outros modelos de material que pudessem definir bem o comportamento do material sujeito ao impacto de uma onda de choque para posterior comparação com este e retirar as devidas conclusões.

Para uma reprodução exacta da estrutura montada, seria interessante, também, correr uma simulação cujo modelo representasse o mais possível a realidade, isto é, uma chapa encastrada numa moldura fixa por parafusos. Teria de se analisar os esforços em cada parte do conjunto bem como a actuação das forças exteriores.

Referências

- [1] A. Remennikov, "The state of the art of explosive loads characterisation," *Australian Earthquake Engineering Conference*, pp. 1-25, 2007.
- [2] C. Wu, M. Lukaszewicz, K. Schebella e L. Antanovskii, "Experimental and numerical investigation of confined explosion in a blast chamber," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, pp. 737-750, 2013.
- [3] Y. Hu, C. Wu, M. Lukaszewicz, J. Dragos, J. Ren e M. Haskett, "Characteristics of Confined Blast Loading in Unvented Structures," *International Journal of Protective Structures*, vol. 2, pp. 21-44, 2011.
- [4] U. S. A. C. o. Engineers, N. F. E. Command e A. F. C. E. S. Agency, "UFC 3-340-02 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions," 2008.
- [5] A. Jorge Martins Tavares, "Modelação Empírica do Carregamento de uma Estrutura Confinada sujeita a uma Onda de Choque Explosiva," FCT-UNL, 2015.
- [6] X. Zhou e H. Hao, "Prediction of Airblast Loads on Structures Behind a Protective Barrier," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 35, pp. 363-375, 2007.
- [7] J. O. Keller, M. Gresho, A. Harris e A. V. Tchouvelev, "What is an explosion?," *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 1-8, 2014.
- [8] R. J. Martin, A. Reza e L. W. Anderson, "What is an explosion? A case history of an investigation for the insurance industry," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 13, pp. 491-497, 2000.
- [9] J. P. Agrawal e R. D. Hodgson, *Organic Chemistry of Explosives*, 2007.
- [10] P. Sherkar, A. S. Whittaker e A. J. Aref, *Modeling the Effects of Detonations of High Explosives to Inform Blast-Resistance Design*, 2010.
- [11] T. Davis, *The chemistry of powder and explosives*, 1943.
- [12] F. Dolce, *Blast impact simulation on composite military armours*, UNIVERSITY OF BATH, 2009.
- [13] C. Geretto, S. Chung Kim Yuen e G. N. Nurick, "An experimental study of the effects of degrees of confinement on the response of square mild steel plates subjected to blast loading," *International Journal of Impact Engineering*, pp. 1-13, 2014.

- [14] P. Cooper, "Explosives Engineering," New York: John Wiley & Sons Inc., 1996, p. 460.
- [15] J. a. W. W. Zukas, "Explosive effects and applications," Springer, 2002, p. 433.
- [16] B. Zakrisson, "Numerical simulations of blast loaded steel plates for improved vehicle protection," Lulea University of Technology, 2013.
- [17] S. Eveillard, "Propagation d'une onde de choc en présence d'une barrière de protection," Université d'Orléans, 2013.
- [18] A. Zyskowski, I. Sochet, G. Mavrot, P. Bailly e J. Renard, "Study of the explosion process in a small scale experiment-structural loading," *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vols. %1 de %217, no. 4, pp. 291-299, Jul. 2004.
- [19] J. Martins, "Blast-wave absorption capacity of sandwich structures incorporating cellular materials," Universidade de Aveiro, 2012.
- [20] K. Alhussan, K. L. Stepanov, Y. a. Stankevich, Y. a. Smetannikov e S. Zhdanok, "Hydrodynamics of the initial phase of explosion," *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vols. %1 de %2vol. 54, no.7-8, pp. 1627-1640, Mar. 2011.
- [21] I. Sochet, "Blast effects of external explosions," 2011.
- [22] E. Scarin, "Fem Analysis of the Fluid Structure Interaction between shock-waves and deformable structures," UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA, 2012.
- [23] E. Semb, "Behavior of Aluminum at Elevated Strain Rates and," NTNU- Norwegian University of Science and Technology, June 2013.
- [24] Austral Wright Metals, Australia: AW DISTRIBUTION PTY LTD, 2000-2015.
- [25] F. Barlat, "Constitutive Modeling for Metals," em *Advanced Methods in Material Forming*, Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 1-18.
- [26] H. Zhao, "A constitutive model for metals over a large range of strain rates, Identification for mild-steel and aluminium sheets," *Materials Science and Engineering*, pp. 95-99, 1997.
- [27] F. Zerilli e R. Armstrong, "Description of tantalum deformation behavior by dislocation mechanics based constitutive relations," *Journal of Applied Physics*, pp. 1580-1591, 1990.
- [28] F. Zerilli e R. Armstrong, "Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations," *Journal of Applied Physics*, pp. 1816-1825, 1987.
- [29] P. Perzyna, "Fundamental problems in viscoplasticity," em *Rec. Adv. Appl. Mech.*, New York, Academic Press, 1966, pp. 243-377.
- [30] P. Perzyna e W. Olszak, "On thermal effects in viscoplasticity," *J. Appl. Math. Phys.*, vol. 20,

