

**Simulador Dinâmico de Condução da VBR 8x8 Pandur II**  
Análise e Modelação do Efeito Provocado por Minas

**Armando Jorge Loureiro da Silva**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Mecânica**

Orientador: Professor Doutor José Alberto de Jesus Borges

**Júri**

Presidente: Prof. João Rogério Caldas Pinto

Orientador: Prof. José Alberto de Jesus Borges

Vogais: Prof. Corneliu Cismasiu

Major Énio Pereira Chambel

**Dezembro 2016**



À minha família.





## Agradecimentos

Nos parágrafos que se seguem pretendo manifestar um profundo agradecimento a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para que fosse possível elaborar este trabalho e, consequentemente, alcançar com sucesso o objetivo final desta importante fase na minha formação.

Ao meu orientador, Professor José Borges, por me ter feito chegar este tema de dissertação, a dedicação e o empenho demonstrados até à sua conclusão. Assim como todos os conselhos, paciência, disponibilidade, apoio e amizade ao longo da minha formação académica.

Ao Diretor de Curso de Serviço de Material da Academia Militar, Major Chambel pelo apoio prestado no desenvolvimento deste trabalho e pela sua constante preocupação sobre o desenvolvimento do mesmo. Assim como pretendo agradecer aos anteriores diretores de Curso, Coronel Pereira da Silva e Tenente-Coronel Martins que criaram condições para ultrapassar os obstáculos que fui confrontando ao longo do meu percurso de frequência do curso e pelo sacrifício, esforço e dedicação em prol dos alunos do Serviço de Material.

Aos engenheiros Egas Fino, José Ferreira e Jaime Coimbra da ETI pela sua disponibilidade, prontidão e dedicação demonstrados no enquadramento deste trabalho no projeto PDDS. De igual forma, por providenciar a oportunidade de desenvolver um trabalho nesta área. Assim como por toda a informação e partilha de conhecimento essenciais ao fortalecimento da qualidade do trabalho desenvolvido.

Ao Major-General Miguel Leitão pela sua preocupação e disponibilidade em criar condições que beneficiaram a realização da dissertação de mestrado.

Ao Tenente-Coronel Pereira, do Estado Maior do Exército, pelo empenho e preocupação em disponibilizar informação legal acerca dos assuntos envolvidos no tema da dissertação.

Ao Hugo Rocha pela disponibilidade, prontidão e ajuda em questões relacionadas com a ligação e o enquadramento do meu trabalho e com disponibilização de informação junto da GDELS-Steyr e da ETI.

Aos meus Camaradas de curso de Serviço de Material e curso geral de Engenharias da Academia Militar, em especial aqueles que mais perto de mim conviveram, pelos 6 anos de partilha das mesmas alegrias e vitórias, das discussões e oposições, mas sempre com a genuinidade e humildade que me deram força e ânimo para enfrentar todos as dificuldades.

À minha família que sempre me apoiou e aconselhou nas minhas decisões, assim como todo o afeto e carinho demonstrado nos momentos mais difíceis, dando-me força e coragem para superar o árduo percurso percorrido.

À minha namorada, Irina Bencheci, pelo carinho, ajuda e amizade ao longo de todo o meu percurso profissional e pessoal, inspirando-me e motivando-me a concretizar os meus objetivos.



## Resumo

O trabalho desenvolvido nesta dissertação pretende contribuir para o projeto *Pandur Dynamic Driving Simulator*, através da criação de um evento de simulação relacionado com a detonação de minas sob o casco da viatura. A magnitude deste evento está de acordo com o STANAG 4569.

O evento foi analisado tendo por base um estudo detalhado sobre o rebentamento de cargas explosivas e a respetiva influência na viatura quando a detonação ocorre sob o casco. A análise do rebentamento de explosivos foi desenvolvida a partir de uma revisão bibliográfica do tema e a geração de simulações numéricas pelo método de elementos finitos, através da ferramenta LS-DYNA®.

Os resultados do estudo foram implementados no simulador de acordo com a arquitetura desenvolvida pela ETI para este projeto.

O estudo permitiu concluir que, para efeitos de simulação, os resultados obtidos são coerentes. No entanto, para um estudo mais preciso seria necessário avaliarem-se outros métodos de modelação de rebentamento de explosivos. Abre, ainda, o desafio à continuidade do desenvolvimento de análise do rebentamento de minas sob a VBR 8x8 Pandur II, tendo em vista levar ao conhecimento dos efeitos causados por este tipo de eventos na guarnição destas viaturas.

O presente trabalho foi desenvolvido mediante um Acordo de Confidencialidade exarado entre a Academia Militar, os membros do Júri desta Dissertação e os parceiros industriais GDELS-Steyr e ETI. As componentes do trabalho com classificação «Reservado» foram assim omitidas neste documento e/ou a informação alterada. Tal como requerido pelo normativo em vigor na Academia Militar e no Instituto Superior Técnico, o presente documento, tal como está, não contém matérias classificadas.

**Palavras-chave:** Simuladores Militares, Simulador Dinâmico de Condução, Viatura Blindada de Rodas 8x8 Pandur II, Detonação de Minas, Análise Numérica



## Abstract

The work developed in this thesis aims to give a contribution to the Pandur Dynamic Driving Simulator. This contribution consists of creating a simulation event with the goal of increasing the system capabilities. In order to do that, an event related to a mine blast under the vehicle, with an equivalent mass of TNT imposed by STANAG 4569 was modeled and simulated.

The event was analysed based on the development of a detailed study of blast explosive charge and the respective influence on the vehicle, when the detonation occurs under the hull. The explosive burst analysis was developed based on a review of previous works and a design of numerical simulations using the finite element method, using the LS-DYNA® software.

The work was concluded by implementing of the obtained results in the simulator according to the architecture developed by ETI for this project.

This investigation allowed to conclude that the obtained results are coherent. However, to make a more precise investigation it would be necessary to evaluate other modeling methods for mine blasting. This work provides a basis to proceed with the analysis around Mine blasting under the 8x8 Pandur II, with the aim to assess the injury effects on the vehicle's personnel.

**Keywords:** Military Simulators, Dynamic Driving Simulator, Infantry Combat Vehicle 8x8 Pandur II, Mine Blast, Numerical Simulation



# Conteúdo

Agradecimentos . . . . .	v
Resumo . . . . .	vii
Abstract . . . . .	ix
Lista de Tabelas . . . . .	xiii
Lista de Figuras . . . . .	xv
Lista de Abreviaturas . . . . .	xvii
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Projeto <i>Pandur Dynamic Driving Simulator</i> . . . . .	2
1.3 Viatura Blindada de Rodas 8x8 Pandur II . . . . .	3
1.3.1 Aparecimento e finalidade . . . . .	3
1.3.2 Versões da viatura . . . . .	4
1.3.3 Características gerais . . . . .	4
1.3.4 Sistemas de Proteção . . . . .	5
1.3.5 Mobilidade . . . . .	6
1.3.6 Resumo das principais características . . . . .	7
1.4 Objetivos . . . . .	7
1.5 Estrutura da dissertação . . . . .	9
<b>2 Enquadramento teórico</b>	<b>11</b>
2.1 Simulação Militar - conceitos e aplicações . . . . .	11
2.1.1 Enquadramento conceptual . . . . .	11
2.1.2 Sistemas de simulação . . . . .	13
2.2 Caracterização da ameaça . . . . .	18
2.3 Estudo de Balística Terminal . . . . .	20
2.3.1 Fenómeno de explosão . . . . .	21
2.3.2 Reflexão de uma onda de explosão num obstáculo rígido . . . . .	22
2.3.3 Modelo empírico para a deflagração de explosivo . . . . .	25
2.4 Fundamentos para a simulação numérica . . . . .	28
2.4.1 <i>Software</i> de modelação e simulação LS-DYNA® . . . . .	29

2.4.2	Revisão bibliográfica . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Simulador de Condução Dinâmica</b>	<b>41</b>
3.1	Descrição do sistema de simulação . . . . .	41
3.2	Plataforma de movimentos no PDDS . . . . .	42
3.2.1	Plataformas <i>Stewart</i> . . . . .	42
3.2.2	Sistema de movimento . . . . .	44
3.3	Integração do evento "Detonação de Minas"no PDDS . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Modelação e Análise Numérica</b>	<b>51</b>
4.1	Estudo da dinâmica da viatura . . . . .	51
4.2	Simulações numéricas . . . . .	54
4.2.1	Sistematização e plano de ensaios . . . . .	54
4.2.2	Viatura de geometria elementar . . . . .	55
4.2.3	Viatura de geometria detalhada . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>61</b>
5.1	Estudo da dinâmica da viatura . . . . .	61
5.2	Simulações Numéricas . . . . .	62
5.2.1	Viatura fixa de geometria elementar . . . . .	62
5.2.2	Viatura livre de geometria elementar . . . . .	63
5.2.3	Viatura livre de geometria detalhada . . . . .	65
5.3	Simulador . . . . .	67
5.4	Discussão . . . . .	68
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>73</b>
6.1	Conclusões . . . . .	73
6.2	Trabalhos Futuros . . . . .	74
	<b>Bibliografia</b>	<b>75</b>
<b>A</b>	<b>VBR 8x8 Pandur II</b>	<b>81</b>
A.1	Características Gerais . . . . .	81
A.2	Níveis de Proteção . . . . .	82
A.3	Material . . . . .	83
<b>B</b>	<b>Simulações numéricas</b>	<b>85</b>
<b>C</b>	<b>Código da simulação numérica</b>	<b>89</b>
<b>D</b>	<b>Implementação do modelo dinâmico em SIMULINK®</b>	<b>95</b>



# Lista de Tabelas

2.1	Fatores de conversão de TNT dos explosivos . . . . .	19
2.2	Sistemas de unidades para valores de referência . . . . .	31
2.3	Pressão em função da distância ao explosivo . . . . .	34
2.4	Comparação de resultados para cada método . . . . .	38
3.1	Características gerais da plataforma eMotion-1500 da REXROTH . . . . .	44
5.1	Valores de massa e principais momentos de inércia no CG da viatura . . . . .	70
5.2	Comparação de resultados para cada fase. . . . .	70
A.1	Características gerais . . . . .	81



# Lista de Figuras

1.1	Cabine e plataforma do <i>Pandur Dynamic Driving Simulator</i> . . . . .	2
1.2	VBR 8x8 Pandur II . . . . .	5
1.3	Dimensões gerais da VBR 8x8 Pandur II . . . . .	6
1.4	Mobilidade garantida da VBR 8x8 Pandur II . . . . .	7
2.1	<i>Top Maneuver Training System</i> . . . . .	14
2.2	Simulador da aeronave Chipmunk . . . . .	15
2.3	Simulador <i>Steel Beasts Pro</i> . . . . .	16
2.4	Simulador de Torre do CC LEOPARD 2E . . . . .	17
2.5	Simulador dinâmico de condução do CC LEOPARD 2E . . . . .	17
2.6	Mina AC Expal C-3 . . . . .	20
2.7	Variação de Pressão em função do tempo à passagem de uma onda de choque . . . . .	21
2.8	Reflexão de uma onda perpendicular a um obstáculo . . . . .	23
2.9	Reflexão regular de uma onda não perpendicular . . . . .	23
2.10	Ondas de explosão refletidas pelo solo . . . . .	24
2.11	Onda de Mach . . . . .	24
2.12	Frentes de ondas de choque consecutivamente reflectidas . . . . .	25
2.13	Modelo para uma mina enterrada no solo . . . . .	27
2.14	Modelo para alvo não horizontal . . . . .	28
2.15	Interface LS-DYNA® <i>Program Manager</i> . . . . .	29
2.16	Interface de criação e edição de <i>keywords</i> . . . . .	30
2.17	Reflexão das ondas de choque numa superfície horizontal . . . . .	32
2.18	Reflexão das ondas de choque numa superfície em "V". . . . .	33
2.19	Dinâmica para a explosão de uma mina sob uma VBL M113 . . . . .	35
2.20	Modelo CAD da viatura M113 . . . . .	36
2.21	Modelo implementado por Larsen <i>et al.</i> . . . . .	36
2.22	Comparação da variação da pressão livre entre o CONWEP e os dados experimentais . . . . .	38
3.1	Interior da VBR Pandur II e interior do simulador . . . . .	42
3.2	Ilustração de uma Plataforma <i>stewart</i> . . . . .	43
3.3	Plataforma dinâmica Rexroth . . . . .	44

3.4	Ilustração do sistema de movimentos no sistema de simulação . . . . .	45
3.5	Pontos de referência da localização do condutor para a plataforma . . . . .	46
3.6	Sistema de eixos da plataforma . . . . .	47
3.7	<i>Motion cueing classical algorithm</i> . . . . .	47
3.8	Ilustração da solução encontrada para a resultante das forças e dos momentos . . . . .	48
3.9	Sistema de eixos utilizados pelo Sistema de Simulação . . . . .	49
4.1	Modelo do sistema mecânico . . . . .	52
4.2	Representação dos fenómenos em análise . . . . .	54
4.3	Modelo de geometria simples e discretização da primeira abordagem . . . . .	56
4.4	Ilustração da suspensão . . . . .	58
4.5	Modelação CAD 3D da viatura e discretização . . . . .	60
5.1	Deslocamento e aceleração vertical do modelo dinâmico da viatura . . . . .	61
5.2	Acelerações angulares do modelo da dinâmica . . . . .	62
5.3	Propagação da onda de choque pelo casco da viatura no primeiro ensaio . . . . .	63
5.4	Propagação da onda de choque pelo casco da viatura no segundo ensaio . . . . .	63
5.5	Deslocamento e aceleração vertical do modelo da primeira fase . . . . .	64
5.6	Deslocamento e aceleração vertical do modelo de geometria elementar, viatura em repouso . . . . .	64
5.7	Curva de pressão . . . . .	65
5.8	Curvas de pressão provocadas pela onda de choque . . . . .	66
5.9	Dinâmica vertical do modelo de geometria detalhada . . . . .	66
5.10	Pressão provocada pela onda de choque no instante inicial . . . . .	67
5.11	Curvas de pressão provocadas pela onda de choque . . . . .	67
5.12	Dinâmica vertical do modelo de geometria detalhada . . . . .	68
5.13	Aceleração linear vertical e angulares para os modelos implementados . . . . .	69
A.1	Níveis de proteção da VBR 8x8 Pandur II . . . . .	82
A.2	Placas ARMOX 500T . . . . .	83
B.1	Propagação da onda de choque para a viatura de geometria elementar livre . . . . .	86
B.2	Propagação da onda de choque para a viatura de geometria detalhada . . . . .	87
D.1	Modelo geral . . . . .	95
D.2	Detalhe do Pneu . . . . .	95

# Lista de Abreviaturas

<b>ALE</b>	<i>Arbitrary Lagrangian Euler.</i>
<b>CC</b>	Carro de Combate.
<b>CG</b>	Centro de Gravidade.
<b>DOF</b>	Graus de Liberdade - <i>Degree of Freedom.</i>
<b>EP</b>	Exército Português.
<b>ETI</b>	Empordef - Tecnologias de Informação, S.A.
<b>FAP</b>	Força Aérea Portuguesa .
<b>GDELS-Steyr</b>	General Dynamics European Land Systems - Steyr
<b>ICV</b>	<i>Infantry Carry Vehicle.</i>
<b>MEF</b>	Método de Elementos Finitos.
<b>MM-ALE</b>	<i>Multi-Material Arbitrary Lagrangian Euler.</i>
<b>MP</b>	Metrelhadora Pesada.
<b>Mina AC</b>	Mina Anti-Carro.
<b>Mina AP</b>	Mina Anti-Pessoal.
<b>NATO</b>	Organização do Tratado do Atlântico Norte (NATO).
<b>PDDS</b>	Pandur Dynamics Driving Simulator.
<b>VBL</b>	Viatura Blindada Ligeira.
<b>VBR PANDUR II</b>	Viatura Blindada de Rodas 8x8 Pandur II.
<b>VBR</b>	Viatura Blindada de Rodas.



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

Os gastos com a formação e treino dos militares são elevados. Uma das soluções encontradas com o avanço da tecnologia é o recurso a meios de realidade virtual e simulação. Estes meios apresentam-se como uma solução pois permitem minimizar a ocorrência de acidentes aumentando a segurança, a redução de consumos energéticos e a diminuição de custos de aquisição e manutenção associados. Hoje em dia verifica-se a necessidade de elevados níveis de formação e treino que, conjugados com custos elevados de aquisição e utilização que caracterizam os sistemas de armas atuais, reforçam a necessidade de utilização de sistemas de simulação que permitam a aquisição de conhecimento baseada num enquadramento tão realista quanto possível [1].

O desenvolvimento de um simulador de condução dinâmica da Viatura Blindada de Rodas 8x8 PANDUR II (VBR Pandur II), destinada ao treino de condutores, visando a formação inicial, manutenção das qualificações e o treino operacional, levou ao Exército Português (EP) a expressar o seu interesse neste tipo de tecnologia, contribuindo-se assim com os seus benefícios à indústria de Defesa Nacional [2].

São, portanto, expectáveis os potenciais benefícios do sistema de simulação anteriormente referido na medida em que a redução de custos com a formação de condutores é substancial face à redução do número de horas necessárias para a formação. Devido ao menor número de horas de utilização das viaturas, esta redução estende-se também às viaturas necessárias ao treino, evitando o seu desgaste, menor consumo em combustível e custos de manutenção associados [1].

O sistema de simulação de condução da VBR PANDUR II desenvolvido pela Empordef - Tecnologias de Informação, S.A. (ETI) é constituído por um conjunto de subsistemas que, quando integrados num Sistema de Sistemas, permitem implementar as funcionalidades de emulação da viatura pretendidas para o simulador. O trabalho desenvolvido nesta dissertação contribui para o projeto *Pandur Dynamic Driving Simulator* (PDDS) na medida em que visa complementar o trabalho já desenvolvido pela ETI: análise dos efeitos produzidos pela detonação de minas anti-carro (AC) sob a viatura, de acordo com o STANAG 4569 [3], pela modelação dos fenómenos físicos correspondentes e respetiva implementação

no módulo de simulação e controlo de realidade virtual no simulador. Parte destes contributos já se encontravam definidos nos requisitos operacionais propostos no caderno de encargos do projeto.

## 1.2 Projeto *Pandur Dynamic Driving Simulator*

O projeto PDDS insere-se num conjunto de projetos denominado *Land Combat Training Simulation Center* (LCTS). Resulta de um total de três operações de contrapartidas contratualizadas com o Estado Português, sendo esta a operação VII-01 [2].

A operação VII-01 materializa-se no projecto PDDS, desenvolvido pela ETI e será entregue pela *General Dynamics European Land Systems - Steyr* (GDELS-Steyr) ao EP. Tem como foco a criação de um simulador dinâmico de condução para as VBR PANDUR II [4]. O projeto PDDS é etapa mais recente e tem em vista alavancar as capacidades nacionais tecnológicas de LCTS. O EP, sendo o cliente final do sistema de simulação dinâmica de condução, que se apresenta na figura 1.1, tem o PDDS instalado no Regimento de Infantaria nº 13 em Vila Real para dar formação de condutores, visando a formação inicial, manutenção das qualificações e o treino na função. Tem em vista a geração de um ambiente de condução virtual o mais próximo da realidade possível. Os instruendos operam dentro de uma cabine com dimensões e disposição dos instrumentos semelhante à da viatura. A cabine está colocada numa plataforma dinâmica que permite transmitir a sensação de movimento contribuindo dessa forma para um ambiente de simulação próxima da realidade [5].

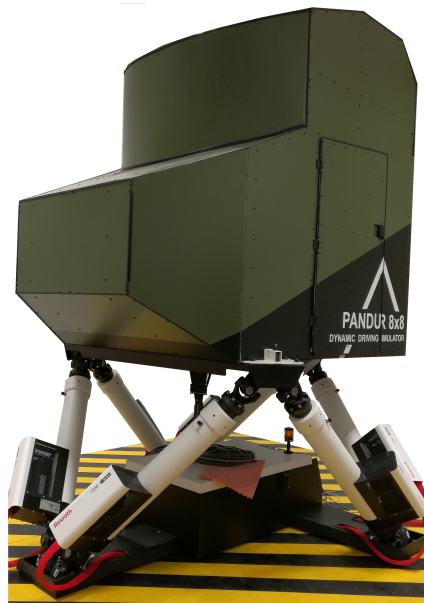


Figura 1.1: Cabine e plataforma do *Pandur Dynamic Driving Simulator*.

A utilização crescente de simuladores é uma tendência generalizada em diversas Forças Militares estrangeiras, tendo por objetivo aumentar a eficácia de treinos e formação [6]. O PDDS tem ainda como objetivos:

- Desenvolver treinos combinados com o já existente simulador TMTS (será abordado mais à frente nesta dissertação);



- Aumentar o nível de segurança aos militares que serão destacados a operar com a viatura VBR Pandur II;
- Reduzir os custos de instrução e treino;
- Reduzir custos de manutenção derivados à falta de experiência de condução dos novos instruídos;
- Garantir uma maior disponibilidade e flexibilidade à formação: em qualquer ambiente, a qualquer altura;
- Reduzir o impacto ambiental, como é o caso da evidente redução de emissão de gases de efeito de estufa (CO<sub>2</sub>).

### **1.3 Viatura Blindada de Rodas 8x8 Pandur II**

Na secção que se segue, é feita referência ao facto de como a viatura aparece no quadro orgânico do EP, as lacunas que pretende colmatar e as unidades que para as quais foi destacada. Apresenta, também, as características, capacidades e limitações da viatura dada a complexidade dos sistemas que a compõem.

#### **1.3.1 Aparecimento e finalidade**

Segundo Gomes [7], o contrato de aquisição foi celebrado em 15 de fevereiro de 2005 entre o Estado Português e a empresa GDELS-Steyr, tendo sido acordado o fornecimento de 240 viaturas, complementado com ações de formação ao nível de utilizadores e de manutenção, manuais de apoio técnico e fornecimento de sobressalentes. O contrato, no montante de 364 milhões de euros, prevê a entrega das viaturas em 11 versões para o Exército, para efeitos de atribuição à Brigada de Intervenção (BrigInt) e 20 viaturas em quatro versões para a Marinha. Uma cláusula no contrato admite ainda a aquisição de mais 33 VBR Pandur II equipadas com uma peça de 105mm, destinadas também ao Exército. Em 31 de Março do ano de 2012, encontravam-se 166 viaturas oficialmente rececionadas, com a garantia contratual acordada com o fabricante a decorrer. A receção definitiva das viaturas só acontecerá no final do período da garantia. Tendo em consideração a componente tecnológica existente nesta viatura enquanto sistema de armas, bem como os seus elevados custos de aquisição associados à atual conjuntura económica, torna-se evidente que o ciclo de vida da mesma, poderá possuir uma duração de cerca de 30 a 40 anos com uma adequada sustentação logística, devendo esta ser ajustada a cada uma das fases em que o equipamento se encontra, por forma a manter níveis de operacionalidade adequados.