pp. 676-680, 1969.

- [31] S. Bodner e Y. Partom, "Constitutive equations for elastic-viscoplastic strain-hardening materials," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 42, pp. 385-389, 1975.
- [32] G. Johnson e W. Cook, A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures, April 1983.
- [33] J. Li, F. Li, J. Cai, R. Wang, Z. Yuan e G. Ji, "Comparative investigation on the modified Zerilli-Armstrong model and Arrhenius-type model to predict the elevated-temperature flow behaviour of 7050 aluminium alloy," *Computacional Materials Science*, pp. 56-65, April 2013.
- [34] A. Ambroziak, "Modelling of continuum damage for application in elasto-viscoplastic Bodner-Partom constitutive equations," *Engineering Transactions*, pp. 115-128, 2007.
- [35] A. Ambroziak, "Application of elasto-viscoplastic Bodner-Partom constitutive equations in finite element analysis," *Computer Assisted Mechanics and Engineering Science*, pp. 405-429, 2007.
- [36] Y. Lin e X.-M. Chen, "A critical review of experimental results and constitutive descriptions for metals and alloys in hot working," *Materials and Design*, pp. 1733-1759, 2011.
- [37] T. Borvik, A. Clausen, O. Hopperstad e M. Langseth, "Perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose steel projectiles - experimental study," *International Journal of Impact Engineering*, pp. 367-384, 2004.
- [38] F. Grytten, T. Borvik, O. Hopperstad e M. Langseth, "Low velocity perforation of AA5083-H116 aluminium plates," *International Journal of Impact Engineering*, pp. 597-610, 2009.
- [39] H. Abdulhamid, A. Kolopp, C. Bouvet e S. Rivallant, "Experimental and numerical study of AA5086-H111 aluminium plates," *International Journal of Impact Engineering*, pp. 1-12, 2013.
- [40] Y. Liu, "ANSYS and LS-DYNA used for structural analysis," *International Journal Computer Aided Engineering and Technology*, vol. 1, pp. 31-44, 2008.
- [41] M. Souli, A. Ouahsine e L. Lewin, "ALE formulation for fluid-structure interaction problems," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 190, pp. 659-675, 2000.
- [42] D. J. Benson e B. C. D. J., COMPUTATIONAL METHODS IN LAGRANGIAN AND EULERIAN HYDROCODES, 1990.
- [43] C. Linder, "An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Element Formulation for Dynamics and Finite Strain Plasticity Models," UNIVERSITY STUTTGART, 2003.