”Tendo em consideração a transformação ocorrida no Exército Português de 2007 a 2011, que permitiu dotá-lo de meios bastante evoluídos e em quantidade que carecem de afetação inevitável de recursos de modo a garantir a sua operacionalidade, foram considerados essenciais como programas de transformação, a aquisição de sistemas de armas modernos”[7]. Então, na perspetiva de que o atual

ambiente operacional tornou necessário que as modernas Forças Armadas se encontrem preparadas para atuar em todo o espectro de conflitos atual, nomeadamente o facto de as forças de infantaria ligeira não possuírem a mobilidade, letalidade ou sustentabilidade para uma intervenção armada em oposição a um inimigo mais robusto e, por outro lado, as forças de infantaria pesada não possuem um grau de prontidão imediato numa resposta rápida em caso de crise, especialmente num teatro em que a versatilidade e rapidez de prontidão são necessárias [8], que levou o EP a introduzir no seu quadro orgânico as VBR Pandur II.

### 1.3.2 Versões da viatura

A viatura tem como designação técnica Viatura Blindada de Rodas 8x8 Transporte de Pessoal Pandur II, sendo a ICV a versão em maior número no exército português. Como tal, o PDDS é dedicado esta versão.

A ICV tem como características específicas um reparo para a Metralhadora Pesada (MP) Browning 12.7 [mm] (MP M2HB 12.7 [mm]), figura 1.2. O reparo para a MP operável a partir do exterior da viatura permite, em substituição deste, a montagem da Metralhadora Ligeira HK-21 de calibre 7.62 [mm] e o Lança Granadas Automático Santa Bárbara 40 [mm]. Tem como capacidade o transporte de um total de 10 militares: condutor, apontador mais a restante secção a 8 elementos. As dimensões gerais da VBR Pandur II podem ser observadas na figura 1.3. Contudo para além da versão ICV, existem ainda outras versões, sendo elas:

- RWS, *Radar Warning System*;
- PC, Posto de Comando; PMort, Porta Morteiros;
- Rec, Recuperação e manutenção;
- MEV, Ambulância;
- PMissil, Porta Missil;
- VCB, Vigilância do Campo de Batalha;
- PCanhão 30mm, Porta Canhão 30 [mm];
- Eng, Engenharia;
- Com, Comunicações.

### 1.3.3 Características gerais

Relativamente a características mecânicas da viatura, de acordo com o manual do operador [9], esta possui um sistema de *Automatic Drive Train Management* que consiste num sistema eletrónico que permite à viatura fazer uma seleção automática dos eixos que executam a tração, deixando todos os outros eixos suspensos, possibilitando assim o aumento de eficiência do motor. O sistema de alimentação é



Figura 1.2: VBR 8x8 Pandur II, versão ICV.

do tipo *Common Rail*, equipado com dois depósitos de combustível com capacidades de 350 [l] e um depósito de reserva de 27 [l]. A viatura está dotada de uma caixa automática de 6 velocidades para a frente e para a retaguarda. Possui um sistema de travagem formado por um travão de serviço composto por um sistema hidropneumático de circuito duplo ABS juntamente com um retardador. Este sistema retardador permite um melhor rendimento do motor, pois a travagem desenvolve-se em três fases de desaceleração, viabilizando uma mais fácil recuperação da posterior aceleração do motor. Todo este sistema de travagem é acionado por pressão no pedal de travão, acionando assim os travões de disco ventilados internos às oito rodas. É composto ainda por um travão auxiliar que atua nas rodas dos primeiros e terceiros eixos e um travão de parque, de disco, localizado na caixa de transferência. A suspensão desta viatura é independente, constituído por molas helicoidais no primeiro e segundos eixos e por barras de torção no terceiro e quarto eixos, sendo capacitada por roda de amortecedores hidráulicos e telescópicos. Relativamente aos pneus esta possui um sistema *Central Tire Inflation System*, sistema este que permite a alteração de pressão nos pneus por eixo ao comando do utilizador, isto para possibilitar uma melhor aderência a diferentes tipos de piso. As rodas possuem ainda um sistema de *run-flat*. Um sumário das características aqui apresentadas encontra-se descritas no anexo A.1.

#### 1.3.4 Sistemas de Proteção

O documento 4569 do *Standardization Agreement (STANAG)* [3] é produzido pela *NATO Standardization Agency (NSA)* e tem como objetivo padronizar os níveis de proteção para a guarnição de viaturas blindadas e assegurar que: 1) os comandantes possam tomar a decisão ao nível do equipamento para o cumprimento da missão que melhor se adequa a uma determinada ameaça; 2) as nações tenham um guia de planeamento para empenhar o equipamento apropriado para lidar com as ameaças específicas do teatro de operações; 3) as nações possam desenvolver e melhorar o seu equipamento de acordo

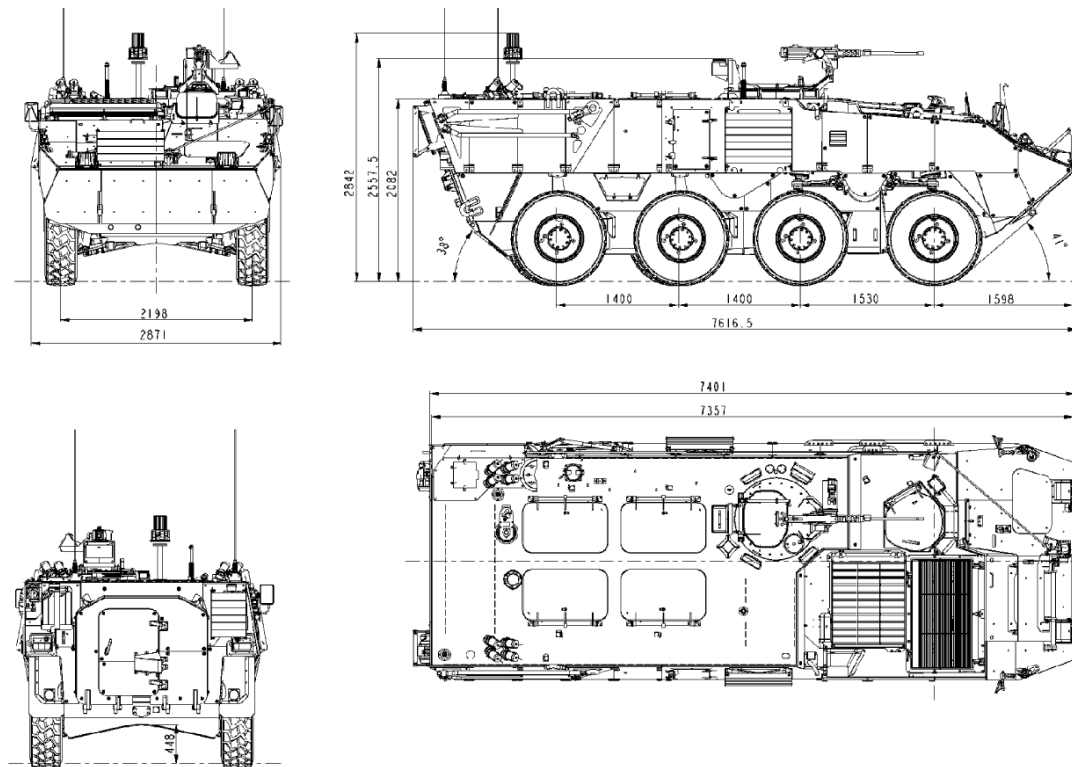


Figura 1.3: Dimensões gerais da VBR 8x8 Pandur II (versão ICV) [10].

com a ameaça. Ao nível das missões com forças combinadas, a adoção da nomenclatura correta para a descrição das viaturas permite garantir interoperabilidade dos meios. As listas de proteção que se encontram no documento são baseadas em 90% de probabilidade de providenciar proteção à guarnição da viatura em caso de ameaça. Deste modo, as designações a atribuir a uma viatura são dadas por ordem crescente de níveis dependendo do tipo de proteção: balísticas, numa escala de um a cinco; anti-carro, numa escala de um a quatro.

A VBR Pandur II, na estrutura do casco, apresenta uma proteção balística para ameaças de nível 1, ou seja, projeteis de calibre 7.62 mm e 5.56 mm, e proteção anti-mina para ameaças de nível 2a, 6 [kg] de massa de explosivo. É dada a possibilidade de reforçar a viatura com proteções do tipo ADD-ON<sup>1</sup> o que aumenta a proteção: balística para os níveis 2, 3 e 4, projeteis de calibre de 7.62 [mm], 12.7 [mm] e 14.5 [mm]; anti-carro para o nível 3a, 8 [kg] de massa de explosivo. No anexo A, encontram-se especificadas com mais detalhe os níveis de proteção da VBR Pandur II. A viatura tem ainda capacidade para fazer face a outro tipo de ameaça, como é o caso Nuclear, Biológica, Química e Radiológica (NBQR), sendo a proteção garantida pelos detetores NBQR e pelo sistema de ventilação da viatura que obriga o ar a passar por um filtro NBQR.

### 1.3.5 Mobilidade

Em termos de mobilidade, figura 1.4, terreno restritivo<sup>2</sup> é atenuado pela redução da distância entre eixos e pelas características do motor, transmissão, plataforma e carroçaria [12]. Estas características

<sup>1</sup>Módulos de blindagem adicionais. A VBR Pandur II possui proteções em placas de aço ARMOX 500T [11].

<sup>2</sup>É o tipo de terreno que impede ou dificulta quase completamente os movimentos de forças ou formações de combate.

na mobilidade são descritas e justificadas com mais detalhe em [10].

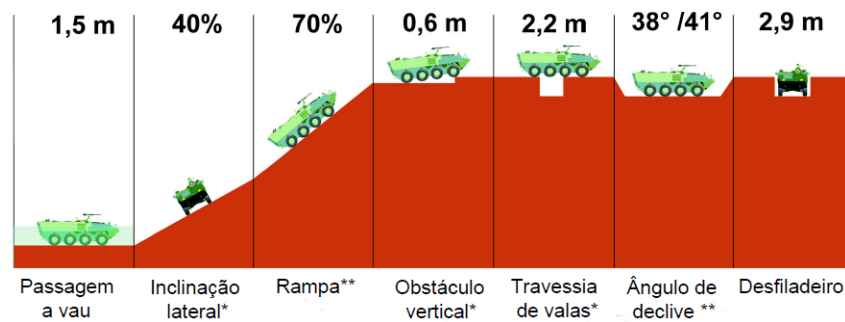


Figura 1.4: Mobilidade garantida da VBR 8x8 Pandur II (versão ICV)[10]

### 1.3.6 Resumo das principais características

Desenhada e projetada pela empresa austríaca GDELS-Steyr esta viatura apresenta as seguintes características:

- Blindagem com placas de aço e cerâmica do tipo ADD-ON;
- A estrutura básica do casco que permite proteção balística para ameaças de nível 1 e proteção anti-mina para ameaças de nível 2a;
- As placas de blindagem (ADD-ON) garantem proteção balística de nível 2, 3 e 4 (munições 14.5 [mm] AP disparadas a 200 [m] e rebentamentos de granadas 155 [mm] a 25 [m]);
- Aerotransportável pela aeronave C-130;
- Suspensões independentes às oito rodas;
- Permite ajuste da pressão dos pneus em movimento;
- Sistema *run-flat* nas rodas.

## 1.4 Objetivos

O tema da presente dissertação de mestrado enquadra-se no projeto PDDS. Para tal, foi estabelecida uma colaboração entre a Academia Militar (AM) e a ETI com o objetivo de suportar a realização da presente dissertação de mestrado. Deste modo, foi assinado um Acordo de Confidencialidade (NDA) entre as partes referidas, considerando que estas aceitam a troca de informação e comprometem-se a tratar a mesma como confidencial.

O trabalho desenvolvido visa caracterizar, modelar os fenómenos físicos correspondentes e analisar os efeitos produzidos pela detonação de minas AC sob a VBR Pandur II, sendo que a massa de explosivo será a equivalente de TNT de acordo com o STANAG 4569 [3]. Tendo em vista o principal objetivo aqui exposto, ou seja, estudo dos princípios físicos associados à interação entre o fenómeno

de explosão de uma carga e o comportamento do corpo (viatura) face a este estímulo, são definidos ainda objetivos específicos para que no final do estudo proposto os resultados obtidos sejam validados e implementados no sistema de simulação PDDS.

Os objetivos específicos são divididos em duas fases, em que numa primeira fase é realizado um estudo preliminar teórico e numa segunda fase segue-se uma análise numérica do problema. De igual forma, para as duas fases, a abordagem ao problema é seguida e guiada por uma revisão bibliográfica dos temas envolvidos: sistemas de simulação, fenómeno de explosão e VBR 8x8 Pandur II.

Na análise teórica do problema, o estudo é conduzido pela elaboração de um modelo de um sistema mecânico traduzido pela viatura, tendo subsistemas a esta agregados. Este é um estudo à dinâmica da viatura com o objetivo de identificar os elementos envolvidos e interpretar a ordem de grandeza de determinados valores inerentes ao trabalho desenvolvido, nomeadamente, valores associados ao deslocamento vertical e angulares no CG da viatura. É demonstrada a abordagem realizada ao problema e uma possível solução teórica. Recorre-se à ferramenta computacional MATLAB<sup>®</sup>, nomeadamente o SIMULINK<sup>®</sup>, para se obter os resultados pretendidos nesta primeira abordagem.

Na análise numérica, procura-se implementar uma simulação computacional do problema aplicando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Nesta fase, com base num modelo em CAD da viatura e respetivos elementos que a constituem, é construído um modelo virtual do problema. Procura-se recorrer às potencialidades que as simulações numéricas podem oferecer, ou seja, um estudo mais aproximado à realidade sem que se recorra aos elementos reais que constituem o problema, pois estes são de tal ordem dispendiosos que encarecem o estudo que se pretende. Computacionalmente, esta análise é feita recorrendo à ferramenta LS-DYNA<sup>®</sup>.

Com o objetivo de se dividir a abordagem ao problema em passos sucessivos, sendo esta a metodologia seguida, Showichen [13] propõe que o estudo científico dedicado à análise e avaliação de proteções das viaturas contra minas se divida nas seguintes áreas:

1. Avaliação da ameaça;
2. Avaliação da carga explosiva;
3. Resposta ou comportamento da viatura;

A tecnologia moderna permite a construção de proteções tendo em conta um dimensionamento do formato, geometria e configuração das viaturas conjugado com novos materiais. Contudo, o projeto deste tipo de proteções pode ser dispendioso tanto ao nível monetário como temporal devido a testes e experiências que encarecem o produto final. Análises numéricas são uma ferramenta que se revelou eficiente na medida em que reduz o número de experiências necessárias. Após um processo de validação, as simulações numéricas permitem conceber novos cenários com estudos paramétricos para diferentes parâmetros físicos [13].

Neste sentido e por forma a realizar-se uma simulação numérica sem recorrer a teste numa escala real, é necessário:

1. Realizar-se uma revisão bibliográfica sobre as minas, ao nível da sua natureza e magnitude da ameaça que representam;
2. Construção de um modelo numérico do problema;
3. Avaliar os efeitos para os diferentes casos, minas (carga explosiva) e viaturas (geometria).

Após a realização do estudo exposto nos parágrafos anteriores, chega-se ao objetivo final: implementação dos resultados obtidos no PDDS.

## 1.5 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em 6 capítulos.

No capítulo 2, é elaborado um enquadramento teórico tendo em vista uma exposição dos temas envolvidos nesta dissertação. Sendo estes: conceitos associados à simulação militar, detonação de explosivos (minas) e os fundamentos para as simulações numéricas.

No capítulo 3, aborda-se o projeto de desenvolvimento do PDDS do ponto de vista técnico, apresenta-se uma revisão a cerca do que são as plataformas de movimento do tipo *stewart* e enquadra-se o trabalho aqui desenvolvido na arquitetura do sistema de simulação.

No capítulo 4, são apresentadas duas secções. Na primeira, é apresentada uma modelação teórica da dinâmica vertical da viatura. Sendo um estudo que passa, portanto, pela formulação de um problema de modelação de um sistema mecânico de modo a identificarem-se os elementos envolvidos na dinâmica da viatura. Na segunda secção, descreve-se a metodologia implementada nas simulações numéricas.

No capítulo 5, são ilustrados os resultados obtidos no capítulo anterior seguida de uma discussão desses mesmos resultados, de modo a justificar a implementação dos mesmo no simulador.

No capítulo 6, apresentam-se as conclusões retiradas do desenvolvimento desta dissertação. São, também, propostos trabalhos futuros de modo a dar continuidade ao trabalho desenvolvido.





## Capítulo 2

# Enquadramento teórico

O presente capítulo tem como finalidade enquadrar os temas envolvidos neste trabalho.

Inicia com um enquadramento conceptualmente dos termos associados à simulação militar, sendo expostos os sistemas de simulação existentes.

Pretende-se apresentar a viatura em estudo, assim, no seguimento do capítulo anterior, é realizada uma caracterização das minas enquanto ameaça para as VBR Pandur II.

O estudo dos fenómenos associados ao rebentamento de minas é enquadrado do ponto de vista da Balística. Com o intuito de se fundamentar as simulações numéricas realizadas neste trabalho, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre simulações numéricas realizadas anteriormente e apresentadas em artigos científicos publicados em atas de conferências ou nas demais revistas científicas.

## 2.1 Simulação Militar - conceitos e aplicações

### 2.1.1 Enquadramento conceptual

O conceito "Simulação" é utilizado numa multiplicidade de aplicações de atividade humana, levando a que seja necessário enquadrar o termo para o assunto que é tratado nesta dissertação. Dos vários ramos a que o conceito Simulação pode abranger, um deles é o de Simulação Militar. É então neste contexto, de modo a seguir-se uma terminologia conceptual coerente, que se apresentam nos parágrafos seguintes as definições adotadas pela Política de Simulação para o Exército [14], sendo provenientes da terminologia da Organização do Tratado do Atlântico Norte (NATO).

De acordo com a Diretiva Nº170 do CEME de 2009 [14], em termos gerais, Simulação "é uma representação dinâmica das condições de operação de um sistema real. A simulação usa modelos dinâmicos de ambientes reais e equipamentos para qualificar os recursos humanos na aquisição e prática de tarefas/competências, conhecimentos e atitudes".

O conceito de Simulador é definido como "um dispositivo que imita o comportamento dinâmico de um sistema real. O simulador pretende induzir os formandos a responder como no sistema real, em ordem a promover a aquisição e prática de tarefas/competências, conhecimentos e atitudes"[14].

Alguns países da NATO começam a adotar o termo de Modelação & Simulação dado que segundo a mesma diretiva, é afirmado que "a simulação é também vista como o método para a implementação de um modelo ao longo do tempo". Importa definir, então, o que é modelação: "é, portanto, a base da criação dum sistema de simulação, que deve consistir na seleção dos aspetos que interferem na condução de uma operação ou atividade e que devem ser, por isso, variáveis do modelo de representação pretendido"[14].

A necessidade dos exércitos possuírem nas suas fileiras militares altamente qualificados não é uma preocupação apenas dos dias hoje, apesar da evolução do pensamento e do conhecimento, existem registos de que ao longo da história a simulação militar foi um recurso para que os comandantes daqueles exércitos treinassem o seu pensamento tático e das suas tropas [15], mas também sempre foi sentida a impossibilidade de conduzir um treino intensivo em condições iguais à realidade. Surgiu assim uma contínua procura de se recorrer a métodos alternativos para conjugar estas duas evidências, tanto quanto possível, conferir ao treino maior realismo, de forma a que todos os constituintes de uma unidade estejam rotinados nas funções que devem desempenhar em operações [16]. Existem exemplos disso tal como os *plastrons*<sup>1</sup> com convenções de exercício, os jogos de guerra, os redutores de calibre, os teatros de treino de tiro, caixas de areia, etc. Países com maiores recursos começaram desde cedo a diminuir tais limitações provenientes da necessidade de otimizar desempenhos por oposição à falta de realismo no treino, através da utilização de processos tecnologicamente avançados para imitar situações e as atividades inerentes à sua missão. É notório nos dias de hoje, referido em [17], que qualquer área de atividade militar é passível de emprego de um sistema de simulação como ferramenta de instrução e treino e cada vez mais com elevado realismo dado o evoluir da tecnologia, nomeadamente pelo desenvolvimento que se verifica ao nível de tecnologia gráfica tridimensional auxiliada pela evolução de *software*, como é o caso dos jogos de computador, e pela evolução do *hardware*, como é o caso dos processadores gráficos. Verifica-se assim uma clara evolução ao longo do tempo dos sistemas de realidade virtual.

Existem várias áreas de emprego de sistemas de simulação militar, de um modo geral, poderão ser instrução e treino de condução, tiro, manutenção e mecânica ou simuladores de guerra eletrónica, tanto ao nível técnico como tático. Caetano [17] refere ainda três categorias de simuladores: "real", como sendo os sistemas de simulação com utilização de pessoal e material nos quais são recriadas com meios alternativos a realidade; "virtual", nos quais a simulação é feita com recurso ao meio virtual em suporte computacional no qual são utilizados réplicas dos meios operacionais; "construtiva", onde o sistema de simulação é composto por uma Inteligência Artificial (AI) que opera determinados sistemas simulados nos quais o utilizador não influencia directamente todos os resultados em consequência de decisões tomadas, este é um tipo de simulação geralmente ligado a gestão de recursos. Segundo a Política de Simulação Do Exército Português [14] são ainda definidos três níveis de simulação consoante a área de instrução ou treino a que se destinam, ou seja, quanto maior o nível maior o escalão da unidade que pode variar de Pelotão até Corpo de Exército. Como literatura complementar e análise mais profunda ao nível de conceitos, classificação e políticas pode ler-se [15, 16, 18, 19].

---

<sup>1</sup>Designação atribuída a uma recriação de uma determinada situação, normalmente aplicada quando se pretende exemplificar determinados procedimentos a uma escala menor do que a realidade.

## 2.1.2 Sistemas de simulação

Após um enquadramento teórico daquilo que é um Sistema de Simulação, mais precisamente, a Simulação Militar, são expostas nos parágrafos seguintes algumas aplicações e sistemas existentes nos dias de hoje nesta área de aplicação, tanto no contexto nacional como internacional.

### Contexto nacional

Relativamente a Sistemas de Simulação já existentes em Portugal e, nomeadamente, nas Forças Armadas Portuguesas, existem alguns exemplos.