- [44] J. A. Zukas, Introduction to Hydrocodes, Elsevier Ltd, 2004.
- [45] D. J. Benson, "A multi-material Eulerian formulation for the efficient solution of impact and penetration problems," em *Computational Mechanics*, 2005, pp. 558-571, vol. 15.
- [46] A. Alia e M. Souli, "High explosive simulation using multi-material formulations," em *Appl. Therm. Eng.*, Jul. 2006, pp. 1032-1042, vol. 26, no. 10.
- [47] K. Spranghers, I. Vasilakos, D. Lecompte, H. Sol e J. Vantomme, "Numerical simulation and experimental validation of the dynamic response of aluminum plates under free air explosions," *International Journal of Impact Engineering*, pp. 83-95, 2013.
- [48] J. O. Hallquist, Theory manual, LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION, 2006.
- [49] J. Hallquist, LS-DYNA3D theoretical manual, LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION, 1993.
- [50] D. Carlsson, "Arbitrary Lagrangian-Eulerian Simulations of a Pressure Pulse inside a Flexible Porous Fabric Bag," CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2014.
- [51] V. Lapoujade, N. V. A. N. Dorsselaer e S. a. C. K. Kevorkian, "A Study of Mapping Technique for Air Blast Modeling," *11th International LS-DYNA Users Conference*, vol. 1, pp. 23-32, 2010.
- [52] M. Forsblom, "Supersonic Artillery Projectile Fin Deployment Simulation Methodology," Lulea University of Technology, 2013.
- [53] K. G. Webster, "Investigation of Close Proximity Underwater Explosion Effects on a Ship-Like Structure Using the Multi-Material Arbitrary Lagrangian Eulerian Finite Element Method," Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.
- [54] B. Zakrisson, B. Wikman e H.-A. Häggblad, "Numerical simulations of blast loads and structural deformation from near-field explosion in air," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 38, pp. 597-612, Jul. 2011.
- [55] N. Aquelet e M. Souli, "2D to 3D ALE Mapping," em *10th International LS-DYNA Users Conference*, 2008.
- [56] M. Souli, J. Wang, I. Do e C. Hao, "ALE and Fluid Structure Interaction in LS-DYNA," em *8th International LS-DYNA Users Conference*, 2004.
- [57] N. Aquelet e M. a. O. L. Souli, "Euler-Lagrange coupling with damping effects: Application to slamming problems," em *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Jan. 2006, pp. 110-132.

[58] LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION (LSTC), LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL, August 2012.

[59] J. Day, Guidelines for ALE Modeling in LS-DYNA, 2009.

ANEXOS

ANEXO A

*Ficheiro criado no LS-PrePost para simulação da detonação de um alto explosivo e deformação de uma chapa de alumínio pelo impacto com a onda de choque usando a função *LOAD_BLAST e usando elementos shell (ficheiro criado para o ensaio nº 1, para os outros ensaios alterar massa e stand-off no comando *LOAD_BLAST_ENHANCED).*

```
$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost 4.1
*KEYWORD
*TITLE
$# title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*PART
$# title
Plate
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
      3          3          1          0          1          0
0          0
*SECTION_SHELL_TITLE
Plate
$#      secid      elform      shrf      nip      propt      qr/irid
icomp      setyp
      3          2  1.000000      4          1          0
0          1
$#      t1          t2          t3          t4          nloc      marea
idof      edgset
  0.300000  0.300000  0.300000  0.300000      0.000      0.000
0.000          0
*MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK_TITLE
Plate
$#      mid      ro      e      pr      vp
      1  2.700000  0.700000  0.300000      0.000
$#      a      b      n      c      psfail      sigmax
sigmat      eps0
  1.4700E-3  1.4920E-3  0.396000  0.1040001.0000E+17
0.0001.0000E+28  1.0000E-6
*HOURLASS
$#      hgid      ihq      qm      ibq      q1      q2
qb/vdc      qw
      1          3  0.100000      0  1.500000  6.0000E-2
0.100000  0.100000
*PART
$# title
```

```

Top frame
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
          4          2          2          0          1          0
0          0
*SECTION_SOLID_TITLE
Solid for frame
$#      secid      elform      aet
          2          1          0
*MAT_ELASTIC_TITLE
Frame steel
$#      mid      ro      e      pr      da      db      not
used
          2  7.850000  2.100000  0.300000  0.000  0.000
0
*PART
$# title
Back frame
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
          5          2          2          0          1          0
0          0
*BOUNDARY_SPC_SET_ID
$#      id
heading
      1Frame symmetric BC x
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx
dofry      dofrz
          5          0          1          0          0          0
1          1
$#      id
heading
      2Frame symmetric BC y
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx
dofry      dofrz
          6          0          0          1          0          1
0          1
$#      id
heading
      3Plate symmetric BC x
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx
dofry      dofrz
          11         0          1          0          0          0
1          1
$#      id
heading
      4Plate symmetric BC y
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx
dofry      dofrz
          10         0          0          1          0          1
0          1
$#      id
heading
      5Rigid support
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx
dofry      dofrz
          9          0          1          1          1          1
1          1