O EP possui, na Academia Militar, um simulador estratégico de sala denominado de TACPOS, destinando-se à aplicação prática de conhecimento adquirido durante os vários cursos existentes nesta instituição, nomeadamente conceitos e princípios de tática da respetiva arma ou serviço e ainda o treino de procedimentos de comunicação entre os vários escalões hierárquicos. É um sistema da categoria dos simuladores táticos de sala de combate com unidades mecanizadas e pessoal apeado, sendo as viaturas representadas de origem americana, canadiana e neozelandesa. Não é operado em tempo real, mas sim por turnos. Em cada turno, o aluno que é nomeado para desempenhar funções de comando num determinado escalão, terá de tomar decisões conforme o desenrolar da ação. Entre outros países utilizadores, o simulador é uma adaptação dos Estados Unidos da América (EUA) de um jogo de estratégia comercial para o treino de militares [20].

Situado em Vila Real, no Regimento de Infantaria número 13 (RI13), o EP já possui um sistema de simulação da categoria dos simuladores táticos de sala para as VBR Pandur II também desenvolvido pela ETI. O simulador é designado de *Top Maneuver Training System* (TMTS), figura 2.1, tendo o EP ao seu dispor quatro simuladores totalmente modelados à viatura com as posições do chefe de viatura, apontador e condutor, estas posições são simuladas por réplicas em ambiente virtual. Tem como principal objetivo o treino de procedimentos de manobra tática viatura, procedimentos específicos, aquisição do alvo e tiro para a torre SP-30<sup>2</sup>. Ao nível da arquitetura, este simulador é composto por computadores de alto desempenho possuindo réplicas dos controladores do chefe de viatura e apontador. Faz parte do sistema também uma estação operacional de instrutor melhorada que integra o planeamento da missão, controladores do instrutor, coordenação tática, edição de cenários, revisão após a ação e controladores para as condições do simulador. Ao nível do sistema de áudio, é composto por um sistema de alta fiabilidade e com sistema de intercomunicação configurada desde o nível pelotão até superior. Possui um sistema visual de baixo custo mas com um editor detalhado da base de dados da área de operação.

No caso da Força Aérea Portuguesa (FAP), a Simulação é uma ferramenta essencial de instrução. Para o Piloto Aviador (PILAV) poder cumprir horas de voo tornou-se indispensável a sua execução em simuladores. As mesmas razões que são aplicáveis para o caso do projeto PDDS ao nível da formação e treino o risco de insucesso e de insegurança seria muito elevado no caso de serem realizados nas ae-

---

<sup>2</sup>A torre SP-30, de fabrico austríaco (pela GDELS-Steyr), é uma torre operada por dois militares e é composta por um canhão de 30mm, como arma principal, e uma ML de calibre 7.62 mm, como arma auxiliar. Faz parte da versão PCanhão 30mm da VBR Pandur II.



(a) Militares em exercício, fotografia retirada de brochuras da ETI



(b) Replica de um manobrador de tiro do canhão 30mm

Figura 2.1: Simulador de sala *Top Maneuver Training System*.

ronaves. Oliveira [21] afirma que "a simulação, nomeadamente a simulação do voo, constituindo um tipo particular de animação, presta-se à transmissão de conceitos relacionados com uma realidade física, na qual os fenómenos mecânicos e aerodinâmicos, são de difícil explicação por palavras e mesmo por imagens estáticas ou diagramas". Ainda o facto de os meios aeronáuticos serem muito onerosos de aquisição, cuja manutenção e consumos energéticos terem também custos associados consideravelmente elevados, leva a que a Simulação de voo seja uma solução para se obter a qualificação exigida no emprego dos meios operacionais da FAP.

Ao nível dos meios, a FAP possui simulador de voo da aeronave Alfa-Jet, simulador de procedimentos e de voo da Aeronave Épsilon, Simulador de voo do F16 M2 e outros. Relativamente ao F16 M2, recentemente, este simulador sofreu uma modernização do sistema visual, consistindo: 1) substituição dos sistemas de geração de imagem e projetor por novos de nova geração. 2) Fornecimento de base de dados *Visual Flight Rules* de Portugal Continental; 3) fornecimento de modelos 3D específicos para uso no simulador. O simulador é usado pela FAP para dar formação inicial aos PILAV e manter a qualificações dos mesmos. Consiste numa replica do *cockpit* F16 (versão M2) e na simulação da aeronave, dos seus sistemas primários e secundários, sistemas de combate e simulação de armamento. Inclui entidades virtuais que permitem o treino de operações de combate ar-ar e ar-terra. Permite ainda o treino de situações de emergência e procedimentos de reabastecimento em voo.

A FAP dispõe ainda de um sistema de simulação estático para as aeronaves De Havilland Chipmunk Mk.20, figura 2.2. Esta ferramenta de simulação foi desenvolvida pelo Centro de Investigação da Academia da Força Aérea e tem como principal finalidade a formação e instrução dos alunos do ciclo de estudo conducente ao grau mestre em pilotagem, permitindo que estes se familiarizarem no solo com a aeronave [22].

O referido sistema nasceu de uma dissertação de mestrado em pilotagem aeronáutica que consistiu na modelação dinâmica do comportamento da aeronave com recurso ao *software X-plane™* e com desenvolvimento e construção de um *mock up* físico de simulação, figura 2.2(b). Dado o sucesso do projeto, o Centro de Investigação da Academia da Força Aérea deu continuidade ao projeto através da

implantação do sistema de simulação na fuselagem de uma aeronave Chipmunk, figura 2.2(c).

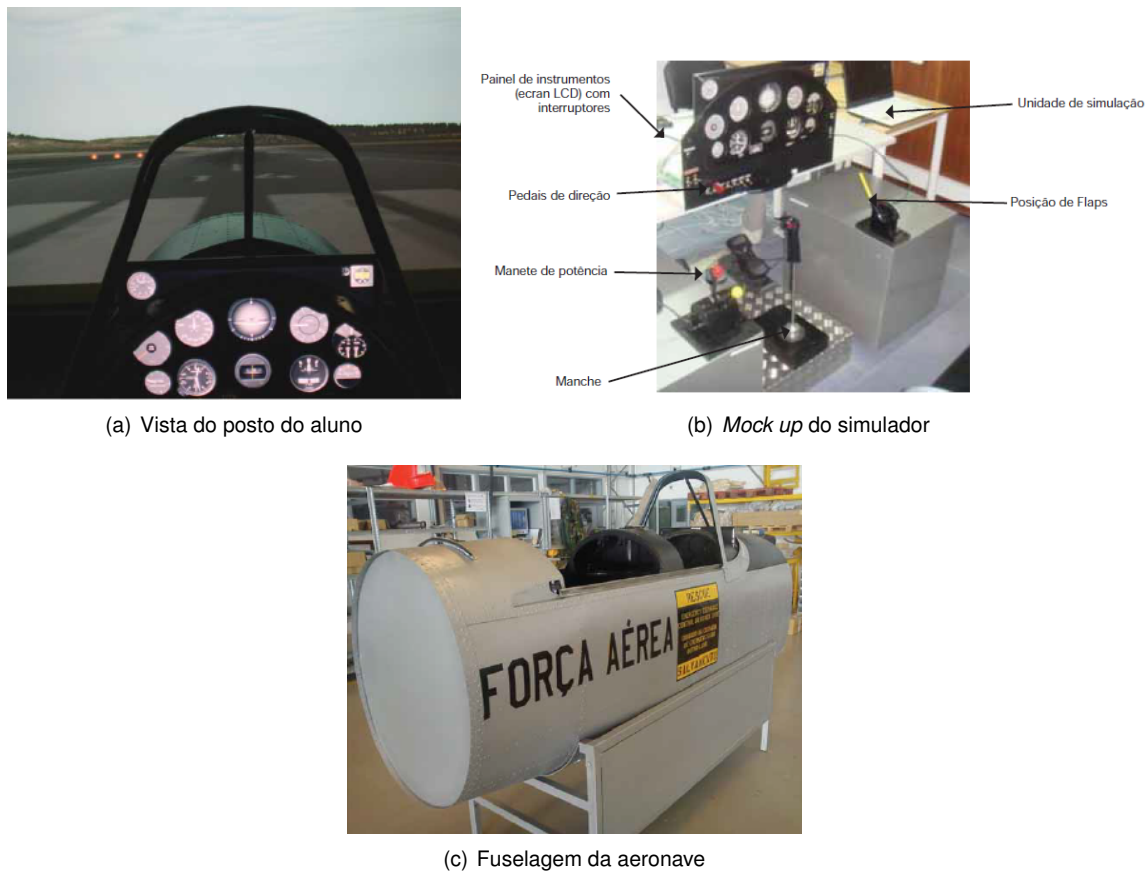


Figura 2.2: Simulador estático da aeronave Chipmunk [22].

A Marinha Portuguesa possui também vários meios de simulação, encontrando-se no Centro Integrado de Treino e Avaliação Naval (CITAN) [23]. Este é um órgão em que a sua missão principal é o planeamento e condução do treino, avaliação e aprontamento das unidades operacionais daquele ramo das Forças Armadas. Nos parágrafos seguintes, ao nível dos meios operacionais, são dados alguns exemplos:

O *Action Speed Tactical Trainer*, de ação tática constituído por uma unidade de comando e 12 cubículos, cada um simulando uma unidade operacional, de superfície, submarina ou aérea. Na simulação inclui panorama, comunicações, armas e sensores. Permite treinar a decisão tática em cenários de conflito multi-ameaça, assim como treinar as equipas dos centros de operações nas suas diversas ações a nível tático.

Como réplica do sistema de comando e controlo das fragatas da classe Vasco da Gama, a Marinha Portuguesa possui o *Command Team Trainer*. Este simulador encontra-se associado a um simulador *Ferranti*, que simula os sensores do navio e cria cenários táticos. Ainda para as fragatas da classe referida, o *Maritime Command, Control and Information System* é uma réplica do sistemas destas fragatas assim como dos comandos em terra, sendo utilizada na formação de operadores, gestores e administradores do sistema.

O simulador mais moderno do CITAN, o Simulador de Navegação e Manobra (SIMNAV) permite o

treino de equipas de navegação com e sem visibilidade, manobras de atracação, largada, evoluções em formatura, reabastecimento no mar e salvamento marítimo. Permite a simulação de qualquer navio e dispõe de bases de dados visuais e radar da costa portuguesa e de outras partes do mundo. Possui a simulação da ponte de uma fragata e panorama exterior de 270°, além de outras duas pontes secundárias de menores dimensões, 120°. Na Escola Naval encontra-se outro polo do SIMNAV, com quatro pontes secundárias (120°), sendo que os dois polos estão ligados em rede.

### Alguns exemplos de sistemas de simulação internacionais

Mais próximo da realidade, comparativamente ao TACPOS, o *Steel Beasts Pro*, figura 2.3<sup>3</sup>, é um simulador veicular virtual a duas e três dimensões baseado em aplicações comerciais de uso militar, utilizado para treino de operações de combate simulado desde reação a incidentes reais como o planeamento de operações. É constituído por um computador e teclado ou comandos adaptados a cada viatura, permite a instrução e o treino desde o nível tático ao nível técnico para a tripulação das viaturas, no qual permite o emprego de uma grande variedade de viaturas e equipamentos. Pode ser utilizado para o treino de procedimentos rádio, visualização do interior das respetivas viaturas, e condução das mesmas. Este é um simulador também utilizado por vários países, tais como Alemanha, Espanha, Canadá, Austrália, Chile, entre outros.



Figura 2.3: Simulador *Steel Beasts Pro* do Exército Espanhol<sup>3</sup>.

O Exército Espanhol possui um conjunto de simuladores para o seu Carro de Combate (CC) mais recente, o CC LEOPARD 2E. Sendo o "Simulador de Torre", figura 2.4, um sistema que permite o treino e instrução do chefe de carro, do apontador e do municionador, permite simular as tarefas e missões de uma torre real: cumprimento dos tempos de rotação a 360°; ângulos de tiro; sistema Leopard Information Control Equipment; avarias; sons no interior e no exterior e visualização do campo de batalha virtual.

Ainda para o mesmo CC, ao nível dos Simuladores Dinâmicos de Condução, O Exército Espanhol possui o "Simulador de Condução"(SCO), figura 2.5. É um sistema que permite a simulação do movimento do CC tendo em conta as condições do terreno. A dinâmica do simulador é assegurada por uma plataforma de movimento com seis graus de liberdade (DOF). Para além desta potencialidade, possibilita a condução de escotilha fechada sendo o treino da condução com periscópio, incluindo o de visão

<sup>3</sup>Fotografias e informação sobre os meios de simulação do Exército Espanhol foram cedidos pelo Tenente-Coronel de Artilharia João Guilhermino Fernandes Chefe do Núcleo de Simulação Construtiva e Postos de Comando. Trata-se de informação partilhada no âmbito do encontro bilateral entre o Exército Espanhol e o Exército Português que ocorreu em maio de 2016.



Figura 2.4: Simulador de Torre do CC LEOPARD 2E [15]

noturna, possibilita também a condução de escotilha aberta no qual o sistema visual é composto pela projeção de imagem em três telas. Permite a simulação do sistema de comunicações, existe também um sistema que simula os sons do interior e do exterior da viatura. O SCO é ainda composto por um posto de instrutor.

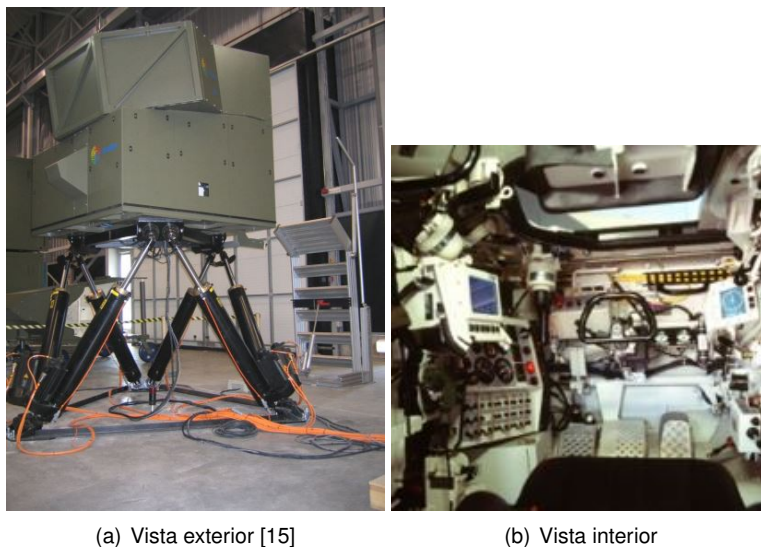


Figura 2.5: Simulador dinâmico de condução do CC LEOPARD 2E do Exército Espanhol<sup>3</sup>.

O exército Austríaco possui um sistema de simulação designado por ULAN CBCT, para o treino da guarnição do Viatura de Combate de Infantaria (VCI) Ulan<sup>4</sup> ao nível de procedimentos de tiro, manobra e tática. Os tipos de treino que este simulador permite são: treino de procedimentos, aquisição do alvo e tiro para torre SP-30; combate contra unidades blindadas e infantaria; treino de manobras táticas ao nível pelotão; treino de gestão de recursos da guarnição; operação dos diferentes sistemas de visão, noturna e térmica; lançamento de granadas de fumos. Ao nível da arquitetura, o sistema de simulação é composto por um *mockup* da torre SP-30 com as posições do chefe de viatura e atirador, na qual se encontra a tripulação num espaço fechado com réplicas do equipamento principal e controladores reais da torre, permitindo a imersão no ambiente de simulação. Este envolvimento no ambiente de simulação é incrementado pela simulação de tropa apeada, da balística precisa e modelação de danificação.

<sup>4</sup>Ulan é a versão austríaca da VCI da família das viaturas blindadas da *Austrian Spanish Cooperation Development* (ASCOB)



Existe ainda uma estação operacional de instrutor que integra o planeamento da missão, controladores do instrutor, coordenação tática, edição de cenários, revisão após a ação e controladores para as condições do simulador. Este sistema é acompanhado de um sistema de áudio de alta fiabilidade e com sistema de intercomunicação configurada desde o nível pelotão até superior. O sistema visual é de baixo custo mas com um editor detalhado da base de dados da área de jogo.

## 2.2 Caracterização da ameaça

O tipo de ameaça a que uma viatura blindada se encontra sujeita varia conforme o teatro de operações em que esta se encontra. Essa ameaça é materializada pelas armas ou sistemas de armas que as forças opositoras possuem. De uma forma geral serão projeteis de energia cinética ou com cargas de efeito dirigido que poderão ser disparados por tiro tenso a partir de CC ou outras viaturas ligeiras, Canhões de 30mm/40mm ou MP (por exemplo desde calibre 12.7mm a 14.5mm) ou ainda disparadas por tiro indireto como é o caso da artilharia. Existem ainda outros tipos de ameaça como por exemplo mísseis, lança granadas foguete (RPG<sup>5</sup>), minas AC ou engenhos explosivos improvisados (IEDs<sup>6</sup>).

Note-se que as armas acima referidas são armas convencionais. Embora possuam também capacidades para causar dano significativo à vida e a bens materiais, são classificadas como sendo armas que não causam destruição em larga escala ou em massa por oposição a armas nucleares, biológicas ou químicas, [24]. Fazem parte das armas convencionais as minas terrestres, bombas, misseis balísticos, etc. Ao nível dos explosivos, a ameaça que estas armas representam é definida pela massa de explosivo que possuem e pela distância a que detonam.

A massa de explosivo dada em quilogramas de explosivo TNT é universalmente tida como referência e tem o objetivo de comparação dos efeitos provocados pelos diferentes explosivos. Podem-se encontrar alguns métodos na literatura. Contudo, relacionar diferentes explosivos com TNT pode não ser uma medida exata devido à variação que existe nos parâmetros de uma onda de choque numa explosão. Medir a energia libertada durante uma explosão é de igual forma difícil, devido à violenta libertação de energia. Showichen [13] descreve dois desses métodos existentes: 1) utilizando fatores de conversão de TNT baseados na energia específica dos explosivos, tabela 2.1; 2) recorrendo a dois fatores de conversão do *US Department of the Army* [25], em que a escolha depende do facto de se o pico de sobre-pressão ou o impulso provocado pelos explosivos poderem ser equiparados.

---

<sup>5</sup> *Rocket-Propelled Grenade*

<sup>6</sup> *Improvised Explosive Devices*



Devido aos seus efeitos é conhecido o elevado grau de ameaça que representa a detonação de minas, sejam elas anti-pessoal ou anti-carro, e IEDs. Estes efeitos podem ser devastadores não só pelos danos causados às viaturas mas pelas lesões ou até a morte dos seus ocupantes, o que leva a outros efeitos: desmoralização das forças, atraso de todo um planeamento ou execução de uma determinada operação. São então necessárias medidas táticas e técnicas como forma de conferir proteção à viatura de modo a garantir a sua sobrevivência no campo de batalha. Como tal e do ponto de vista técnico, este problema levou a que se projetassem proteções específicas nas viaturas para este tipo de ameaças. Uma geometria apropriada para o casco, uma suspensão concebida de maneira a sustentar cargas dinâmicas externas e até sistemas que permitam a segurança, ativa ou passiva, do equipamento que se encontra dentro da viatura [26, 13].

Tabela 2.1: Fatores de conversão de TNT baseados na energia específica dos explosivos [13]

Explosivo	Fator de conversão de TNT
Trinitrotolueno (TNT)	1.000
Composição B	1.148
Pentolite	1.129
Tetranitrato de pentaeritritol (PETN)	1.282
Ácido Picrico	0.926
<i>Research Department Formula X (RDX)</i>	1.185
Tetril	1.000
Torpex	1.667

### O que são minas e o seu mecanismo

De acordo com Santos [27], as minas são engenhos explosivos que têm por objetivo causar danos ou outros efeitos sobre o seu alvo, estando destinados a causar baixas, destruir viaturas, danificar embarcações e evitar, canalizar ou retardar o avanço de forças inimigas. Podem ser classificadas quanto: ao corpo da mina, normalmente metálicas mas podem ser feitas de um polímero; de acordo com a sua forma ou geometria geral; à sua carga principal, explosivas, incendiárias ou químicas; à sua ação iniciadora, podendo ser controladas, contacto, influência ou autodestruição; ou ainda conforme o seu emprego ou finalidade: anti-pessoal (AP), anti-carro (AC), entre outras. Podem ser associadas a armadilhas ou disseminados em rotas marítimas. Geralmente são detonadas por ação involuntária do alvo (ação iniciadora), mas também podem ser por proximidade deste ou por controlo remoto. As minas são geralmente compostas por: um mecanismo de fogo, podendo ser uma espoleta, disparador ou outro dispositivo que faça explodir um detonador ou carga iniciadora; detonador ou carga explosiva que inicie a cadeia de fogo; uma carga reforçadora, podendo fazer parte da espoleta, carga iniciadora ou carga principal; carga principal, que normalmente constitui o corpo da mina; corpo da mina, no qual ficam alojados todos os componentes desta no seu interior. A figura 2.6 ilustra os componentes gerais de uma mina.

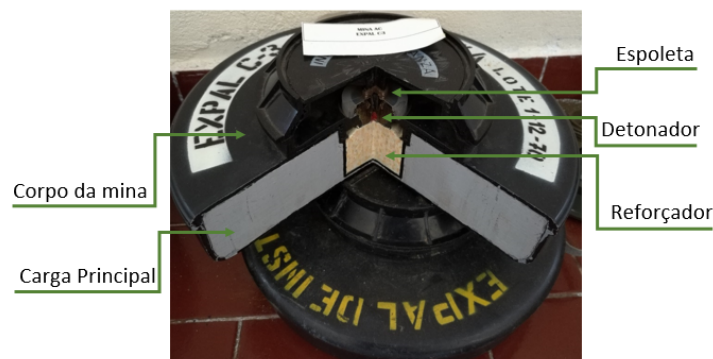


Figura 2.6: Mina AC Expal C-3

## 2.3 Estudo de Balística Terminal

A Balística é uma ciência multidisciplinar que envolve a aplicação de outras áreas de conhecimento, desde mecânica aplicada e mecânica dos fluídos como a química no estudo de deflagração das pólvoras. É, portanto, a ciência que estuda os fenômenos que envolvem e influenciam o comportamento cinemático e dinâmico de projéteis, desde a sua posição inicial dentro da câmara de combustão das armas até à sua atuação sobre um alvo que se pretende atingir. A Balística é composta por três grandes áreas<sup>7</sup> a balística interna, a balística externa e a balística terminal [28].