```

```

$#      id
heading
      6Holes
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofzrx
dofry      dofzr
      12      0      1      1      1      0
0      0
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid
title
      1Top frame to plate
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid
spr      mpr
      5      8      0      0      0      0
0      0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk
bt      dt
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0
0.0001.0000E+20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt
fsf      vsf
      1.000000      1.000000      0.000      0.000      1.000000      1.000000
1.000000      1.000000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid
title
      2Back frame to plate
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid
spr      mpr
      6      8      0      0      0      0
0      0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk
bt      dt
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0
0.0001.0000E+20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt
fsf      vsf
      1.000000      1.000000      0.000      0.000      1.000000      1.000000
1.000000      1.000000
*CONTROL_ACCURACY
$#      osu      inn      pidosu
      1      3      0
*CONTROL_ENERGY
$#      hgen      rwen      slnten      rylen
      2      2      2      2
*CONTROL_SOLID
$#      esort      fmatrix      niptets      swlocl      psfail      t10jtol
      1      1      4      2      0      0.000
$#      pm1      pm2      pm3      pm4      pm5      pm6      pm7      pm8
pm9      pm10
      0      0      0      0      0      0      0      0
0      0
*CONTROL_TERMINATION
$#      endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas
      1000.0000      0      0.000      0.000      0.000
*CONTROL_TIMESTEP
$#      dtinit      tssfacc      isdo      tslimt      dt2ms      lctm
erode      ms1st

```

```

0.000 0.600000 0 0.000 0.000 0
0 0
$# dt2msf dt2mslc imsc1 unused unused rmscl
0.000 0 0 0.000
*DATABASE_GLSTAT
$# dt binary lcur ioopt
10.000000 0 0 1
*DATABASE_MATSUM
$# dt binary lcur ioopt
10.000000 0 0 1
*DATABASE_NODFOR
$# dt binary lcur ioopt
10.000000 0 0 1
*DATABASE_NODOUT
$# dt binary lcur ioopt option1 option2
10.000000 0 0 1 0.000 0
*DATABASE_BINARY_BLSTFOR
$# dt lcdt beam npltc psetid
10.000000 0 0 0 0
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$# dt lcdt beam npltc psetid
10.000000 0 0 0 0
$# ioopt
0
*DATABASE_NODAL_FORCE_GROUP
$# nsid cid
13 0
*DATABASE_NODAL_FORCE_GROUP
$# nsid cid
14 0
*DATABASE_HISTORY_NODE_ID
$# id1
heading
193855
174894
186589
188604
189365
191724
196029
*LOAD_BLAST_SEGMENT_SET
$# bid ssid alepid sfnrbscalep
1 4 0 0.000 1.000000
1 7 0 0.000 1.000000
*LOAD_BLAST_ENHANCED
$# bid m xbo ybo zbo tbo
unit blast
1 58.910002 0.000 0.000 15.000000 0.000
4 2
$# cfm cfl cft cfp nidbo death
negphs
0.000 0.000 0.000 0.000 01.0000E+20
0
*INCLUDE
Moldura_shell.k
*END

```

ANEXO B

*Ficheiro criado no LS-PrePost para simulação da detonação de um alto explosivo e deformação de uma chapa de alumínio pelo impacto com a onda de choque usando a função *LOAD_BLAST e usando elementos sólidos (ficheiro criado para o ensaio nº 1, para os outros ensaios alterar massa e stand-off no comando *LOAD_BLAST_ENHANCED).*

```

$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost 4.2 (Beta)
*KEYWORD
*TITLE
$#
title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*PART
$#
title
Top frame
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
         4         1         1         0         1         0
0         0
*SECTION_SOLID_TITLE
Plate
$#      secid      elform      aet
         1         2         0
*MAT_RIGID_TITLE
Rigid frames
$#      mid      ro      e      pr      n      couple
m      alias
         1  7.850000  2.070000  0.300000  0.000  0.000
0.000
$#      cmo      con1      con2
  1.000000      7.      7.
$#lco or a1      a2      a3      v1      v2      v3
         0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
*HOURLASS_TITLE
Hourglass
$#      hgid      ihq      qm      ibq      q1      q2
qb/vdc      qw
         1         2  0.100000      1  1.500000  6.0000E-2
0.100000  0.100000
*PART
$#
title
Bottom frame
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
         5         1         1         0         1         0
0         0
*PART

```

```

$#
title
Plate
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
      8          1          2          0          1          0
0          0
*MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK_TITLE
Plate JC
$#      mid      ro      e      pr      vp
      2  2.650000  0.720000  0.330000  0.000
$#      a      b      n      c      psfail      sigmax
sigmat      eps0
  1.4700E-3  3.4920E-3  0.396000  0.1040001.0000E+17  1.2500E-
31.0000E+28  1.0000E-6
*BOUNDARY_SPC_SET_ID
$#      id
heading
      1Plate BC sym x
$#      nsid      cid      dofz      dofry      dofyz      dofz      dofz      dofz
dofry      dofz      dofz      dofz      dofz      dofz      dofz      dofz
      7          0          1          0          0          0          0
0          1
$#      id
heading
      2Plate Bc sym y
$#      nsid      cid      dofz      dofry      dofyz      dofz      dofz      dofz
dofry      dofz      dofz      dofz      dofz      dofz      dofz      dofz
      8          0          0          1          0          0          1
0          1
$#      id
heading
      3Holes
$#      nsid      cid      dofz      dofry      dofyz      dofz      dofz      dofz
dofry      dofz      dofz      dofz      dofz      dofz      dofz      dofz
      9          0          1          1          0          0          0
0          1
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid
title
      1Contact top frame to plate
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid
spr      mpr
      5          1          0          0          0          0
0          0
$#      fs      fd      dc      vc      vdc      penchk
bt      dt
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0
0.0001.0000E+20
$#      sfs      sfm      sst      mst      sfst      sfmt
fsf      vsf
      1.000000  1.000000      0.000      0.000  1.000000  1.000000
1.000000  1.000000
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#      cid
title
      2Contact back frame to plate

```

```

$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid
spr          mpr
          6          7          0          0          0          0
0          0
$#      fs          fd          dc          vc          vdc          penchk
bt          dt
          0.000      0.000      0.000      0.000      0.000          0
0.0001.0000E+20
$#      sfs          sfm          sst          mst          sfst          sfmt
fsf          vsf
          1.000000  1.000000      0.000      0.000  1.000000  1.000000
1.000000  1.000000
*CONTROL_ACCURACY
$#      osu          inn      pidosu
          1          3          0
*CONTROL_ENERGY
$#      hgen          rwen      slnten      rylen
          2          2          2          1
*CONTROL_HOURLASS
$#      ihq          qh
          2  0.100000
*CONTROL_SOLID
$#      esort      fmatrix      niptets      swlocl      psfail      t10jtol
          1          1          4          2          0          0.000
$#      pm1      pm2      pm3      pm4      pm5      pm6      pm7      pm8
pm9      pm10
          0          0          0          0          0          0          0          0
0          0
*CONTROL_TERMINATION
$#      endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas
          1000.0000  0          0.000      0.000  1.0000E+8
*LOAD_BLAST_SEGMENT_SET
$#      bid          ssid      alepid      sfnr      scalep
          1          3          0          0.000  1.000000
          1          4          0          0.000  1.000000
*LOAD_BLAST_ENHANCED
$#      bid          m          xbo          ybo          zbo          tbo
unit      blast
          1  58.910000      0.000      0.000  15.00000  0.000
4          2
$#      cfm          cfl          cft          cfp          nidbo      death
negphs
          0.000      0.000      0.000      0.000          01.0000E+20
0
*DATABASE_ELOUT
$#      dt      binary      lcur      iopt      option1      option2
option3      option4
          10.000000  0          0          1          0          0
0          0
*DATABASE_GLSTAT
$#      dt      binary      lcur      iopt
          10.000000  0          0          1
*DATABASE_MATSUM
$#      dt      binary      lcur      iopt
          10.000000  0          0          1
*DATABASE_BINARY_BLSTFOR
$#      dt          lcdt      beam      npltc      psetid
          10.000000  0          0          0          0

```

```
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
```

```
$#      dt      lcdt      beam      npltc      psetid  
10.000000      0      0      0      0
```

```
$#      iopt  
0
```

```
*INCLUDE
```

```
Moldura_solid.k
```

```
*END
```