O estudo da Balística Interna está ligado à interação entre a arma, a munição ou apenas o projétil e a carga propulsora ( por exemplo a pólvora) enquanto os fenômenos ocorrem dentro da arma, ou seja, desde o momento em que o projétil se encontra em repouso e se dá deflagração da carga propulsora e o movimento do mesmo até ao momento que este sai do cano da arma. Balística Externa é a área que estuda os fenômenos que o correm desde o momento em que o projétil sai do cano da arma, nomeadamente as forças que atuam no projétil durante o seu trajeto na atmosfera, até ao momento em que este embate no alvo.

Em termos gerais, o objetivo do disparo de um projétil é o de acertar num determinado alvo. A Balística Terminal estuda os eventos que ocorrem assim que o projétil atinge o seu alvo, sendo os efeitos produzidos neste, entre outros fenômenos, que são tidos em consideração e são as ferramentas do estudo da balística terminal. Existe uma ampla variedade de tais fenômenos terminais, como a sua penetração, propagação da onda de choque no material que compõe o alvo, os próprios efeitos causados na trajetória do projétil, fragmentação do corpo do projétil por meio de uma carga explosiva, etc. Faz também parte destes fenômenos, no qual se foca este trabalho, o estudo do rebentamento do alvo pela energia libertada da carga explosiva que o projétil transporta. O objeto de estudo desta dissertação encontra-se balizado pelo exposto na secção 1.4, ou seja, embora não seja do interesse desta dissertação analisar especificamente o rebentamento do alvo, faz parte desta análise os fenômenos provocados por uma carga explosiva, nomeadamente, por meio de uma mina.

<sup>7</sup>Alguns autores defendem uma quarta área da balística, a Balística Intermédia. Esta área é por vezes colocada em conjunto com a Balística interna, no entanto, defini-se como sendo aquela que estuda os fenômenos que ocorrem desde que o projétil sai do cano da arma até ao momento em que deixa de estar influenciado pelos gases remanescentes à boca do cano.

### 2.3.1 Fenómeno de explosão

Explosivo é uma substancia, ou mistura de substâncias químicas, suscetível de sofrer uma transformação química realizada num intervalo de tempo muito curto e no decorrer do qual é produzido uma e grande libertação de energia, geralmente acompanhada por elevadas temperaturas e produção de um elevado volume de gases, definido-se este fenómeno como explosão [29]. Segundo Showichen [13], existem duas grandes categorias de explosivos classificados pela sua forma de detonação: no caso de *Low Explosives* a propagação da explosão é iniciada pelo aumento suficiente da temperatura do meio envolvente; no caso de *High Explosives* a energia que faz este material detonar provem de uma onda de choque.

A rápida expansão de gases causa um pico de pressão no meio, iniciando-se assim a propagação de uma onda de choque na direção contrária à fonte, com uma velocidade tipicamente supersónica [24]. Esta propagação é devida ao facto do meio que ainda não foi perturbado, próximo da frente da onda de choque, se manter a uma pressão ambiente, sendo a pressão mesmo atrás da onda de choque mais elevada, denominada de sobrepressão, a onda de choque é levada assim para o sentido contrário à da fonte. No entanto, muito próximo da descontinuidade a pressão diminui até valores inferiores aos da pressão ambiente. Este processo é representado na figura 2.7, observando-se um aumento de pressão instantâneo seguido de uma diminuição ao longo do tempo, fase positiva, quando se dá a rarefação do meio a pressão diminui para valores inferiores à pressão atmosférica, fase negativa.



Figura 2.7: Variação de Pressão em função do tempo à passagem de uma onda de choque, adaptado de [24].

O estado do meio aquando da passagem da onda de choque torna-se descontínuo, sendo este estado descrito pela pressão, temperatura, densidade e velocidade. Pela conservação de massa, momento e energia é possível descrever o estado do meio, sólido ou fluido, antes e depois da passagem da onda de choque: equações de Rankine-Hugoniot [28]. Estas equações traduzem uma curva empírica, ou curva de Hugoniot, que relaciona duas de qualquer uma das variáveis: Pressão  $p$ , velocidade de propagação da onda de choque  $U$ , velocidade da partícula  $u$ , volume específico  $v$  ou densidade  $\rho$ .

Nos parágrafos seguintes é feita uma revisão bibliográfica aos fenómenos associados à propagação da onda de choque que aqui foi referida. Esta revisão tem como por objetivo compreender as variáveis

existentes na implementação do modelo numérico pretendido, exposto na secção 4.2.

### 2.3.2 Reflexão de uma onda de explosão num obstáculo rígido

Numa implementação numérica feita por Barnat [30], este pressupõe que uma formulação geral do fenómeno de propagação de ondas de choque num meio contínuo provocadas por uma explosão é considerar uma fonte que se encontra num ponto do espaço, gera uma onda de choque que se propaga num fluido e interage com um objeto ou obstáculo. Um exemplo desta interação é a reflexão da onda de choque na fronteira entre o ar e o solo, este exemplo será abordado novamente nas secções seguintes.

A análise do fenómeno em causa é feita com base em algumas simplificações, tais como:

1. A onda de choque é considerada como sendo plana (não curva), caracterizada por um vetor normal;
2. O elemento de construção é considerado rígido e plano (não curvo);
3. Trata-se de um problema estacionário no qual as superfícies de descontinuidades constituem planos e o fluxo numa área limitada por estas descontinuidades é homogénea.

O problema em causa é ainda dividido em quatro momentos distintos, nomeadamente:

- Reflexão de uma onda plana e perpendicular de um obstáculo rígido;
- Interação de uma onda plana num obstáculo rígido com um ângulo diferente de  $90^\circ$ ;
- Reflexão do tipo Mach;
- Reflexões múltiplas.

#### Reflexão de uma onda plana e perpendicular a um obstáculo rígido

O caso mais simples de uma reflexão é o de uma reflexão regular de uma onda de choque a obstáculo rígido. Dividindo em dois momentos, um antes da reflexão, figura 2.8(a), e outro após, figura 2.8(b). Num primeiro momento considere-se uma onda de choque  $I$  cujo vetor velocidade  $U$  é perpendicular à onda e na direção ao obstáculo em que a onda de impulso de pressão se propaga num meio (ar) não perturbado. Num segundo momento a onda refletida  $R$  move-se com velocidade  $U_r$  na direção contrária à fronteira, divisão rígida entre o ar e o obstáculo. Nestes dois momentos, podem ser descritas três áreas diferentes, uma primeira em que o meio encontra-se não perturbado, uma segunda área afetada pela passagem da onda de choque e uma terceira e última, após a passagem da onda de choque refletida. Devido à conservação de momento a pressão, a densidade e a temperatura da onda refletida possuem valores mais elevados que a onda de choque inicial. Ou seja, a principal característica de um onda refletida perpendicularmente é o fortalecimento do impulso de pressão.

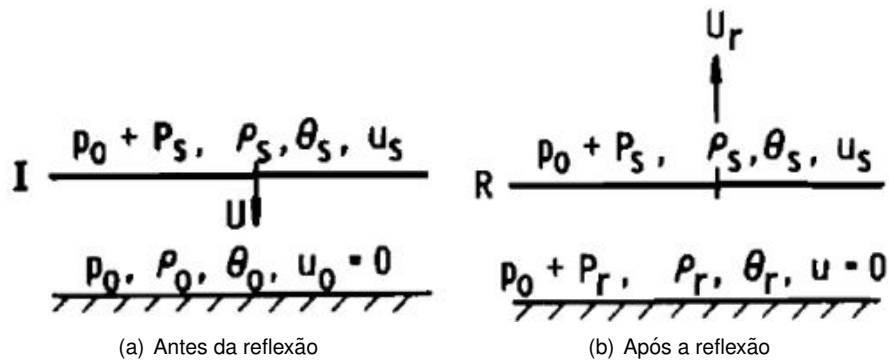


Figura 2.8: Representação da reflexão regular de uma onda perpendicular a um obstáculo, [30].

### Interação de uma onda plana num obstáculo rígido com um ângulo diferente de 90°

Um segundo caso que difere do anterior na medida em que agora o ângulo  $\alpha$  entre o vetor de propagação da onda e o obstáculo é diferente de 90°, figura 2.9.

Numa gama de valores que  $\alpha$  pode tomar, existe um valor limite  $\alpha = \alpha_r$  que divide o problema em reflexões regulares e irregulares. Considerando apenas uma reflexão regular  $\alpha = \alpha_r$ , a onda de choque inicial e a onda de choque refletida cruzam-se sempre na superfície de fronteira. No caso de uma reflexão irregular, o ponto onde as duas ondas se cruzam move-se para trás a uma certa distância da superfície de fronteira.

O ângulo crítico está relacionado com a constante do gás  $\gamma$ . No caso de o valor  $\gamma = 1,4$ , a reflexão regular ocorre no intervalo entre 90° e 39,97°.

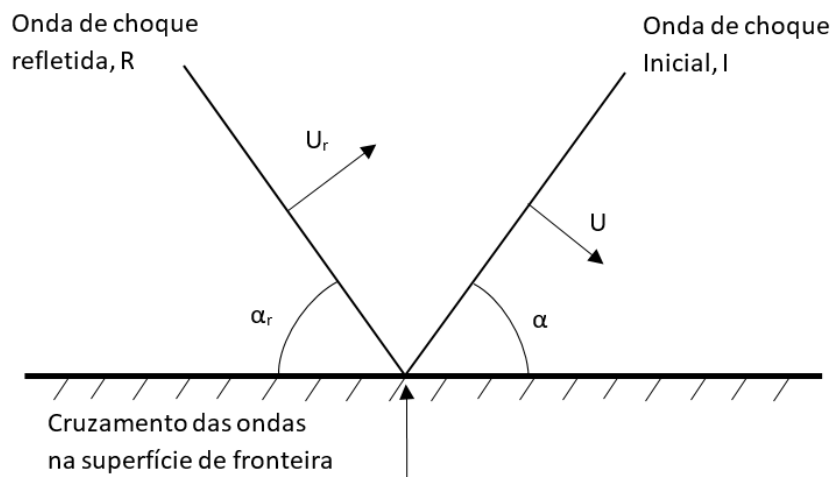


Figura 2.9: Representação da reflexão regular de uma onda não perpendicular, adaptado [30].

### Reflexão do tipo Mach

Um fenómeno importante que ocorre durante a explosão de cargas elevadas é o fenómeno conhecido como a reflexão do tipo Mach [30, 26]. Este fenómeno ocorre quando uma onda de explosão se cruza com uma onda de explosão refletida pelo solo, propagando-se ao mesmo tempo que uma

segunda onda de explosão.

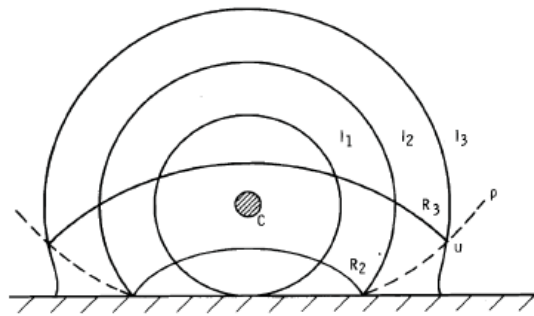


Figura 2.10: Ondas de explosão refletidas pelo solo [30].

As propriedades do ar (meio gasoso), ao nível de temperatura e pressão, são alteradas pela passagem da primeira onda de explosão ( $I_3$ ) fazendo com que a onda refletida ( $R_3$ ) se propaga a uma velocidade maior cruzando-se com uma segunda onda de explosão ( $I_2$ ), figura 2.10.

Esta interação entre as duas ondas origina uma onda perpendicular à superfície de reflexão com valores de pressão mais elevados que as anteriores, figura 2.11.

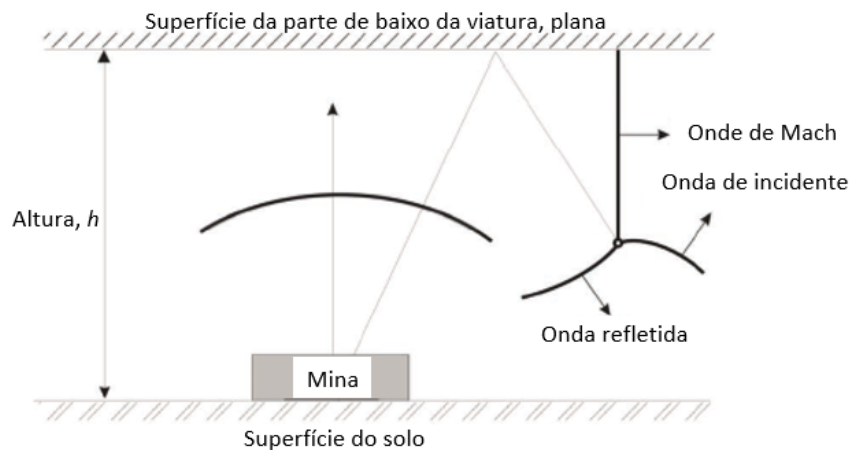


Figura 2.11: Onda de Mach, adaptado [26].

### Reflexões múltiplas

Considere-se um sistema mecânico em que se pretende descrever a propagação de uma onda de choque provocada pelo rebentamento de uma mina quando existe uma passagem de uma viatura. Tem-se portanto, uma fonte que gera a onda de choque (mina ou carga explosiva) colocada numa superfície horizontal inferior (solo) a uma distância  $y$  de uma outra superfície horizontal superior (casco da viatura). Uma onda de choque esférica provocada pela fonte propagar-se-ia no meio (ar) e interagia com as duas superfícies presentes o que iria gerar múltiplas reflexões.

Uma análise analítica a este fenómeno de reflexões múltiplas possui um elevado grau de complexidade. De acordo com Barnat [30], para se resolver este problema é necessário definirem-se algumas

considerações iniciais: assume-se que a reflexão inicial é regular; após algum tempo a fase de reflexão se torna irregular, dado que o ângulo da onda incidente na superfície vai aumentando.

Uma outra consideração que se tem em conta é o método de imagem espelhada. Neste método é assumido que a onda de choque refletida provem de uma fonte que é uma imagem espelhada da fonte real. É assumida esta fonte aparente de modo a cumprir a característica fundamental da reflexão de uma onda esférica: um ângulo de incidência igual a um ângulo refletido. A figura 2.12 representa a propagação de sucessivas reflexões.

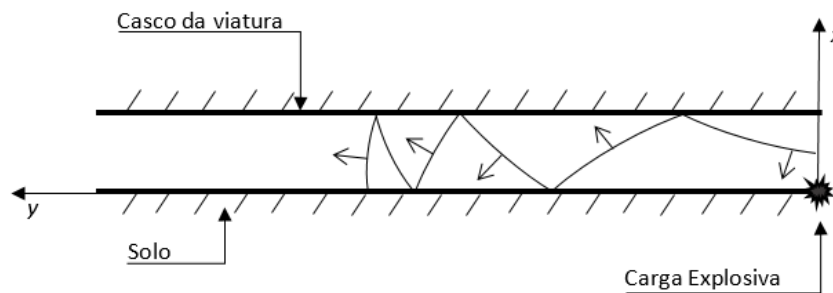


Figura 2.12: Frentes de ondas de choque consecutivamente refletidas, adaptado de [30].

### 2.3.3 Modelo empírico para a deflagração de explosivo

Métodos empíricos são correlações obtidas através de dados experimentais, sendo geralmente limitados pelas condições em que os ensaios ou testes foram produzidos. No caso do problema em estudo verifica-se uma diminuição da precisão quando a explosão se aproxima do solo [31]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos métodos analíticos que permitiram descrever os efeitos provocados por uma explosão, nomeadamente a pressão provocada por estes no meio em que se inserem, na maioria dos casos no ar ou no solo. Estes procedimentos analíticos foram apresentados em determinados relatórios e manuais técnicos e alguns deles terão sido estudados e desenvolvidos por investigadores, trabalhando direta ou indiretamente para organizações de defesa, dada a sua natureza maioritariamente militar, são estudos dos quais a sua informação permanece classificada e não é disponível ao acesso público. Ainda assim, alguma informação tornada pública é aqui apresentada.

#### Explosão esférica ou hemisférica em espaço livre

Kingery and Bulmash [32] e o *US Department of the Army* [25] produziram nesta área uma compilação de dados obtidos em testes a explosivos, tendo variado a massa da carga desde menores que 1 [kg] até mais de 4 [ton] de equivalente de TNT. Com esta compilação, desenvolveram equações polinomiais de elevada ordem através de uma aproximação por uma curva dos dados experimentais que permitem prever os parâmetros de uma explosão esférica no ar e de uma explosão hemisférica numa superfície. Estas equações são aceites como uma predição pela engenharia e muito utilizadas como modelo para explosões num espaço livre (sem obstáculos) ou em contacto com superfícies, tendo sido desenvolvido um *software* denominado de CONWEP [33] que executa os cálculos numéricos dos efeitos causados

por armas convencionais tais como: onda de choque no ar e no solo, penetração e fragmentação de projeteis e formação de crateras. Remennikov [31] e Lahiri and Ho [24] afirmam que ao contrário do TM5-855-1 [25], no qual é proposto que o decaimento da pressão gerada pela onda de choque é representado por uma aproximação de um pulso triangular equivalente, o método CONWEP, através de uma equação de Friedlander modificada toma uma abordagem mais realista para descrever o fenómeno. A equação (2.1) traduz essa abordagem sendo representada pela figura 2.7.

$$p(t) = (p_{max} - p_{atm}) \left[ 1 - \frac{t - t_a}{t_d} \right] e^{-\frac{a(t-t_a)}{t_d}} \quad (2.1)$$

$$I = \int_{t_a}^{t_a+t_d} p(t) dt \quad (2.2)$$

O modelo CONWEP descreve, assim, uma explosão livre no ar através do valor de pressão a variar no tempo  $p(t)$ , dado pela equação (2.1), e o impulso  $I$  da explosão num dado ponto no espaço, equação (2.2). Nas quais,  $p_{atm}$  é a pressão atmosférica,  $t_a$  é o tempo de chegada da frente da onda de choque,  $t_d$  é a duração da fase positiva e  $a$  é uma constante de decaimento que, com recurso à equação (2.2), é calculada iterativamente através do impulso, da sobre-pressão ( $p_{max} - p_{atm}$ ) e da duração da fase positiva, figura 2.7.

Para se calcular a pressão exercida na superfície a quando da reflexão de uma onda de choque, a pressão da onda inicial  $p_i(t)$  e da onda refletida  $p_r(t)$  são calculadas separadamente.

$$p(t) = \begin{cases} p_i(t)[1 + \cos \theta - 2 \cos^2 \theta] + p_r(t) \cos^2 \theta & \text{para } \cos \theta \geq 0 \\ p_i(t) & \text{para } \cos \theta < 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Como visto anteriormente na secção 2.3.2 em que a superfície se trata de um obstáculo rígido, a pressão  $p(t)$  depende do ângulo de incidência na superfície. Seguindo a mesma nomenclatura que [24], considere-se um ângulo  $\theta$  formado pelo raio que une o ponto de contacto entre a superfície e a onda de choque inicial com o vetor normal à superfície, então a pressão sentida na superfície vem dada pela equação (2.3).

### Explosão de uma carga enterrada no solo

De acordo com o artigo [34], Westine em 1985 [35] e Tremblay em 1998 [36] desenvolveram um modelo empírico para a carga produzida por uma explosão de uma mina enterrada no solo numa placa horizontal e uma placa oblíqua, respetivamente. O primeiro modelo foi criado através de resultados experimentais.

Westine [35] realizou uma série de testes com cargas enterradas no solo e uma placa horizontal. Após a construção de gráficos com base em valores e dados retirados dessa experiência foi desenvolvida uma função analítica que descreve o problema sobre a forma de impulso específico  $i_v$  em função de uma distância num ponto de interesse  $P$ . Tremblay [36] por sua vez estendeu essa a análise a



placas oblíquas.

$$i_v(x, y) = 0.1352 \left(1 + \frac{7\delta}{9z}\right) \left(\frac{\tanh(0.9589\zeta d)}{\zeta d}\right)^{3.25} \sqrt{\frac{\rho E}{z}} \quad (2.4)$$

Para um placa horizontal, o impulso específico  $i_v$  [Pa·s] é dado pela função (2.4) que depende da energia libertada pelo explosivo  $E$  [J], da área da secção da carga explosiva  $A$  [m<sup>2</sup>], da densidade do solo  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>], das distâncias  $z$  [m] e  $d$  [m] de um ponto de interesse  $P$  ao centro da carga, da profundidade no solo a que a carga se encontra enterrada  $\delta$  [m]. A variável  $\zeta$  [m<sup>-1</sup>] é calculada através da equação (2.5):

$$\zeta = \frac{\delta}{z^{5/4} A^{3/8} \tanh\left(\left[2.2\frac{\delta}{z}\right]\right)^{3/2}} \quad (2.5)$$

A figura 2.13 representa um esquema das variáveis que compõem o modelo empírico para o impulso específico  $i_v$  para uma placa horizontal.

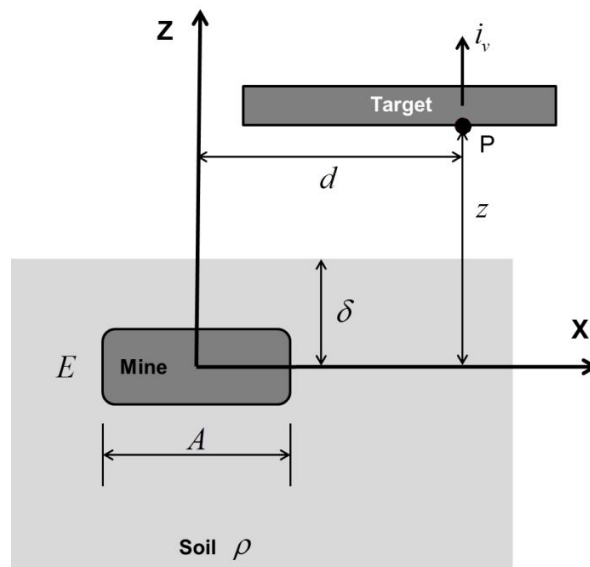


Figura 2.13: Representação do modelo para uma mina enterrada no solo, [34].

O modelo empírico para impulso específico de dada carga enterrada no solo numa placa horizontal, encontra-se limitada pelas condições descritas pelas equações seguintes:

$$\begin{aligned} 0.106 &\leq \frac{\delta}{z} \leq 1.0 \\ 6.35 &\leq \frac{E/A}{\rho c^2 z} \leq 150 \\ 0.154 &\leq \frac{\sqrt{A}}{z} \leq 4.48 \\ 0 &\leq \frac{d}{z} \leq 19.3 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Em que  $c$  [m/s] representa a velocidade da onda de choque no solo. Existe ainda um erro associado ao valor obtido para o impulso específico  $i_v$  pela equação (2.4) limitado por um fator de 1,8, ou seja:

$$i_v/1.8 \leq \text{Impulso esperado} \leq 1.8 \cdot i_v \quad (2.7)$$

No caso de placas colocadas com um ângulo oblíquo, Tremblay introduziu o impulso radial  $i_r$  com base no modelo desenvolvido por Westine, cuja representação e respectivas variáveis se encontram na figura 2.14.

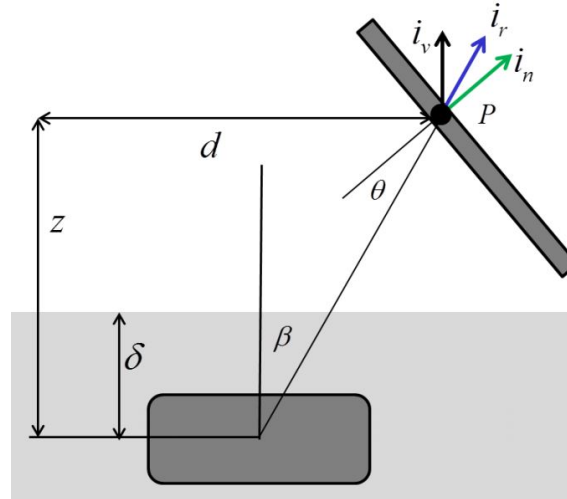


Figura 2.14: Representação do modelo para o caso do alvo ser uma placa não horizontal, [34].

Da mesma figura e sabendo que  $i_v$  é dado pela equação (2.4) é possível deduzir-se:

$$i_n = i_r \cos^2 \theta \quad (2.8)$$

$$i_v = i_r \cos^2 \beta \quad (2.9)$$

Combinado as equações (2.8) e (2.9), obtém-se:

$$i_n = i_v \frac{\cos^2 \theta}{\cos^2 \beta} \quad (2.10)$$

Tendo-se assim, o impulso radial  $i_r$  relacionado com o impulso específico  $i_v$  através de uma componente normal à placa.

## 2.4 Fundamentos para a simulação numérica

Tal como faz parte dos objetivos deste trabalho, modelar e simular o fenómeno de explosão provocado pela detonação de uma mina através de métodos numéricos, nesta secção pretende-se abordar o tema ao nível do *software* e justificar a utilização de tais métodos com a exposição de casos de estudo já realizados pela comunidade científica.

Com potencial já demonstrado, as simulações numéricas são um ferramenta muito importante na medida em que permitem prever fenómenos físicos com precisão considerável. Tendo como grande

vantagem o facto de permitir que os custos associados a atividades experimentais são muito menores quando comparados a uma atividade experimental que envolva meios, materiais e equipamentos reais. O caso de estudo que se pretende desenvolver é um exemplo disso, o rebentamento de um explosivo por baixo de uma viatura militar acarreta custos elevados. Ainda outra razão e não menos importante, questões de segurança estão sempre associados a este tipo de eventos.

## 2.4.1 Software de modelação e simulação LS-DYNA®

Pelo manual teórico da ferramenta computacional LS-DYNA® [37], o *software* tem como finalidade uma codificação do método de elementos finitos que permite a análise da deformação estática e dinâmica de estruturas incluindo estruturas acopladas a fluidos, sendo baseada num método explícito de integração no tempo. Atualmente contém aproximadamente cem modelos constitutivos e dez equações de estado cobrindo uma vasta gama de comportamento de materiais. A figura 2.15 representa a interface LS-DYNA® *Program Manager*, na qual a opção *solver* permite iniciar a compilação do modelo em análise e a opção LS-PrePost permite iniciar a respetiva aplicação, nos parágrafos seguintes aborda-se esta última opção.

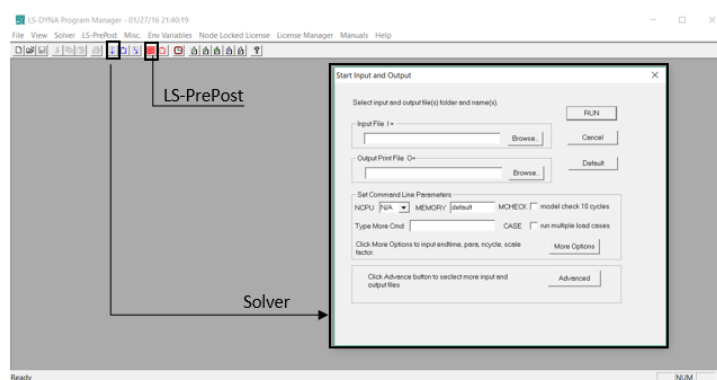


Figura 2.15: Interface LS-DYNA® *Program Manager*

O *software* LS-DYNA® possui outras valências e permite construção de um determinado modelo através do acoplamento de outras ferramentas computacionais, como é o caso da importação de projetos em *Computer Assisted Design* (CAD) 3D assim como da respetiva discretização (malha) ou de outra aplicação que permita a leitura dos resultados obtidos. Na elaboração deste trabalho recorreu-se à aplicação LS-PrePost, associada ao LS-DYNA®, para o processo de discretização e construção da malha sobre as diferentes geometrias da viatura que foram necessárias projetar e gerar o tipo de ficheiro que permite ao LS-DYNA® executar a compilação dos dados e respetivos cálculos numéricos. O projeto e desenho tridimensional das geometrias da viatura realizaram-se com recurso à ferramenta de CAD SOLIDWORKS®, tendo sido importadas para o LS-PrePost *a posteriori*. Esta aplicação é um processador avançado que permite tanto o processamento prévio (*pre-processor*) do modelo, construção tridimensional dos elementos constituintes do fenómeno físico em análise e aplicação do MEF, como o pós processamento (*post-processor*), visualização virtual da animação do fenómeno físico e obtenção dos resultados da modelação elaborada. A interface do LS-PrePost foi projetada de modo a que seja

de utilização intuitiva e eficiente tendo como principais funcionalidades: criação de geometrias e malhas; suporte compreensivo e criação das *keyword*; visualização e edição do modelo; avançando pós processamento de dados e visualização dos resultados.

Em suma, o processo de construção do modelo pretendido para esta dissertação é elaborado em três fases: 1) elaboração do modelo tridimensional, discretização e controlo, *pre-processor*; 2) compilação, LS-DYNA® *Program Manager*; 3) obtenção de resultados, *post-processor*.

A implementação de um modelo numérico no *software* é baseada na ativação de *keywords* através do comando *Keyword Manager* presente na lista de opções de *Model and Part*, figura 2.16. Sendo estas, de uma forma geral, responsáveis pela escolha do método a implementar, definição de tempo de amostragem para o qual os cálculos numéricos são efetuados e de tempo total de simulação, e ainda responsáveis por se definir quais os valores de saída e em que formato se pretendem analisar. No entanto, a aplicação LS-PrePost permite a utilização de outros comandos, presentes na mesma lista de opções, para que sejam geradas *keywords* de forma automática, sendo que este método apresenta vantagens e desvantagens de acordo com o objetivo pretendido.

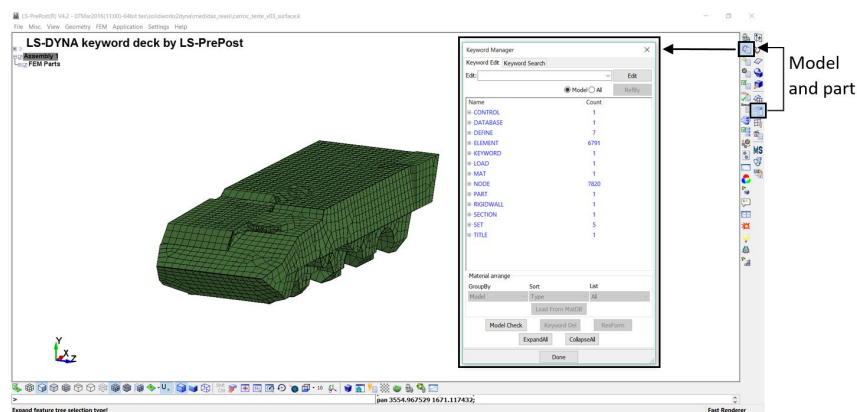


Figura 2.16: Interface de criação e edição de *keywords*.

De referir que, dada a ausência de possibilidade de se definir previamente o sistema de unidades pretendido, é necessário ter-se em atenção que as unidades são introduzidas em cada passo do processo devendo estas encontrarem-se coerentes. A tabela 2.2 apresenta exemplos de sistemas de unidades coerentes, nos quais são apresentados valores de referência para a densidade e Módulo de Young de um aço genérico assim como valores de aceleração da gravidade. O sistema de unidades implementadas encontram-se salientadas a verde na tabela referida (ton, mm, s, N, MPa e Nmm).

## 2.4.2 Revisão bibliográfica

É possível encontrar na comunidade científica uma série de trabalhos desenvolvidos nesta área, ou seja em torno da modelação do rebentamento de minas sob o casco de viaturas militares recorrendo à ferramenta computacional LS-DYNA®: por um lado, existem trabalhos desenvolvidos tendo em vista a modelação, simulação e a sua validação do rebentamento de explosivos tanto ao nível do solo como de cargas enterradas, por outro lado, foram também realizados estudos com a respetiva modelação,

Tabela 2.2: Sistemas de unidades para valores de referência

Massa	Comprimento	Tempo	Força	Pressão	Energia	Propriedades de um aço genérico		Gravidade
						Densidade	Módulo de Young	
kg	m	s	N	Pa	J	7.83e+03	2.07e+11	9.806
kg	cm	s	1.0e-02 N	Pa	J	7.83e-03	2.07e+09	9.806e+02
kg	cm	ms	1.0e+04 N	Pa	J	7.83e-03	2.07e+03	9.806e-04
kg	cm	us	1.0e+10 N	Pa	J	7.83e-03	2.07e-03	9.806e-10
kg	mm	ms	kN	GPa	kN-mm	7.83e-06	2.07e+02	9.806e-03
g	cm	s	dyne	dyne/cm <sup>2</sup>	erg	7.83e+00	2.07e+12	9.806e+02
g	cm	us	1.0e+07 N	Mbar	1.0e+07 Ncm	7.83e+00	2.07e+00	9.806e-10
g	mm	s	1.0e-06 N	Pa		7.83e-03	2.07e+11	9.806e+03
g	mm	ms	N	MPa	N-mm	7.83e-03	2.07e+05	9.806e-03
ton	mm	s	N	MPa	N-mm	7.83e-09	2.07e+05	9.806e+03
lbf-s <sup>2</sup> /in	in	s	lbf	psi	lbf-in	7.33e-04	3.00e+07	386
slug	ft	s	lbf	psf	lbf-ft	1.52e+01	4.32e+09	32.17
kgf-s <sup>2</sup> /mm	mm	s	kgf	kgf/mm <sup>2</sup>	kgf-mm	7.98e-10	2.11e+04	9.806e+03
kg	mm	s	mN	1.0e+03 Pa		7.83e-06	2.07e+08	9.806e+03
g	cm	ms	1.0e+1 N	1.0e+05 Pa		7.83e+00	2.07e+06	9.806e-04

simulação e validação sobre a influência do formato do casco de uma viatura sobre um impulso de pressão.

Nos próximos parágrafos são, então, apresentadas experiências e resultados de alguns desses trabalhos, nomeadamente, simulações numéricas desenvolvidas com diferentes técnicas que permitem comparar os resultados experimentais que mais tarde possam ser úteis para validar à análise numérica e diminuir o número de experiências necessárias, que são considerados importantes para a realização deste trabalho.

### Métodos por equações de estado

Para além do método CONWEP, outra forma de modelação é o recurso a equações de estado (EOS), um método de simulação numérica aplicável no LS-DYNA® [37, 13], que permite descrever uma onda de pressão a propagar-se no ar. É definido, portanto, uma equação de estado para cada meio. Sendo esta a principal diferença, verifica-se a necessidade de definição de uma malha para cada meio de propagação da onda choque. Sendo a equação de estado do ar definida por:

$$p = [c_0 + c_1\mu + c_2\mu^2 + c_3\mu^3] + [c_4 + c_5\mu + c_6\mu^2]E \quad (2.11)$$

$$\mu = \frac{1}{V} - 1 \quad (2.12)$$

V, volume relativo E, energia interna por volume

Para se modelar o ar (\*EOS.LINEAR.POLYNOMIAL):  $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 0$   $C_5 = C_6 = \gamma - 1$

Com  $\gamma = 1.4$

Equivalentemente:

$$P = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad E = \rho_0 C_v T \quad (2.13)$$

No caso do explosivo recorre-se a uma equação de estado de Jone-Wilkins-Lee (\*EOS\_JWL) para descrever o explosivo, este modelo foi desenvolvido com o objetivos de aplicabilidade em problemas que envolvam a aceleração de metais:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (2.14)$$

A equação 2.14 tem como variáveis empíricas  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  e  $\omega$ .  $V$  representa o volume relativo ou produto da expansão do explosivo e  $E$  traduz a energia de detonação do explosivo por unidade de volume inicial.

### Influência da configuração e geometria do casco da viatura sobre a distribuição de pressão

Barnat et al. [30] realizou uma análise numérica, com base no algoritmo de *Arbitrary Lagrange-Eulerian* (ALE) implementado no LS-DYNA®, a um caso de múltiplas reflexões de uma onda de choque, idêntico ao caso de uma explosão de uma carga por baixo de uma viatura militar, figura 2.17(a), do tipo pesada, CC, ou ligeira, VBR. Verificou-se um aumento significativo da pressão em comparação a uma explosão num espaço livre. Para a mesma carga, de densidade de 1600 [kg/m<sup>3</sup>] e de energia interna específica de 4.2 [MJ/kg], e para o mesmo ponto, o aumento registado para o valor máximo de pressão foi cerca quarto vezes, figura 2.17(b), passando a explosão num espaço livre de  $1.15 \times 10^9$  [Pa] para  $4.7 \times 10^9$  [Pa] no caso das múltiplas reflexões.

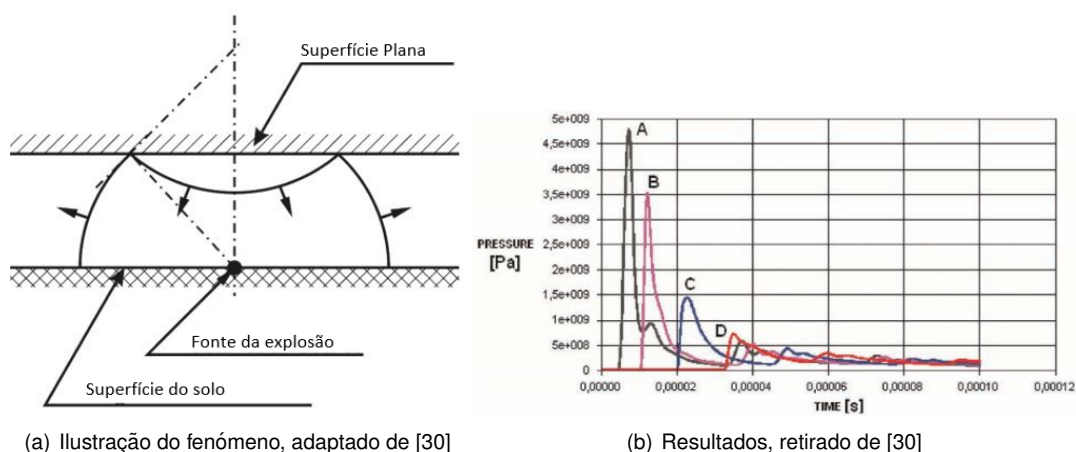


Figura 2.17: Reflexão das ondas de choque numa superfície horizontal.

No seguimento do estudo apresentado no parágrafo anterior, Barnat et al. [26] publicou um outro artigo sobre simulações numéricas numa análise à influência da configuração e geometria do casco da viatura sobre a distribuição de pressão. Como já referido anteriormente, uma componente muito relevante para a proteção de uma viatura para fazer face às minas anti-carro passa pela geometria

do seu casco. Nesse sentido, análises numéricas a simples geometrias permitem-no comprovar. De acordo com a literatura referida, uma análise numérica a um primeiro modelo no qual não são considerados limites de fronteiras permite estudar a propagação de uma onda de choque e os seus valores máximos de pressão gerados. Este modelo serve como comparação com modelos criados posteriormente. Assim, comparando com um segundo modelo, no qual são definidos esses limites de fronteira, como é caso de se considerar o solo e uma proteção num plano paralelo ao solo, ou seja totalmente horizontal, figura 2.17. permite perceber como se comporta a reflexão de uma onda de choque e conseqüentemente a variação nos valores de pressão. Num terceiro modelo com uma proteção em "V", figura 2.18(a) , apesar de no ponto A, figura 2.18(b), se verificar um valor máximo de pressão idêntico ao segundo modelo, nos restantes pontos, de B a D, verificou-se uma diminuição significativa desses valores. Comprovando que a utilização de defletores diminuirá a pressão global que se observa na estrutura inferior de uma viatura.

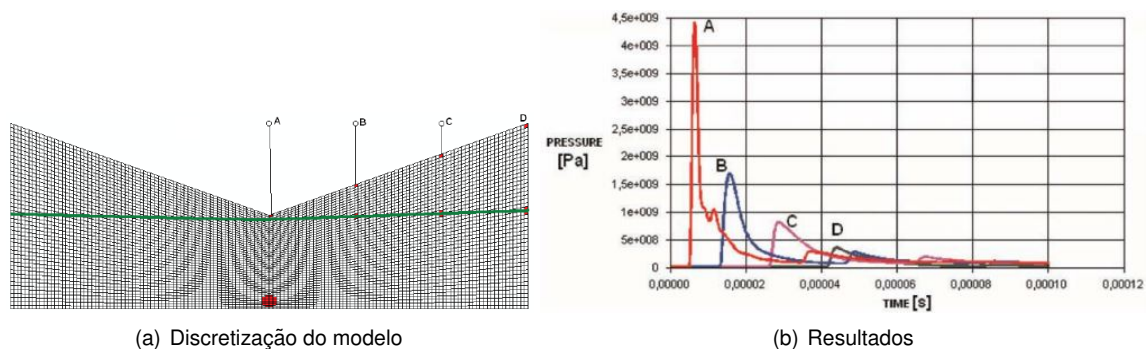


Figura 2.18: Reflexão das ondas de choque numa superfície em "V", retirado de [30].

### Efeitos provocados em viaturas blindadas

Barnat et al. [38], apresentou resultados de uma análise preliminar ao impacto de uma explosão provocada por um IED na lateral de uma VBR ligeira. Para tal, foi criada uma malha, com recurso ao MEF, sobre o chassis da viatura em estudo por um processo de discretização. Apenas foi tido em consideração o chassis, sem nenhum equipamento adicional, no processo de modelação. Relativamente à carga do explosivo, os testes foram realizados para 6 massas diferentes, variando entre os 5 [kg] e os 500 [kg].

A análise foi conduzida com base em dois fatores quando existe um rebentamento, neste caso de estudo, de um IED: 1) de acordo com o STANAG 4569 [3] na qual é mencionado que o chassis de uma viatura para ser considerado seguro deve possuir espaço suficiente no seu interior de modo a garantir a sobrevivência da sua guarnição, isto leva a que a variação da distância entre paredes opostas no interior da viatura determine a sua segurança; 2) as elevadas acelerações que a guarnição está sujeita. Desta forma, foram analisadas as deformações, deslocamentos, variação da energia interna e velocidades de pontos específicos do chassis ao longo tempo. A respetiva análise demonstrou que para cargas menores a viatura tinha espaço suficiente, no entanto, para cargas mais elevadas as deformações eram de tal ordem que se considerou que não seria seguro para a guarnição. Com o objetivo de se melho-

rar os resultados foi necessário endurecer o material que compunha o chassis. Este endurecimento conduziu então a resultados melhores na medida em que as deformações plásticas foram reduzidas, levando a que o nível de segurança fosse melhorado. As simulações foram realizadas para cargas entre os 25 e os 500 [kg] de TNT, resultando em picos de acelerações que variam entre 6 e os  $16 \times 10^3$  [m/s<sup>2</sup>]. Barnat et al. [38] afirma que a magnitude das acelerações sentidas pela guarnição, aquando do rebentamento de cargas superiores a 100 kg, não permitirá conferir segurança à guarnição.

Mikulíć et al. [39] publicou um artigo no qual fornece parâmetros sobre uma onda de explosão com o objetivo de permitir a avaliação de possíveis proteções a Viaturas Blindadas Ligeiras (VBL) 4x4 de transporte de pessoal e logística de acordo com os requisitos da NATO, STANAG 4569 [3]. Os parâmetros considerados como mais importantes no projeto de proteções contra minas anti-carro para as VBL são: a altura de segurança; chão duplo ou fundos falsos; defletores, geometria em "V" para o casco; suspensões nas rodas independentes, pneus com sistemas *run-flat*, bancos e assentos com sistemas de absorção de vibrações. No documento são apresentadas justificações para tais aplicações das medidas mencionadas, nomeadamente: 1) no projeto do chassis da viatura é demonstrado que o fator mais importante a ter em consideração é a pressão provocada pela onda de choque; 2) no projeto das rodas, o fator mais importante a ter em consideração é a pressão provocada pelos produtos resultantes da explosão. Estes dois fatores tem por base a análise dos valores apresentados na tabela 2.3 em que  $R$  é a distância ao epicentro da explosão,  $p_u$  é a pressão provocada pela onda de choque e  $p_d$  é a pressão provocada pelos produtos resultantes da explosão.

Tabela 2.3: Valores de Pressão em função da distância à fonte da explosão, retirado de [39]

$R(m)$	$p_u(kbar)$	$R(m)$	$p_d(kbar)$
0.09	97.59	0	96.58
0.1	71.27	0.01	82.31
0.125	36.66	0.02	36.756
0.15	21.31	0.039	12.41
0.2	9.07	0.054	7.17
0.3	2.74	0.069	3.86
0.4	1.18	0.106	0.92
0.5	0.61	0.117	0.23
0.6	0.36	0.244	0.10
0.7	0.23	0.577	0.01

Considerando que se dá uma detonação no solo a 50 cm do casco da viatura, a pressão que se verifica é de aproximadamente 600 bars, por sua vez, se uma roda da viatura aciona a detonação de uma mina, observa-se que num raio de 1 cm a pressão resultante dos produtos da explosão é de 80 000 bars, ao aumentar a distância para os 50 cm os efeitos são perdidos. Se a viatura possuir um sistema de *run-flat* então deve permitir a uma geometria em "V" do casco da viatura direcionar os produtos de detonação e assim diminuir o impacto das rodas na viatura.