ANEXO C

*Ficheiro criado no LS-PrePost para simulação da detonação de um alto explosivo e deformação de uma chapa de alumínio pelo impacto com a onda de choque usando a metodologia ALE com a tecnologia FSI e usando elementos shell, no modelo 2D (ficheiro criado para o ensaio nº 1, para os outros ensaios alterar raio do explosivo no comando *INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY).*

```

$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost 4.1
*KEYWORD MEMORY=500000000
*TITLE
$# title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*PART
$# title
Part-C4
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
      1          1          1          1          1          0
0          0
*SECTION_ALE2D_TITLE
ALE2D
$#      secid      aleform      aet      elform
      1          11          0          14
*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN_TITLE
Mat-C4
$#      mid      ro      d      pcj      beta      k
g      sigy
      1  1.600000  0.804000  0.280000  0.000  0.000
0.000      0.000
*EOS_JWL_TITLE
EOS-C4
$#      eosid      a      b      r1      r2      omeg
e0      vo
      1  5.981550  0.137500  4.500000  1.500000  0.320000
8.7000E-2  1.000000
*HOURLASS
$#      hgid      ihq      qm      ibq      q1      q2
qb/vdc      qw
      1          1  1.0000E-3      0  1.500000  6.0000E-2
0.100000  0.100000
*PART
$# title
Part-Air
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
      2          1          2          2          1          0
0          0
*MAT_NULL_TITLE

```

```

Mat-Ar
$#      mid      ro      pc      mu      terod      cerod
ym      pr
      2 1.2930E-3      0.000      0.000      0.000      0.000
0.000      0.000
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL_TITLE
EOS-Ar
$#      eosid      c0      c1      c2      c3      c4
c5      c6
      2      0.000      0.000      0.000      0.000      0.400000
0.400000      0.000
$#      e0      v0
      2.5600E-6      1.000000
*BOUNDARY_SPC_SET_ID
$#      id
heading
      0Constrain x
$#      nsid      cid      dofz      dofry      dofyz      dofz      dofz      dofz
dofry      dofz
      1      0      1      0      0      0      0
0      0
$#      id
heading
      0Constrain y
$#      nsid      cid      dofz      dofry      dofyz      dofz      dofz      dofz
dofry      dofz
      2      0      0      1      0      0      0
0      0
*CONTROL_ALE
$#      dct      nadv      meth      afac      bfac      cfac
dfac      efac
      -1      1      3 -1.000000      0.000      0.000
0.000      0.000
$#      start      end      aafac      vfact      prit      ebc
pref      nsidebc
      0.0001.0000E+20      1.000000      1.0000E-6      0      2
1.0000E-6      0
$#      ncpl      nbkt      imascl      checkr
      1      50      0      0.000
*CONTROL_ENERGY
$#      hgen      rwen      slnten      rylen
      2      2      2      1
*CONTROL_TERMINATION
$#      endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas
      15.000000      0      0.000      0.000      0.000
*CONTROL_TIMESTEP
$#      dtinit      tssfacc      isdo      tslimt      dt2ms      lctm
erode      ms1st
      0.000      0.600000      0      0.000      0.000      0
0      0
$#      dt2msf      dt2mslc      imascl      unused      unused      rmscl
      0.000      0      0      0      0      0.000
*DATABASE_GLSTAT
$#      dt      binary      lcur      iopt
      2.000000      0      0      1
*DATABASE_MATSUM
$#      dt      binary      lcur      iopt
      2.000000      0      0      1