## Análise da VBL M113

Brill et al. [40] e Larsen e Jorgensen[41] apresentaram análises numéricas, através de modelos produzido pelo MEF, à detonação de minas sob a VBL M113<sup>8</sup>. Ambos os artigos produzidos pelos dois trabalhos têm como objetivo comparar algumas abordagens numéricas com testes realizados no terreno. Para as simulações numéricas, Brill recorreu a um acoplamento de vários métodos para a análise dos elementos finitos simulando a interação entre a onda de choque da explosão, os gases provenientes da detonação e a viatura, para a onda de choque provocada pelo explosivo este recorreu ao modelo CONWEP. Larsen recorreu a elementos lagrangianos para modelar a estrutura da viatura e a elementos ALE para modelar o explosivo e o ar.

Relativamente ao método CONWEP utilizado por Brill et al. [40], este apresenta uma pressão máxima de 0.1446 [GPa] no casco da viatura. Para a dinâmica da viatura, a figura 2.19 apresenta dois gráficos, um para o deslocamento e outra para a aceleração vertical em função do tempo que a viatura adquire quando a detonação do explosivo ocorre. Pode-se observar um deslocamento e uma aceleração máximos de 0.065 [m] e  $2.55 \times 10^3$  [m/s<sup>2</sup>] respetivamente. Embora a viatura em análise nestes artigos (VBL M113) apresente uma configuração geométrica diferente e, conseqüentemente, valores esperados de inércia diferentes da viatura em análise nesta dissertação (VBR Pandur II), ambas são viaturas militares com uma massa na mesmas ordem de grandeza: VBL M113, até 12500 [kg] ; VBR Pandur II, aproximadamente 18000 [kg].

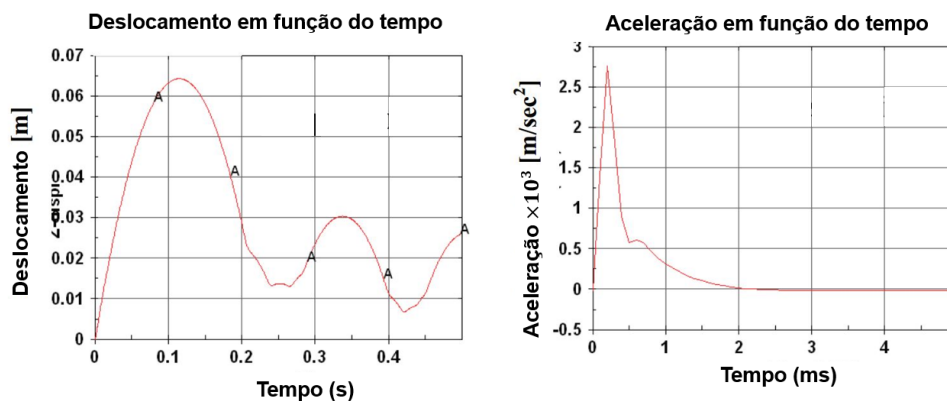


Figura 2.19: Deslocamento e Aceleração em função do tempo para a explosão de uma mina sob uma VBL M113, adaptado de [40].

É referido no artigo que estes resultados foram obtidos através de um modelo da viatura M113 construída por elementos do tipo *shell*, figura 2.20, e que foi necessário recorrer-se à *keyword* \*PART\_INER-CIA para se introduzir o valor correto da massa da viatura assim como os valores para os principais momentos de inércia.

Por sua vez, Larsen et al. [41], apesar de não apresentar dados concretos obtidos para a dinâmica da viatura, refere que foi considerado um movimento vertical da viatura, obtendo um valor máximo de deslocamento aos 0.5 [s]. De modo a fazer os cálculos da dinâmica pretendidos recorreu à *keyword* \*DEFORMABLE\_TO\_RIGID\_AUTOMATIC, tornando a análise num modelo de corpo rígido para a parte

<sup>8</sup>A VBL M113, é uma viatura blindada de transporte de pessoal de lagartas que também equipa o EP. Encontrando-se na Brigada Mecanizada.

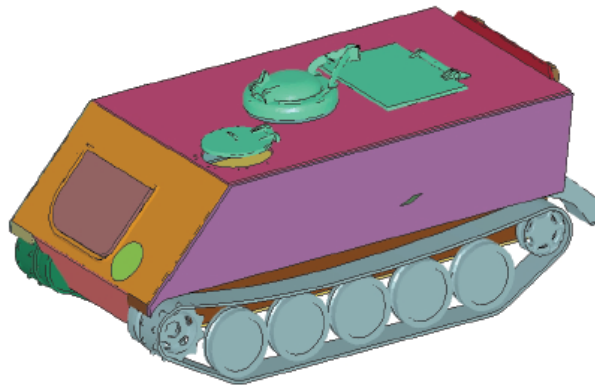


Figura 2.20: Modelo CAD da viatura M113 utilizada por Brill *et al.* [40].

da viatura, ainda assim, o peso da viatura do modelo criado apresentava 8000 [kg], ficando à quem dos cerca de 12000 [kg]. É referido ainda que, em vez de se criar um modelo para chão, este foi recriado com base no constrangimento vertical de nós que compõem a frente da viatura, figura 2.21 (a), forçando-a a rodar em torno da sua frente. Com esta modelação da viatura, o movimento vertical da traseira da viatura foi maior para o modelo do que para os testes experimentais, figura 2.21 (b), Concluindo que o constrangimento vertical daqueles nós não foi suficiente e ainda o facto de o peso da viatura ser menor também contribuiu para o aumento do movimento global desta.

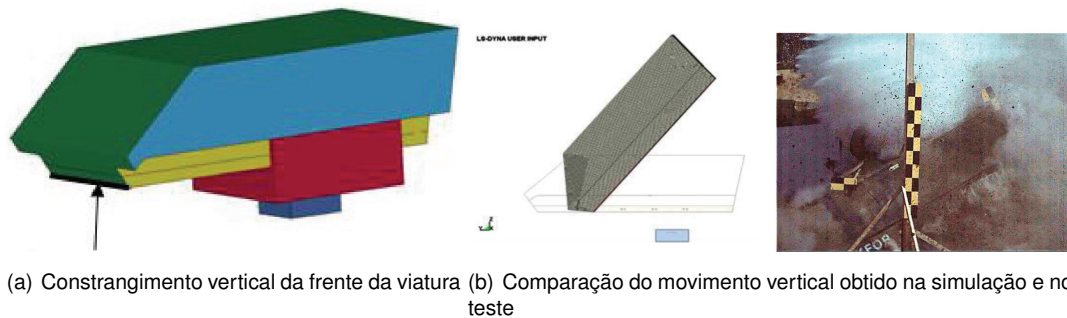


Figura 2.21: Modelo implementado por Larsen *et al.* [41]

### Avaliação dos Modelos

O código CONWEP é implementado no LS-DYNA<sup>®</sup> através do modelo empírico descrito na secção 2.3.3, sendo uma base de *Blast Loading option* deste programa, recorre-se à *keyword* \*LOAD\_BLAST ou \*LOAD\_BLAST\_ENHANCED para o aplicar. Após ter sido testado, concluiu-se que é adequado ao estudo da resposta de viaturas à detonação de minas terrestres [13]. No LS-DYNA<sup>®</sup>, o código CONWEP pode ser utilizado em dois casos: detonação num espaço livre de uma carga esférica e detonação numa superfície de uma carga hemisférica. Esta carga hemisférica é utilizada para simplificar a pressão provocada pela detonação de minas enterradas no solo a uma profundidade menor que 20 [cm], simulando numericamente as ondas de choque refletidas no solo. Contudo, tal como descrito na secção na secção 2.3.3 deste documento, é necessário ter-se em consideração a profundidade a que a mina se encontra enterrada no solo devido ao efeito que causa à energia libertada durante a

explosão e que atravessa o solo até ao alvo. Não são tidos em consideração algumas variáveis como a composição do solo ou o tipo de solo que produzem efeitos na energia libertada. Foi desenvolvido posteriormente um pré-processador, um modelo empírico mais desenvolvido, no código do LS-DYNA® pelo *Southwet Research Institute* e implementado pelo *Defence R&D Canada - Valcartier* para o *U.S Army Tank Automotive Command*, dado que observações experimentais de Williams *et al.* [42] demonstrou resultados que determinaram a existência de um fator de redução de 66% no modelo de Westine [35] devido ao facto do modelo proposto por este apenas considerar a densidade do solo e não o tipo de solo e a humidade. Apesar do CONWEP ser um modelo amplamente utilizado, é baseado em dados experimentais de explosões num espaço livre, não tendo em consideração efeitos de reflexão da onda de choque devido a corpos ou obstáculos que conduzam a um confinamento do espaço.

Williams *et al.* [42] realizou as observações referidas num estudo no âmbito do programa de Defesa do Canadá com o objetivo de reduzir a vulnerabilidade das VBL ao rebentamento de minas anti-carro, sendo que o programa, do qual o estudo faz parte, está fortemente apoiado no recurso ao LS-DYNA® no projeto e otimização de sistemas de blindagem do tipo *add-on*. Os autores afirmam que técnicas de simulação com recurso ao ALE oferecem resultados consideravelmente fiáveis, no entanto consomem muitos recursos em termos de implementação e esforço computacional, sendo que a utilização do método empírico CONWEP (referindo-se ao \*LOAD\_BLAST no LS-DYNA®) é mais simples e por isso mais indicada, no entanto é um método que contém determinadas limitações dado que o rebentamento de uma mina AC é aproximada por uma explosão que ocorre numa superfície mas, na maioria dos casos, estas encontram-se enterradas no solo a uma profundidade de 5 a 20 [cm] fazendo com que este facto tenha um efeito significativo na energia dirigida ao alvo, canalizando a força da explosão para cima, assim como existe a influência de outras variáveis como o tipo de solo e as matérias que o compõem. Sendo que nenhum destes efeitos seja tido em consideração no modelo CONWEP, a única variável é apenas a massa do explosivo. Williams defende que se o utilizador tiver algum cuidado na sua implementação e avaliar bem os resultados estas funções empíricas podem ser suficientemente precisas no estudo dos efeitos da explosão de uma mina sobre geometrias simples, contudo a interação entre os produtos de detonação, o solo e de mais detritos com o chassis de uma viatura é tal ordem complexa que, para um estudo mais pormenorizado, este deverá ser realizado com recurso a formulações de fluidos como o caso da abordagem ALE.

Tabatabaei e Volz [43] apresentaram também três métodos diferentes para o estudo de explosões implementados no LS-DYNA®: método de detonação empírica, CONWEP; *Multi-Material* ALE (MM-ALE); acoplamento dos dois métodos, CONWEP com MM-ALE. Analisaram os resultados numéricos com dados obtidos através de medições experimentais para dois tipos pressão causada pela explosão, pressão provocada pela onda de choque em ambiente livre e a pressão provocada por uma onda de choque refletida. Os testes consistiram na colocação de uma carga explosiva de 36 [kg] de TNT a 168 [cm] de distância e centrada com um placa de betão de 184 por 184 [cm], tendo a análise numérica sido feita através de um quarto da amostra de modo a facilitar o esforço computacional. Foi aplicada a função \*LOAD\_BLAST\_ENHANCED para a aplicação do CONWEP e para o método ALE recorreram às equações de estado dos materiais envolvidos, ver secção 2.4.2. O acoplamento dos dois

métodos permitiu reduzir a malha referente ao ar, utilizando os mesmos parâmetros definidos pela EOS e não foi necessário modelar o explosivo pois a informação referente a este é obtida pelas equações do \*LOAD\_BLAST\_ENHANCED. Os resultados obtidos permitiram demonstrar as diferenças entre os resultados finais produzidos por cada um dos métodos, na tabela 2.4 podem ler-se os valores obtidos para o pico de pressão da reflexão da onda choque para cada um dos métodos numéricos e para o método experimental. Da mesma forma, é possível verificar-se as diferenças ao nível do esforço computacional que cada um requer, ilustrando-se a dimensão dos modelos pelo número de elementos e o tempo que o CPU levou a correr cada um desses modelos. A figura 2.22 pretende comparar os dados experimentais com os resultados da simulação numérica pelo método CONWEP para a variação de pressão provocada pela explosão em ambiente livre.

Tabela 2.4: Comparação de resultados para cada método [43].

Método	Pico de Pressão $\times 10^{-3} \text{ Mbar}$	Número de Elementos	Tempo total de CPU (hh:mm:ss)
CONWEP	0.29	4179	02:13:35
ALE	0.71	37856	84:40:03
CONWEP + MM-ALE	0.55	12930	41:42:00
Experimental	1.5		

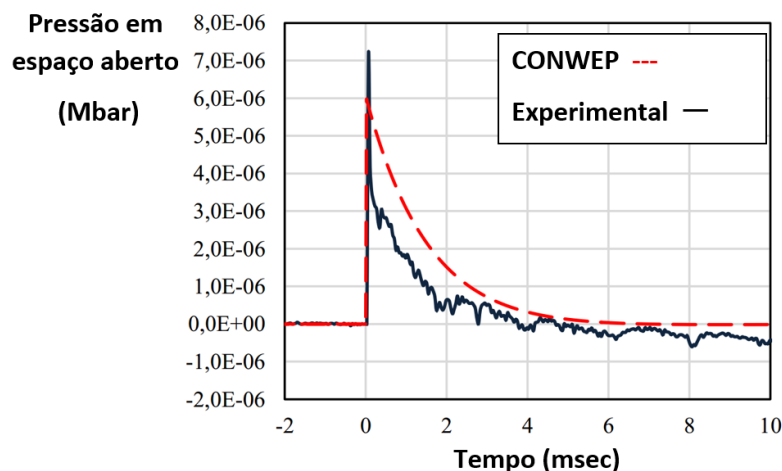


Figura 2.22: Comparação da variação da pressão livre entre o CONWEP e os dados experimentais, adaptado de [43].

O estudo permitiu concluir que o método empírico apresenta valores menores para o pico de pressão do que os obtidos na realidade pelos dados experimentais, mas por outro lado sobrevaloriza o impulso obtido experimentalmente. Para os três métodos numéricos o pico de pressão, nenhum atingiu o valor esperado pelos dados experimentais, no entanto o CONWEP apresentou o valor mais baixo. Embora o acoplamento esteja mais longe do pico de máximo de pressão do que o método ALE, observam-se resultados consideráveis pelo esforço computacional que ambos apresentam, ou seja, o acoplamento permite reduzir em metade o tempo de compilação face ao ALE. Neste aspeto, o CONWEP apresenta uma clara vantagem em termos do esforço computacional dado ter apresentado um tempo menor que

os restantes métodos, 21 vezes menor que o método ALE e 10 vezes menor que o acoplamento dos dois métodos.

Num artigo já referido anteriormente, Brill et al. [40], relativamente ao método CONWEP, concluiu que a aplicação deste método pode ser razoável se for tido em consideração um fator de 2 a 3 no dimensionamento da carga.

Schwer [44], numa introdução ao acoplamento dos dois métodos referidos anteriormente, O método CONWEP é mais uma vez avaliado. Realizou uma simulação numérica para uma carga de 1.5 [kg] de TNT a uma distância de 3 [m], tendo-se observado um pico de pressão de aproximadamente 0.1 [MPa]. Schwer conclui que com o acoplamento de vários métodos pode-se tirar partido das vantagens que cada um proporciona e diminuir as respetivas desvantagens.



## Capítulo 3

# Simulador de Condução Dinâmica

Tal como abordado na secção 1.2, o PDDS é composto por uma cabine que recria o lugar do condutor através de uma réplica deste espaço assente sobre uma plataforma dinâmica que promove a sensação e estímulos de movimento ao condutor.

Este capítulo pretende abordar o que é o PDDS do ponto de vista técnico e fazer uma revisão bibliográfica do que são as plataformas do ponto de vista da Robótica de manipulação e o porquê da escolha deste tipo de manipuladores em detrimento de outros. Aborda, também, o enquadramento do trabalho realizado no seio da empresa ETI para o sistema de simulação, entidade de desenvolvimento deste projeto.

### 3.1 Descrição do sistema de simulação

O PDDS, como a própria designação indica, é um simulador do tipo dinâmico e tem em vista a imersão do utilizador num ambiente de realidade virtual cujo principal objetivo é tornar o ambiente virtual o tão próximo da realidade quanto possível. Para tal, é necessária a modelação de todos os fenómenos associados a esta atividade de modo a compreendê-los e ser possível replicá-los computacionalmente e num ambiente controlado. Para o fazer, o sistema de simulação encontra-se dividido em vários subsistemas, cuja respetiva numeração se encontra de acordo com a sua constituição:

1. Réplica da cabine de condução da viatura, figura 3.1;
2. Sistema de simulação da cinemática e dinâmica da viatura;
3. Sistema visual representativo do ambiente externo à viatura promovendo a perceção de distâncias, velocidades e reconhecimento visual de elementos naturais (exemplo terreno) e artificiais (exemplo sinalização);
4. Sistema de áudio que simula tanto sons gerados pela viatura como pelo ambiente externo a esta;
5. Plataforma dinâmica *Stewart* elétrica de seis graus de liberdade (6DOF) promovendo a sensação e estímulos de movimento ao condutor;

6. Estação de Instrutor que permite aos instrutores o controlo e monitorização das sessões de treino;
7. Estação de Trabalho de Edição que permite a criação de novos modelos e alteração de modelos tridimensionais de terreno existentes na bases de dados

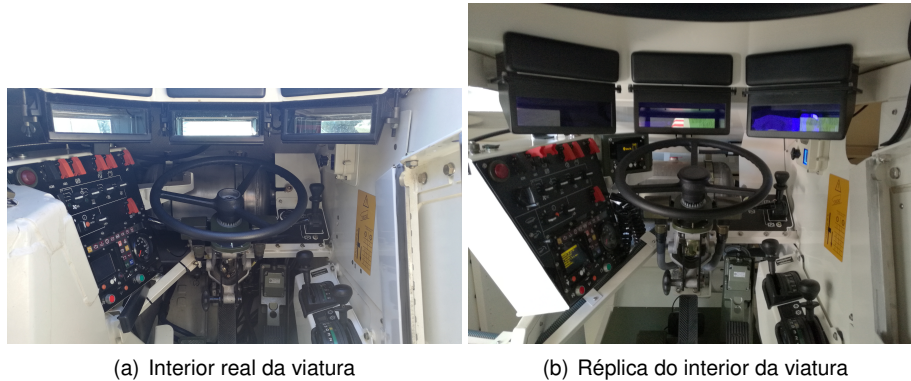


Figura 3.1: Fotografias do interior da VBR Pandur II e do interior do simulador.

Ao nível do projeto do sistema simulação, ou seja, da componente de simulação do PDDS, este é suportado por vários domínios da engenharia tendo em vista a que o objetivo final seja concretizado. Existe uma ligação do *software* desenvolvido para o sistema de simulação a todos os principais recursos de *hardware* interagindo a vários níveis com o sistema de treino através do controlo do comportamento da plataforma dinâmica, do processamento das dinâmicas de simulação, do processamento das entradas do utilizador e respetivas saídas dinâmicas, de saídas audiovisuais e da gestão de todo o fluxo de informação envolvida na simulação. O sistema caracteriza-se também por uma taxa de atualização de 60 [Hz], ou seja, para todos os fenómenos que se pretendam modelar é necessário ter em atenção este período de amostragem, na secção 3.3 é abordado novamente este aspeto.

O *software* do sistema de simulação é composto por vários módulos, a cada um deles é atribuída uma função específica. No entanto, é apenas feita referência ao módulo *Vehicle* dado que a contribuição do trabalho desenvolvido nesta dissertação para o PDDS é materializado neste módulo. O módulo *Vehicle* adquire importância no PDDS dada a finalidade do simulador (condução das VBR Pandur II), contendo um modelo detalhado da VBR Pandur II e dos seus sistemas com o objetivo de criar uma simulação realística da viatura. É, então, responsável pelo processamento de todas as funções específicas, características da viatura e do utilizador destas assim como da cinemática e dinâmica da viatura [46].

## 3.2 Plataforma de movimentos no PDDS

### 3.2.1 Plataformas *Stewart*

As plataformas Stewart (SP) na área da robótica, de acordo com definições comuns na literatura, classificam-se como sendo manipuladores paralelos, composto por uma plataforma de movimento



(*end-effector*) e uma base fixa sendo ligadas através de  $n$  pernas ou braços extensíveis (*arm*), juntas prismáticas. Pela definição, como estrutura paralela é um manipulador em *closed kinematic chain*. Embora um manipulador em série apresente uma área de trabalho (*workspace*) maior, manipuladores cinematicamente paralelos apresentam um melhor desempenho ao nível do grau de precisão, de elevadas velocidades ou acelerações e elevada rigidez estrutural quando comparados com manipuladores em *open kinematic chain* [47]. É assim justificado o emprego deste tipo de manipuladores em indústrias que exijam elevadas velocidades e rigidez estrutural, tais como em sistema de simulação de voo ou de condução e aplicações médicas [48].

As SP apareceram na comunidade científica inicialmente em 1965 [49] dadas pelo nome do seu autor, D. Stewart [50], com o objetivo de desenvolver condições de simulação de voo nas quais se pudessem recriar e controlar todos os DOF a que um corpo no espaço se encontra sujeito. Dessa forma projetou um mecanismo com 6 DOF controlados por 6 motores permitindo que a plataforma de movimento seja capaz de se movimentar nas 3 direções lineares ( $x, y, z$ ), em 3 direções angulares (*roll, pitch, yaw*) ou em qualquer combinação destas. Uma representação do seu mecanismo encontra-se na figura 3.2. Por sua vez, V. E. Gough em 1962 já tinha criado um mecanismo idêntico mas para o teste de pneus [51]. Ao longo dos anos, muitas variantes deste tipo de manipuladores foram introduzidos com diferentes formas. Em 2005, Gao no seu artigo [52], baseando-se nos mecanismos projetados por Stewart e por Gough, introduz uma definição de Plataforma Generalizada de Gough-Stewart (GSP) como sendo um manipulador paralelo composto por dois corpos rígidos ligados por 6 constrangimentos de distâncias e/ou ângulos entre seis pares de pontos, linhas, e/ou planos na base e na plataforma de movimento, respetivamente. Considerando ser a forma mais geral de manipuladores paralelos com 6 DOF, demonstrou como realizar o seu projeto usando combinações diferentes de juntas de revolução, prismáticas, cilíndricas, esféricas e planas.

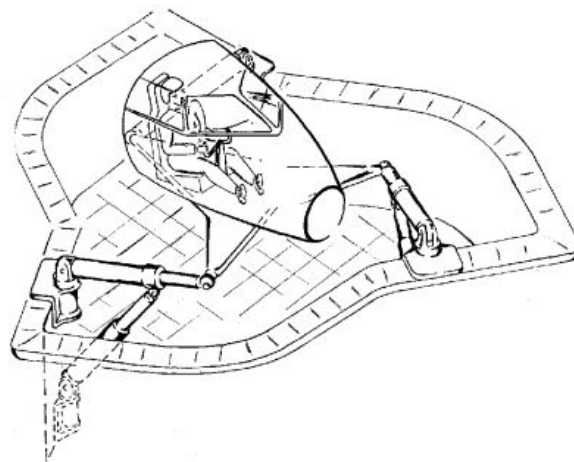


Figura 3.2: Ilustração de uma plataforma *stewart* [50].