```

```

*DATABASE_TRHIST
$#      dt      binary      lcur      iopt
   2.000000      0          0          1
*DATABASE_BINARY_BLSTFOR
$#      dt      lcdt      beam      npltc      psetid
   2.000000      0          0          0          0
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#      dt      lcdt      beam      npltc      psetid
   2.000000      0          0          0          0
$#      iopt
      0
*DATABASE_TRACER
$#      time      track      x      y      z      ammg
nid
  0.000          1  2.000000      0.000      0.000      0
0
  0.000          1  4.000000      0.000      0.000      0
0
  0.000          1  6.000000      0.000      0.000      0
0
  0.000          1  8.000000      0.000      0.000      0
0
  0.000          1 10.000000      0.000      0.000      0
0
  0.000          1 12.000000      0.000      0.000      0
0
  0.000          1 14.000000      0.000      0.000      0
0
  0.000          1 16.000000      0.000      0.000      0
0
  0.000          1 18.000000      0.000      0.000      0
0
  0.000          1 20.000000      0.000      0.000      0
0
*ALE_REFERENCE_SYSTEM_GROUP
$#      sid      stype      prtype      prid      bctran      bcexp
bcrot      icoord
      1          0          8          0          0          0
0
$#      xc      yc      zc      explim      efac      unused
frcpad      iexpnd
  0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
0.000      0
*ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP
$#      sid      idtype      gpname
      1          1
      2          1
*INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY
$#      fmsid      fmidtyp      bammg      ntrace
      2          1          2          5
$#      conttyp      fillopt      fammg      vx      xy      xz
radvel      unused
      6          0          1      0.000      0.000      0.000
0
$#      xc      yc      zc      radius      unused      unused
unused      unused
      0.000      0.000      0.000      2.072728
*INCLUDE

```

Malha2D.k
*END

ANEXO D

*Ficheiro criado no LS-PrePost para simulação da detonação de um alto explosivo e deformação de uma chapa de alumínio pelo impacto com a onda de choque usando a metodologia ALE com a tecnologia FSI e usando elementos shell, no modelo 3D (ficheiro criado para o ensaio nº 1, para os outros ensaios alterar stand-off em *INITIAL_ALE_MAPPING).*

```

$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost 4.1
*KEYWORD MEMORY=900000000
*TITLE
$# title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*PART
$# title
C-4
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
          1          3          2          1          2          0
0          0
*SECTION_SOLID_TITLE
ALE
$#      secid      elform      aet
          3          11          0
*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN_TITLE
Mat C-4
$#      mid      ro      d      pcj      beta      k
g      sigy
          2  1.600000  0.804000  0.280000  0.000  0.000
0.000      0.000
*EOS_JWL_TITLE
EOS C-4
$#      eosid      a      b      r1      r2      omeg
e0      vo
          1  5.981550  0.137500  4.500000  1.500000  0.320000
8.7000E-2  1.000000
*HOURLASS_TITLE
Hourglass ALE
$#      hgid      ihq      qm      ibq      q1      q2
qb/vdc      qw
          2          1  1.0000E-3          0  1.500000  6.0000E-2
0.100000  0.100000
*PART
$# title
Air
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
          2          3          3          2          2          0
0          0
*MAT_NULL_TITLE
Mat Air

```

```

$#      mid      ro      pc      mu      terod      cerod
ym      pr
      3 1.2930E-3      0.000      0.000      0.000      0.000
0.000      0.000
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL_TITLE
EOS Air
$#      eosid      c0      c1      c2      c3      c4
c5      c6
      2      0.000      0.000      0.000      0.000      0.400000
0.400000      0.000
$#      e0      v0
      2.5600E-6      1.000000
*PART
$# title
Shell plate
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav
adpopt      tmid
      3      1      1      0      1      0
0      0
*SECTION_SHELL_TITLE
Shell plate
$#      secid      elform      shrf      nip      propt      qr/irid
icomp      setyp
      1      2      0.833000      4      1      0
0      1
$#      t1      t2      t3      t4      nloc      marea
idof      edgset
      0.300000      0.300000      0.300000      0.300000      0.000      0.000
0.000      0
*MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK_TITLE
Aluminium
$#      mid      ro      e      pr      vp
      1      2.700000      0.700000      0.300000      0.000
$#      a      b      n      c      psfail      sigmax
sigmat      eps0
      1.4780E-3      3.4920E-3      0.396000
0.1040001.0000E+171.0000E+281.0000E+28      1.000000
*HOURLASS_TITLE
Hourglass plate
$#      hgid      ihq      qm      ibq      q1      q2
qb/vdc      qw
      1      2      0.100000      0      1.500000      6.0000E-2
0.100000      0.100000
*SECTION_SOLID_TITLE
Aluminium
$#      secid      elform      aet
      2      1      0
*BOUNDARY_SPC_SET_ID
$#      id
heading
      1Symmetry x
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx
dofry      dofrz
      2      0      1      0      0      0
1      1
$#      id
heading
      2Symmetry y

```

```

$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx
dofry      dofrz
      3          0          0          1          0          1
0        1
$#      id
heading
      3Support
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx
dofry      dofrz
      1          0          1          1          1          1
1        1
$#      id
heading
      4Symmetry ALE x
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx
dofry      dofrz
      4          0          1          0          0          0
1        1
$#      id
heading
      5Symmetry ALE y
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx
dofry      dofrz
      5          0          0          1          0          1
0        1
$#      id
heading
      6Symmetry ALE z
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx
dofry      dofrz
      6          0          0          0          1          1
1        0
*CONTROL_ACCURACY
$#      osu      inn      pidosu
      0          2          0
*CONTROL_ALE
$#      dct      nadv      meth      afac      bfac      cfac
dfac      efac
      -1          1          3 -1.000000      0.000      0.000
0.000      0.000
$#      start      end      aafac      vfact      prit      ebc
pref      nsidebc
      0.0001.0000E+30      1.000000      1.0000E-6          1          0
0.000      0
$#      ncpl      nbkt      imascl      checkr
      1          50          0          0.000
*CONTROL_ENERGY
$#      hgen      rwen      slnten      rylen
      2          2          2          1
*CONTROL_SHELL
$#      wrpang      esort      irnxx      istupd      theory      bwc
miter      proj
      20.000000      1          -1          4          2          1
1        1
$#      rotascl      intgrd      lamsht      cstyp6      tshell
      1.000000      0          0          1          0
$#      psstupd      sidt4tu      cntco      itsflg      irqquad
      0          0          0          0          2

```

```

$# nfail1      nfail4      psnfail      keepcs      delfr      drcpsid
drcprm
      0          0          0          0          0          0
1.000000
*CONTROL_SOLID
$#  esort      fmatrix      niptets      swlocl      psfail      t10jtol
      1          1          4          2          0          0.000
$#  pm1        pm2          pm3          pm4          pm5          pm6          pm7          pm8
pm9      pm10
      0          0          0          0          0          0          0          0
0          0
*CONTROL_TERMINATION
$#  endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas
1000.0000      0          0.000      0.000      0.000
*CONTROL_TIMESTEP
$#  dtinit      tssfacc      isdo      tslimt      dt2ms      lctm
erode      ms1st
      0.000      0.600000      0          0.000      0.000      0
0          0
$#  dt2msf      dt2mslc      imsc1      unused      unused      rmsc1
      0.000      0          0          0          0          0.000
*DATABASE_GLSTAT
$#  dt      binary      lcur      iopt
10.000000      0          0          1
*DATABASE_MATSUM
$#  dt      binary      lcur      iopt
10.000000      0          0          1
*DATABASE_NODOUT
$#  dt      binary      lcur      iopt      option1      option2
10.000000      0          0          1          0.000      0
*DATABASE_BINARY_BLSTFOR
$#  dt      lcdt      beam      npltc      psetid
2.000000      0          0          0          0
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#  dt      lcdt      beam      npltc      psetid
10.000000      0          0          0          0
$#  iopt
0
*DATABASE_HISTORY_NODE_ID
$#  id1
heading
      46
      265
      285
      305
      325
      345
      365
*DEFINE_VECTOR
$#  vid      xt      yt      zt      xh      yh
zh      cid
      100      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000 -
1.000000      0
*ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP
$#  sid      idtype      gpname
      1          1
      2          1
*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID

```

```

$#  slave  master  sstyp  mstyp  nquad  ctype
direc      mcoup
      3      10      1      0      2      4
2      0
$#  start      end      pfac      fric      frcmin      norm
normtyp      damp
      0.0001.0000E+10  0.100000  0.000  0.500000  0
0      0.000
$#      cq      hmin      hmax      ileak      pleak      lcidpor
nvent  blockage
      0.000      0.000      0.000      0  0.100000  0
0      0
$#  iboxid  ipenchk  intforc  ialesof  lagmul  pfacmm
thkf
      0      0      0      0      0.000  0
0.000
*INITIAL_ALE_MAPPING
$#      pid      typ      ammsid
      10      0      20
$#      xo      yo      zo      vecid
      0.000      0.000  15.000000  100
*INCLUDE
Moldura.k
*END

```