### 3.2.2 Sistema de movimento

Tal como apresentado na secção 3.2.1, devido à suas características em termos de rigidez estrutural e capacidades dinâmicas, o sistema escolhido para transmitir a sensação de movimento ao condutor no PDDS foi um manipulador robótico do tipo plataforma *Stewart*. Sendo a selecionada para o PDDS a *eMotion-1500-6DOF-650-MK1* da REXROTH, figura 3.3. É uma plataforma com uma configuração triangular e com seis atuadores lineares acionados eletricamente que atribuem a capacidade de desenvolver os seis graus de liberdade (6DOF). A tabela 3.1 ilustra as capacidades gerais que a plataforma oferece para a posição inicial em "neutra" e para a carga projetada.



Figura 3.3: Plataforma dinâmica Rexroth [53]

Tabela 3.1: Características gerais da plataforma eMotion-1500 da REXROTH

Características		Observações
Carga suportada	1500 kg	
Curso dos atuadores	650 mm	
Momentos principais de inércia:		
$I_{xx}$	2000 kg.m <sup>2</sup>	Relativo ao CG da carga
$I_{yy}$	2000 kg.m <sup>2</sup>	
$I_{zz}$	2000 kg.m <sup>2</sup>	
Altura em operação	1.256 m (+/- 2mm)	
Distância do CG a cima da parte superior da plataforma	1.00 m	

A plataforma, integrada no sistema de movimento, é um subsistema que materializa a sensação e estímulos de movimentos necessários à geração da realidade virtual. O sistema de movimento é composto também por um *software* de interface e um controlador. A figura 3.4, ilustra a integração do sis-

tema de movimentos no sistema de simulação. O sistema de simulação envia uma série de informações à plataforma, nomeadamente, acelerações lineares e angulares, *attitude/pose* da viatura, localização do condutor em relação à plataforma, entre outra informação sobre determinados eventos que possam ocorrer durante a simulação que seja necessária a geração de movimentos. As acelerações lineares e angulares, são calculadas pelo sistema de simulação de acordo com a dinâmica da viatura, função principal do módulo *Vehicle Dynamics*, e enviadas para a plataforma.

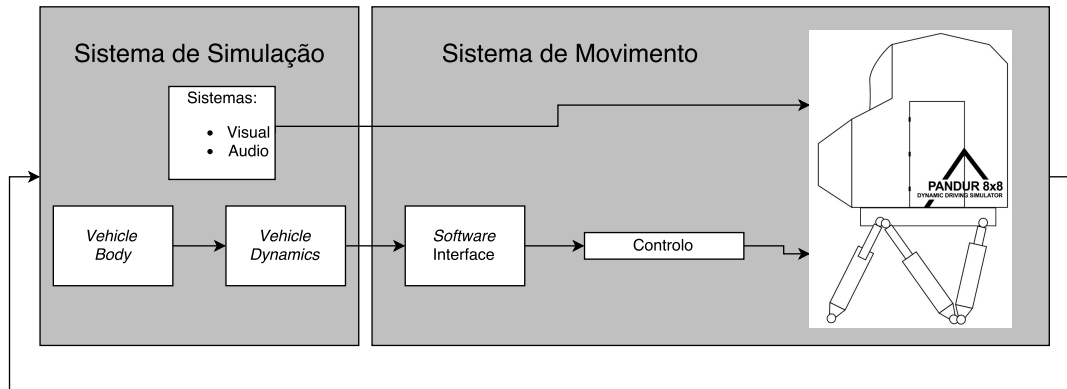


Figura 3.4: Ilustração do sistema de movimentos no sistema de simulação, adaptado [53].

A plataforma de movimentos, através do *software* próprio instalado no seu CPU, processa os valores nominais calculados pelo sistema de simulação e gera novos valores para os atuadores reproduzirem os movimentos pretendidos, ou seja, recebe informação da dinâmica da viatura do sistema de simulação e traduz numa nova dinâmica para a plataforma. Apesar do sistema de controlo ser uma caixa negra, ou seja, não se tem acesso ao sistema de controlo implementado pela REXROTH de modo a compreender-se o seu funcionamento, é através do *software* de interface do sistema de simulação que se podem alterar os valores do controlo da plataforma por forma a que a resposta desta a um determinado impulso de entrada seja a pretendida.

Nos parágrafos seguintes é abordada a calibração da plataforma para o PDDS, os princípios por detrás dessa calibração e que tipo de valores e dados se podem introduzir no *software* para se adequar a resposta da plataforma à dinâmica sentida pelo condutor da viatura.

### ***Motion cueing classical Algorithm***

A calibração da plataforma dinâmica foi uma fase importante do projeto PDDS, não só por questões de segurança ou por questões relacionadas com o ciclo de vida dos materiais, mas pelo facto de ser a transmissão de sensação de movimento um fator determinante na geração de um estímulo o mais perto da realidade possível, objetivo principal do PDDS. Assim sendo, pretende-se aproveitar da melhor forma a dinâmica proporcionada por este tipo de plataformas. Por exemplo, numa elevada aceleração linear na viatura durante uma condução normal poderia levar a plataforma a atingir os limites de deslocamento dos atuadores, num primeiro momento a sensação de movimento até pode ser a correta mas, durante a condução, novas atitudes da viatura serão impostas pelo sistema de simulação, logo, os movimentos sentidos pelo condutor tornar-se-iam de alguma forma estranhos. Portanto, a calibração é importante

dado ser necessária existência de um compromisso entre uma atitude correta da plataforma e os limites desta, ou seja, é pretendido que a sensação de movimento seja a mais real possível sem que os limites dos atuadores sejam alcançados.

O processo de calibração da plataforma é iniciado com a introdução dos dados relativos à localização do condutor. Tal como referido nos parágrafos anteriores, o módulo *Vehicle Dynamics* do sistema de simulação gera a dinâmica da viatura, por sua vez, o sistema de movimentos traduz essa dinâmica em resposta da plataforma, para tal é necessário definir-se o ponto para o qual se pretende que a plataforma transmita a dinâmica que é sentida pelo o condutor. Na figura 3.5 encontram-se ilustrados os pontos de o centro de rotação dos movimentos (MRC) para o qual se pretende transmitir a sensação de movimento correta, ou seja, a posição do condutor e o ponto de referência da plataforma.

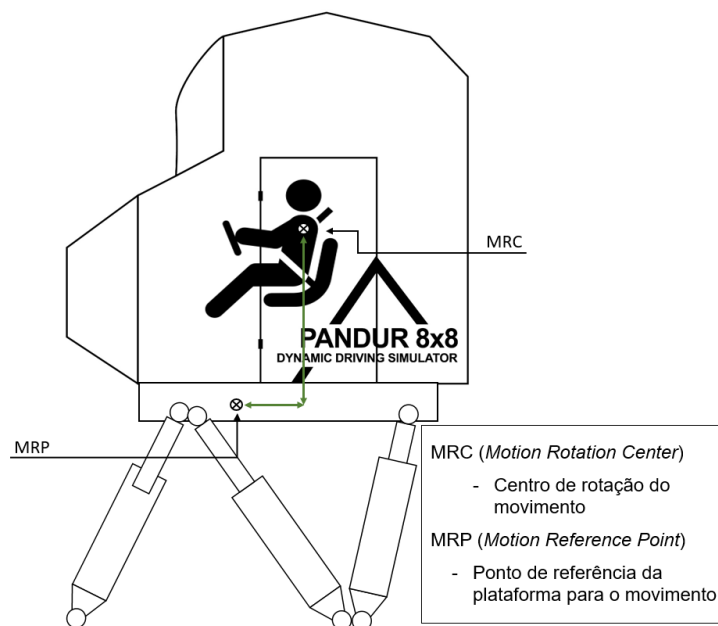


Figura 3.5: Pontos de referência da localização do condutor para a plataforma, adaptado de [53].

Tal como referido anteriormente, o acesso a informações relativas ao tipo de controlador da plataforma é restrito, no entanto foi disponibilizada informação sobre o princípios adotados para a calibração.

Considere-se um sinal de entrada de uma aceleração no sentido do eixo dos  $xx$  ou  $yy$ , esta é sentida pelo condutor como uma translação linear no mesmo sentido e uma rotação em torno do eixo contrário, *pitch* ou *roll*, a figura 3.6 ilustra o sistema de eixos utilizado. O sinal de entrada é então dividido em duas partes: uma parte definida como sendo de "Alta Frequência", utilizada para a parte de deslocamento linear da plataforma em  $x$  ou  $y$ ; outra parte como sendo de "Baixa Frequência", utilizadas para as rotações em *pitch* e em *roll*. Note-se ainda que é necessária uma integração no tempo de modo a passar de um sinal de entrada de aceleração para uma resposta em deslocamento da plataforma.

Relativamente a uma aceleração segundo  $zz$ , esta é sentida pelo condutor apenas como uma translação neste eixo, portanto, é definida uma única parte de "Alta Frequência". Recorrendo ao mesmo princípio que as acelerações lineares em  $xx$  e em  $yy$ .

Em suma, a figura 3.7 ilustra o processo de calibração da plataforma para cada um dos seis graus

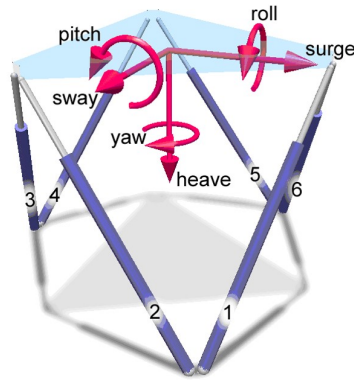


Figura 3.6: Sistema de eixos da plataforma [53].

de liberdade em termos de sinais de entrada (aceleração) e a resposta da plataforma (deslocamento). A definição das frequências de corte destes filtros permite ajustar a dinâmica da plataforma para aquilo que é esperado ao nível da sensação de movimento por parte do condutor. É necessário ainda ajustar também limitadores e ganhos, dependendo da função. Podem ser definidos ganhos em função da velocidade da viatura com o objetivo de se reduzir o "kick back"(solavanco) quando a viatura pára após uma travagem, ou seja, quando a velocidade se aproxima de zero o ganho é reduzido.

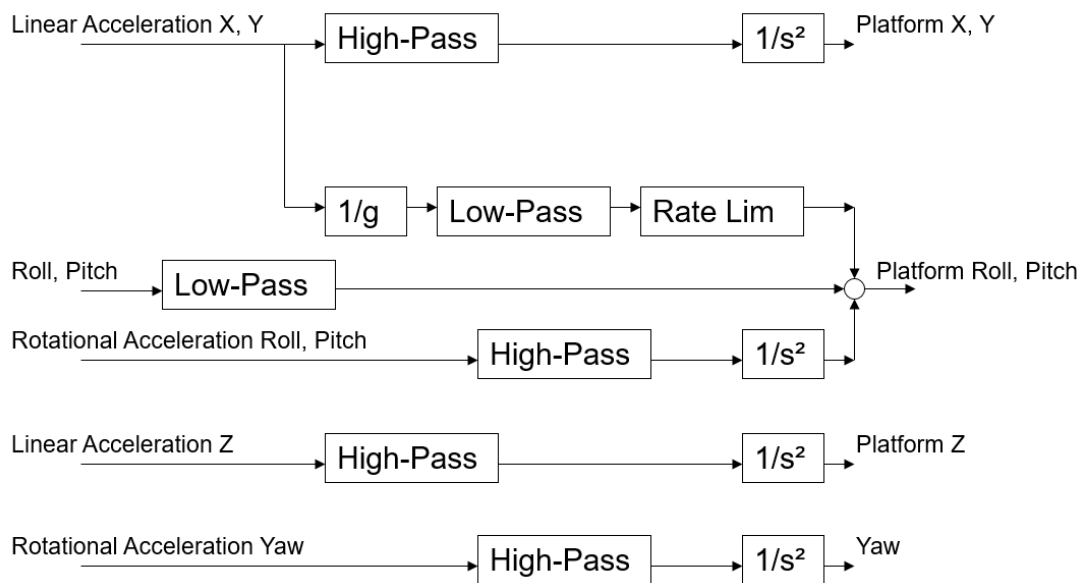


Figura 3.7: Motion cueing classical algorithm [53]

Como literatura complementar e análise mais profunda ao algoritmo *Motion cueing*, pode ler-se [54, 55].

### 3.3 Integração do evento "Detonação de Minas" no PDDS

Esta secção tem como objetivo explicar e descrever o passos seguidos para a implementação do fenómeno em estudo, permitindo recriar a simulação virtual do evento o mais próxima da realidade

possível. São abordados os princípios utilizados, as dificuldades e as soluções propostas para se resolver o problema.

A simulação de forças exercidas na viatura é da responsabilidade do módulo *Vehicle Body*. Este recebe informação provenientes de outras classes e envia os valores das forças e dos momentos resultantes, em cada DOF ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ) aplicados no CG da viatura, para o módulo *Vehicle Dynamic*. Este último traduz todos os dados recebidos em acelerações lineares e angulares, igualmente para cada um dos DOF.

A onda de choque proveniente da detonação de uma mina produz uma variação de pressão muito elevada num curto espaço de tempo. Este fenómeno provoca uma resultante de forças e momentos aplicados no CG da viatura. O acontecimento descrito, conjugado com a arquitetura do sistema de simulação, leva a que o objetivo de implementação do fenómeno em análise seja o cálculo da resultante das forças e momentos no corpo da viatura, *vehicle body*, para depois a *vehicle dynamic* poder calcular a resposta dinâmica da viatura e, assim, todo o sistema de simulação possa recriar o comportamento desta virtualmente, nomeadamente o sistema visual e o sistema de movimento.

Concluindo-se, portanto, que o ideal seria obter a resultante das forças e momentos aplicados no lugar do condutor. Contudo, por questões relacionadas com a construção do modelo numérico, seria desejado obter a resultante no CG da viatura a partir do *software* de elementos finitos, de modo a que os valores destes ao longo do tempo possa ser providenciados ao *vehicle dynamic*. Contudo, esta obtenção de resultados, pelo menos de forma sistemática, não foi possível. Por outro lado, é possível guardar os valores das forças em cada nó na direção de cada eixo. Ainda assim, as amplitudes dos vetores teriam de ser seleccionadas uma a uma para cada orientação nos três eixos, tornando-se num procedimento ineficiente.

A solução encontrada para resolver o problema foi a de se dividir o casco da viatura em dez secções diferentes e considerar uma força equivalente por cada uma destas. Reduz-se, assim, o número de nós necessários a seleccionar e guardar os respetivos dados. A amplitude dessa força equivalente deverá ser a força de um determinado nó multiplicada pelo número de nós existentes naquela secção.

Para tal, dividiu-se, então, o casco da viatura em 10 partes. Na figura 3.8 encontra-se ilustrada uma possível solução para resolver o problema.

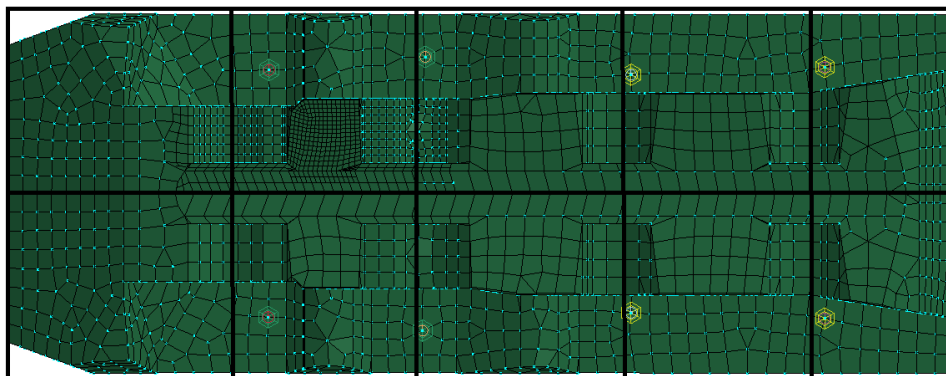


Figura 3.8: Ilustração da solução encontrada para a resultante das forças e dos momentos.

Outra questão pertinente está relacionada com a taxa de atualização do sistema. Ou seja, a frequência do sistema de simulação, em termos ideais, deverá coincidir com o tempo de amostragem das simulações numéricas. Isto para que o *Vehicle Dynamic* processe toda a informação que lhe é enviada. Por outras palavras, se se verificar que a variação de uma força se dá num intervalo de tempo inferior a 16 milissegundos, tempo de amostragem do sistema de simulação, o módulo *Vehicle Dynamics* não terá precisão suficiente para reproduzir a dinâmica da viatura.

No capítulo 5, serão apresentados os resultados obtidos pelas simulações numéricas, sendo abordado o tempo de amostragem das mesmas, assim como o intervalo de tempo em que os fenómenos ocorrem. É feita uma discussão dos resultados obtidos por forma a justificar a sua empregabilidade no simulador final.

O modelo dinâmico implementado no sistema de simulação encontra-se de acordo com o sistema de eixos representados na figura 3.9. A definição do sistema de eixos será muito importante na medida em que a análise dos resultados obtidos nas fases de simulação numérica deverá estar coerente de acordo com os referenciais utilizados, de modo a poderem ser comparados com os dados lidos do sistema de simulação.

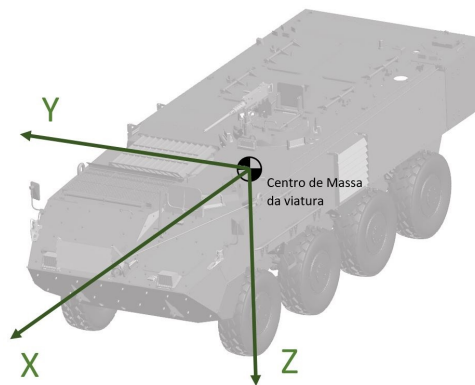


Figura 3.9: Sistema de eixos utilizados pelo Sistema de Simulação.





## Capítulo 4

# Modelação e Análise Numérica

A abordagem ao problema em análise foi realizada em dois momentos distintos.

Num primeiro momento, é conduzido um estudo dinâmico da viatura com o objetivo de identificar os elementos envolvidos e interpretar a ordem de grandeza de determinados valores inerentes ao trabalho desenvolvido, nomeadamente, valores associados ao deslocamento vertical e angulares no CG da viatura. É apresentada a abordagem realizada ao problema e uma possível solução teórica.

Numa segunda parte, expõe-se a metodologia implementada nas simulações numéricas, descrevendo as fases necessárias à construção do modelo pretendido. Esta análise numérica foi dividida nas seguintes fases:

1. Viatura fixa de geometria elementar;
2. Viatura livre de geometria elementar;
3. Viatura livre de geometria detalhada;

O sistema de unidades apresentado ao longo da análise elaborada é o sistema SI. No entanto, derivado da metodologia seguida nas simulações numéricas, estas, por vezes, podem ser apresentadas num sistema diferente. Contudo, existe coerência nas mesmas ao longo da exposição dos modelos e respetivos resultados.

### 4.1 Estudo da dinâmica da viatura

A abordagem à análise do comportamento da viatura iniciou-se por uma modelação da dinâmica vertical da viatura, sendo um estudo que passa, portanto, pela formulação de um problema de modelação de um sistema mecânico. Este é materializado pela viatura VBR Pandur II e os subsistemas de movimento que a compõem, nomeadamente, a suspensão.

Tal como referido, o sistema que se pretende modelar pode ser simplificado num sistema mecânico a três dimensões. A figura 4.1 ilustra o sistema, apresentando o referencial utilizado e os elementos típicos de um sistema mecânico: molas, massas e amortecedores. Tem-se, portanto: a massa da viatura  $M$  [kg]; a massa das rodas  $m_i$  [kg]; coeficientes de elasticidade para molas  $k_i$  [N/mm]; coeficientes

de amortecimento  $c_i$  [N.s/mm]; deslocamento angular  $\varphi$  [rad] em torno de  $xx$ ; deslocamento angular  $\theta$  [rad] em torno de  $yy$ . Na figura 4.1(b), para os índices dos deslocamentos verticais representa-se:  $T$  para o terreno;  $P$  para o pneu;  $V$  para a viatura;  $k_p$  para a constante de rigidez do pneu.

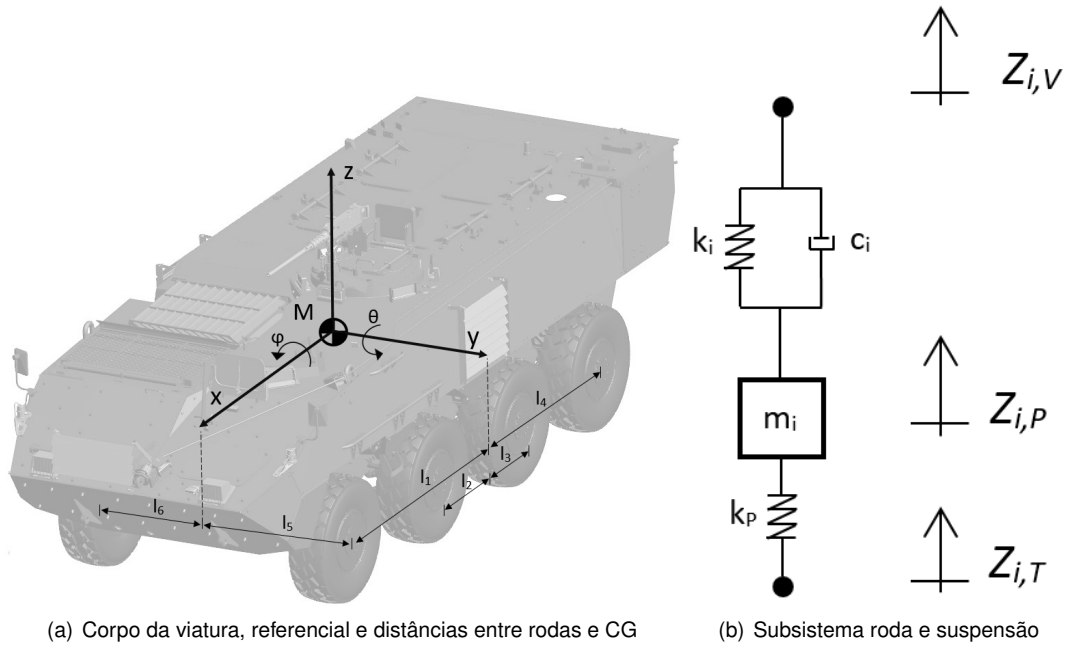


Figura 4.1: Modelo do sistema mecânico.

Considere-se como variáveis de fluxo a força  $F$  [N] e o momento  $J$  [N-mm], como variáveis potencial a velocidade linear  $\dot{z}$  [mm/s] e as velocidades angulares  $\dot{\theta}$  e  $\dot{\varphi}$  [rad/s]. Como entrada do sistema tem-se a força  $F_E$  [N], aplicada num ponto  $(x, y)$  do corpo da viatura, representativa da explosão de uma mina. Para a saída do sistema tem-se as posições e acelerações do CG da viatura: linear,  $z$  [mm] e  $\ddot{z}$  [mm/s<sup>2</sup>]; angulares,  $\theta$  e  $\varphi$ ,  $\ddot{\theta}$  e  $\ddot{\varphi}$  [rad/s<sup>2</sup>].

O balanço das forças  $F_i$  aplicada em cada ponto do acoplamento dos componentes mola e amortecedor no chassis da viatura, num total de oito subsistemas representativos das oito rodas, é descrito na equação (4.1).

$$F_i = F_{k_i} + F_{c_i} \quad (4.1)$$

Em que  $F_{k_i}$  representa a força aplicada em cada mola e  $F_{c_i}$  a força aplicada em cada amortecedor para  $i \in [1, 2, 3, \dots, 8]$ .

Pela figura 4.1(b), define-se, então, o balaço de forças em cada roda:

$$m_i \ddot{z}_{i,p} = -F_i + k_p(z_{i,T} - z_{i,p}) \quad (4.2)$$

Dada a não linearidade dos elementos que compõem a suspensão da viatura, anexo ??, as relações constitutivas para cada uma das 8 molas vêm dadas pelas expressões (4.3). Considerando-se os seguintes parâmetros :  $k_c$  a constante de rigidez à compressão e  $k_r$  a constante de rigidez à tração , isto é, no ressalto da viatura (se  $k_r = k_c = 0$ , considera-se que a mola é linear). Os parâmetros  $\Delta u_r$ ,

$\Delta u_c$  vêm dados pelas expressões (4.4). As constante  $n$  e  $k_{\text{off}}$  vêm dadas pelo ajuste da curva da rigidez da mola.

$$F_{k_i}(u) = F_{k_i}^0 + \begin{cases} k_0 \cdot u \left( 1 + k_r \left( \frac{u}{\Delta u_r} \right)^2 + k_{\text{off}} \right) & , u < 0 \\ k_0 \cdot u \left( 1 + k_c \left( \frac{u}{\Delta u_c} \right)^2 + k_{\text{off}} \right) & , u \geq 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\begin{cases} \Delta u_r = \frac{u_{r\text{MAX}}}{n} \\ \Delta u_c = \frac{u_{c\text{MAX}}}{n} \end{cases} \quad (4.4)$$

O deslocamento  $u$ , entre os pontos de contacto da suspensão entre o chassis e as rodas, vem dado por:

$$u = z_{i,P} - z_{i,V} \quad (4.5)$$

O termo  $F_{k_i}^0$  representa a componente do peso da viatura correspondente a cada acoplamento:

$$\sum_{i=1}^8 F_{k_i}^0 = Mg \quad (4.6)$$

No caso dos amortecedores, as relações constitutivas vêm dadas por:

$$F_{c_i}(v) = \begin{cases} \frac{c_0 v}{1 - c_r v} & , v < 0 \\ c_0 + c_1 v + c_2 v^2 + c_3 v^3 + c_4 v^4 + c_5 v^5 & , v \geq 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

Com  $v$  dado por (4.8), em que  $c_0$  é constante de amortecimento para  $v = 0$ .

$$v = \dot{z}_{i,P} - \dot{z}_{i,V} \quad (4.8)$$

E as constantes  $c_j$  com  $j \in [1, 2, 3, 4, 5]$  vêm dadas pelo ajuste da curva de amortecimento.

Fazendo o equilíbrio de forças e momentos ao corpo da viatura obtêm-se as seguintes equações:

$$M\ddot{z} = \sum_{i=1}^8 F_{k_i} + \sum_{i=1}^8 F_{c_i} - M \cdot g + F_E = \sum_{i=1}^8 F_i - M \cdot g + F_E \quad (4.9)$$

$$I_{yy}\ddot{\theta} = l_1 \sum_{i=1}^8 F_i + l_2 \sum_{i=1}^8 F_i - l_3 \sum_{i=1}^8 F_i - l_4 \sum_{i=1}^8 F_i - l_{E_x} \cdot F_E \quad (4.10)$$

$$I_{xx}\ddot{\varphi} = l_5(F_1 + F_3) + l_7(F_5 + F_7) - l_6(F_2 + F_3) - l_8(F_6 + F_8) + l_{E_x} \cdot F_E \quad (4.11)$$

Os deslocamentos em cada roda  $z_{i,V}$  podem-se relacionar com o deslocamento do corpo da viatura  $z$  da seguinte forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} z_{1,V} = z - l_1 \sin \theta + l_5 \sin \varphi \\ z_{2,V} = z - l_1 \sin \theta - l_6 \sin \varphi \\ z_{3,V} = z - l_2 \sin \theta + l_5 \sin \varphi \\ z_{4,V} = z - l_2 \sin \theta - l_6 \sin \varphi \\ z_{5,V} = z + l_3 \sin \theta + l_5 \sin \varphi \\ z_{6,V} = z + l_3 \sin \theta - l_6 \sin \varphi \\ z_{7,V} = z + l_4 \sin \theta + l_5 \sin \varphi \\ z_{8,V} = z + l_4 \sin \theta - l_6 \sin \varphi \end{array} \right. \quad (4.12)$$

## 4.2 Simulações numéricas

Esta secção pretende dar a conhecer e demonstrar o processo de simulação e a sistematização da construção do modelo numérico com recurso à ferramenta computacional LS-DYNA®

### 4.2.1 Sistematização e plano de ensaios

A modelação dos eventos que se pretende analisar, nomeadamente a detonação de minas, encontra-se representados na figura 4.2. Tal como ilustrado, pretende-se obter resultado da detonação de uma carga de 6 [kg] de TNT localizada após a passagem da roda esquerda do primeiro eixo, ou seja, sob o lugar do condutor da viatura. A escolha da massa da carga explosiva resulta da prevista pelo fabricante, ver anexo A.1, como sendo aquela cuja explosão não causará danos à guarnição da viatura, STANAG 4569 [3].



Figura 4.2: Representação dos fenómenos em análise.

Pelos trabalhos anteriormente realizados, expostos na secção 2.4.2, pode observar-se que o modelo empírico CONWEP é amplamente utilizado pela comunidade científica no toca ao tema desta dissertação, nomeadamente o recurso à ferramenta implementada no LS-DYNA®, ou seja, à análise

dos efeitos produzidos por minas AC. Assim, pela sua considerável aplicabilidade e aceitação na comunidade científica justifica-se o recurso a este modelo. Sendo este implementado através da *keyword* \*LOAD\_BLAST\_ENHANCED. Devido ao facto da licença disponibilizada do *software* LS-DYNA não permitir a aplicação de equações de estado (o que seria possível utilizando as \*EOS), ou seja, não permite a construção de outros modelos como ALE ou um acoplamento deste com o CONWEP, como é caso dos trabalhos desenvolvidos por Tabatabaei and Volz [43], Brill et al. [40] e Larsen and Jorgensen [41], cuja referência se encontra na secção 2.4.2, não se realizaram simulações numéricas para estes casos com o objetivo de se comparar vários métodos. Contudo, devido ao objetivo final desta dissertação, que é a implementação dos resultados obtidos pelas simulações numéricas no PDDS, o método CONWEP apresenta resultados consideráveis e suficientes para o efeito pretendido.

A construção e elaboração do modelo numérico para o problema que se pretende estudar foi realizada de forma gradual, ou seja, o nível de complexidade do modelo projetado foi sendo incrementado por etapas, podendo-se assim identificar duas fases distintas.

### **Viatura de geometria elementar**

Numa primeira fase é feito uma abordagem ao problema com uma geometria tridimensional da viatura elementar e respetivos elementos e características aproximadas, subdividindo-se em dois ensaios. No primeiro ensaio fixou-se a viatura no espaço atribuindo-se condições de fronteira por forma a restringir qualquer deslocamento nos 6 DOF. Dado o intervalo de tempo que os fenómenos em análise ocorrem, menor que 1.5 [s], o objetivo deste primeiro ensaio é poder-se aferir o tempo de amostragem dos valores de saída e o fator de escala associado ao período de processamento<sup>1</sup>. Não existe, assim, a necessidade de se modelar a suspensão da viatura e o solo, reduzindo o número de partes e elementos no modelo para minimizar o tempo de compilação do projeto. Neste primeiro ensaio é possível isolar, observar e interpretar a distribuição de pressão ao longo do casco da viatura. No segundo ensaio, com os valores associados ao controlo e base de dados definidos, integrou-se a suspensão da viatura e analisou-se o comportamento dinâmico desta, não havendo qualquer restrição para o corpo da viatura nos 6 DOF.

### **Viatura de geometria detalhada**

Na segunda fase, recorreu-se à metodologia apreendida da primeira fase, contudo, agora num só ensaio, utilizou-se uma geometria detalhada do casco da viatura assim como as propriedades dos elementos o mais aproximado da realidade possível.

## **4.2.2 Viatura de geometria elementar**

O processo de construção do modelo foi iniciado com um modelo da viatura com uma geometria elementar, tendo em vista o referido anteriormente, ou seja, por forma a compreender-se o funcionamento

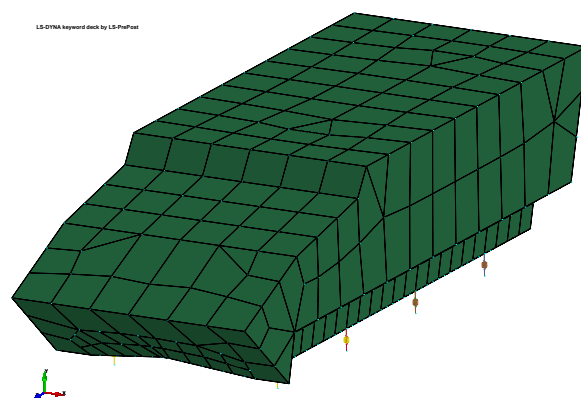
---

<sup>1</sup>Existem dois intervalos de tempo distintos a definir-se no LS-DYNA: tempo de amostragem para os dados de saída e tempo de simulação em que o *software* executa os cálculos durante o processamento do projeto.

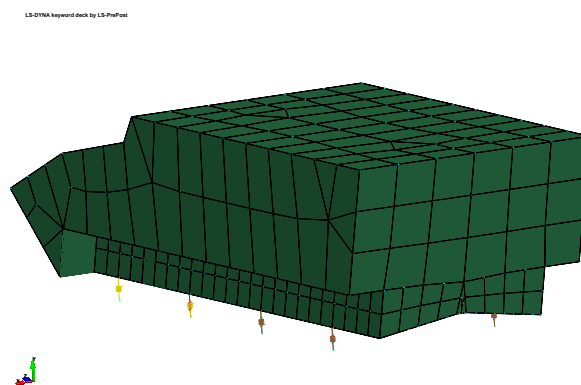
do *software* nas suas três fases: 1) *pre-processor*; 2) *LS-DYNA Program Manager*; 3) *post-processor*.

Nesta primeira abordagem ao problema, pretende-se identificar os elementos a representar e definir o processo para a modelação de modo a tornar o processo de identificação de erros de compilação o mais célere possível em termos de tempo de CPU gasto em processamento e cálculo computacional, ou seja, pretende-se com esta fase compreender o funcionamento do programa e identificar as áreas de modelação, nomeadamente as *Keywords* a utilizar que requerem maior atenção, bem como o tipo de controlos (\*CONTROL e \*DATABASE) que é necessário fazer para quando se implementar um modelo mais detalhado não ocorram erros de compilação dado que o tempo de CPU necessário será muito superior.

Na fase de pré-processamento, foi construída uma representação da viatura numa geometria elementar e procurou-se discretizar o modelo numa malha representada pelo menor número de elementos possível, figura 4.3. Contudo, na fase de desenho, procurou-se garantir concordância com as medidas gerais da viatura, ver figura 1.3. Na fase de discretização, devido aos cálculos numéricos do modelo CONWEP e ao tempo reduzido em que o fenómeno ocorre, verificou-se a necessidade de refinar a malha na zona do casco da viatura para se poder obter os resultados pretendidos.



(a) Pespctiva da frente da viatura



(b) Pespctiva da retaguarda da viatura

Figura 4.3: Modelo de geometria simples e discretização da primeira abordagem.

Para além do modelo discretizado, é necessário definirem-se outros elementos inerentes à física do problema, tais como: corpo da viatura, efeito da gravidade, onda de choque derivada da explosão,

propriedades dos materiais, entre outras. E ainda é necessário que se definam outros aspetos relacionados com os cálculos numéricos, tais como: tempo de simulação, tipo de dados que se pretende que fiquem guardados e respetivo tempo de amostragem dos valores de saída, fator de incrementação entre os cálculos numéricos, entre outros. Nos próximos parágrafos são descritas as as *keywords* criadas para tais elementos e propriedades do cálculo numérico.

## Corpo da Viatura

Para o LS-DYNA identificar o corpo da viatura como sendo uma *part* é necessário definir-se esta como tal, assim sendo, a *keyword* \*PART.PART executa essa função, no entanto é necessário atribuírem-se mais informações: secção e material. A secção (\*SECTION) define a existência de uma malha do tipo *shell*, \*SECTION\_SHELL. Para se atribuir as propriedades de um determinado material, recorre-se à *keyword* \*MAT. Para o material que compõe o corpo da viatura definiu-se um \*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC amplamente utilizado para se definirem aços, como é o caso do material que compõe a grande maioria da blindagem da viatura. As características do material foram retiradas do relatório técnico de Nilsson [56] e do artigo publicado por Swierczewski *et al.* [57].

Para se definir o centro de gravidade, a massa e os principais momentos de inercia do modelo próximos da viatura real recorreu-se à opção *Mass Trimming* do separador *Element and Mesh*. Deste modo foi possível distribuir pelos nós da malha a massa necessária para perfazer os 18000 [kg] da viatura real e assegurar que o centro de massa seja o mesmo relativamente às coordenadas da viatura real. Este método atribui um valor de massa a cada nó de forma automática pela *keyword* \*ELEMENT.MASS.

## Suspensão da Viatura

Uma técnica utilizada para a criação de *parts* (\*PART) do tipo mola e amortecedor é a criação de elementos discretos utilizando a *keyword* \*ELEMENT\_DISCRETE, figura 4.4, para tal definem-se secções discretas (\*SECTION\_DISCRETE) entre dois pontos.

Os coeficientes de elasticidade da mola  $k_i$  e de amortecimento dos amortecedores  $c_i$  são definidos como material, com recurso às *keyword* \*MAT\_SPRING\_ELASTIC e \*MAT\_DAMPER\_VISCOUS, respetivamente.

Para não existirem erros ao correr o modelo é necessário ainda definir um valor de massa nos nós que compõem a suspensão, isto é, não deverão existir nós sem massa quando se utilizam elementos discretos. Assim sendo, definiu-se uma massa de 1 [kg] para o nó que faz tanto parte da suspensão como do chassis viatura (massa consideravelmente pequena relativamente à massa da viatura). Para o ponto que fica livre e em contacto com o solo, definiu-se uma massa de 200 [kg] de modo a recriar o peso correspondente às rodas da viatura, 150 [kg] [10], mais os elementos agregados a esta como é o caso da própria suspensão.

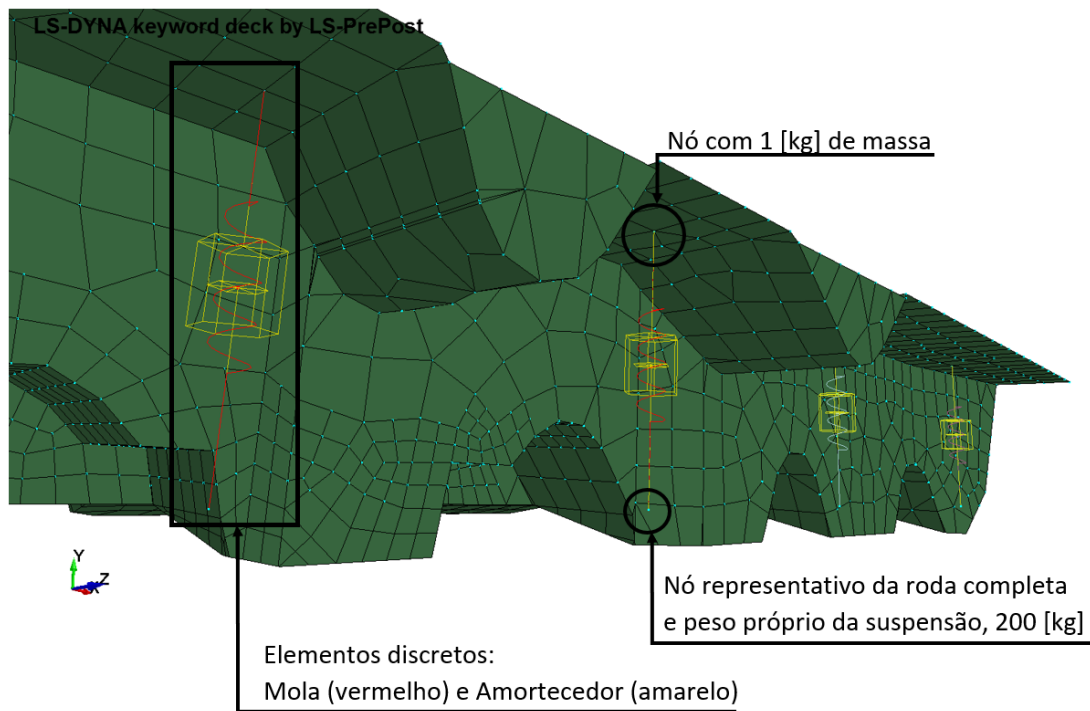


Figura 4.4: Ilustração da suspensão na geometria da viatura detalhada.

### Aceleração da Gravidade

A aceleração da gravidade é introduzida no modelo com a recurso à *keyword* `*LOAD.BODY_Y`, sendo já predefinido a direção do vetor de aceleração. Esta *keyword* requer a introdução de uma curva, definindo-se em `*DEFINE_CURVE`, e a introdução de um fator multiplicativo dessa curva. A curva consiste na criação de um gráfico de variação aceleração em função do tempo, sendo boa prática definir-se um valor de magnitude constante de 1 para a aceleração e o ajuste para os  $9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$  através do fator.

### Detonação do Explosivo

O método CONWEP, modelo escolhido para a geração de uma onda de choque provocada pela detonação de um explosivo, é implementado através de `*LOAD.BLAST.ENHANCED`. Esta *keyword* permite que sejam introduzidos os dados relativos ao explosivo: massa equivalente de TNT, ver tabela 2.1; localização da carga; ativação de cálculos associados tanto ao sistema de unidades, que se pretende coerente, assim como das equações que o LS-DYNA processará durante os cálculos, ver secção 2.3.1.

### Solo

De forma colocar a viatura assente numa superfície, procurando representar o solo, definiu-se uma `*RIGIDWALL`. Esta *keyword* permite determinar a existência de uma superfície rígida definindo-se uma condição de fronteira, ou seja, a existência de contacto entre os nós da suspensão (rodas) e a superfície rígida (solo) limitando o deslocamento da viatura devido à aceleração da gravidade.



## Condições de Fronteira

Foram criadas condições de fronteira, para o primeiro ensaio, que não permitissem o movimento da viatura, ou seja, definiu-se que a viatura se encontra fixa em cada uma das três direções no espaço ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ) assim como não existe rotação em torno dos três respetivos eixos. Ao nível do *software*, estas condições de fronteira são definidas em *Model and Part - Create Entity - Boundary - SPC* e selecionam-se os referenciais que se pretende que sejam constrangidos, sendo que neste caso selecionaram-se todos as 6 possíveis.

## Controlo e Base de Dados

As *keywords* \*CONTROL e \*DATABASE são a base da simulação no LS-DYNA®, sendo necessário: receber a indicação de quando termina a simulação, \*CONTROL\_TERMINATION; qual o fator de escala associado intervalo de tempo de processamento, \*CONTROL\_TIMESTEP (para fenómenos de explosão é indicado utilizar-se um fator de 0.6 ou 0.67); o tempo de amostragem para os dados que se pretendem guardar, \*DATABASE\_BINARY\_D3PLOT para guardar dados relativos à cinemática do problema, \*DATABASE\_BINARYBLSFOR para guardar dados relativos à detonação do explosivo. Contudo, são necessárias outras ações associadas ao controlo (durante a compilação) e base de dados (valores de saída) para que os resultados obtidos sejam os pretendidos.

### 4.2.3 Viatura de geometria detalhada

Numa segunda fase, como referido anteriormente, procurou-se modelar o problema de uma forma detalhada, passando por uma implementação correta da geometria da viatura, nomeadamente, o casco. Para tal, a partir de dados geométricos da viatura com maior detalhe, trabalhou-se a informação disponibilizada [58], com recurso à ferramenta de desenho computacional SOLIDWORKS®, projetando-se um modelo CAD da viatura de modo a que seja possível discretizar no LS-PrePost, figura 4.5. Contudo, procurou-se um compromisso entre aproximação à realidade e a minimização do tempo gasto de processamento computacional. Tendo o desenho do modelo apenas um nível de detalhe necessário e suficiente, mantendo as medidas e configuração do casco reais.

Tal como na primeira abordagem, secção 4.2.2, para além da discretização do modelo, no LS-PrePost são definidas: as propriedades dos materiais; as condições de detonação do explosivo; condições de fronteira; criação dos elementos discretos para a suspensão com a definição das respetivas propriedades; definição dos demais elementos que influenciam o fenómeno em análise. O código contendo parte da informação do modelo implementado e gerada pelo *software* encontra-se no anexo C.

Nesta segunda abordagem é necessário introduzir-se a não linearidade presente na suspensão da viatura. A definição da linearidade dos respetivos coeficientes é definida pela \*DEFINE\_CURVE, cujos valores atribuídos encontram-se no anexo ???. As *keywords* \*MAT\_SPRING\_NONLINEAR\_ELASTIC e \*MAT\_DAMPER\_NONLINEAR\_VISCOUS, para os coeficientes de elasticidade  $k_i$  e amortecimento  $c_i$  respetivamente, definem a não linearidade com base nos valores introduzidos pelas curvas. A

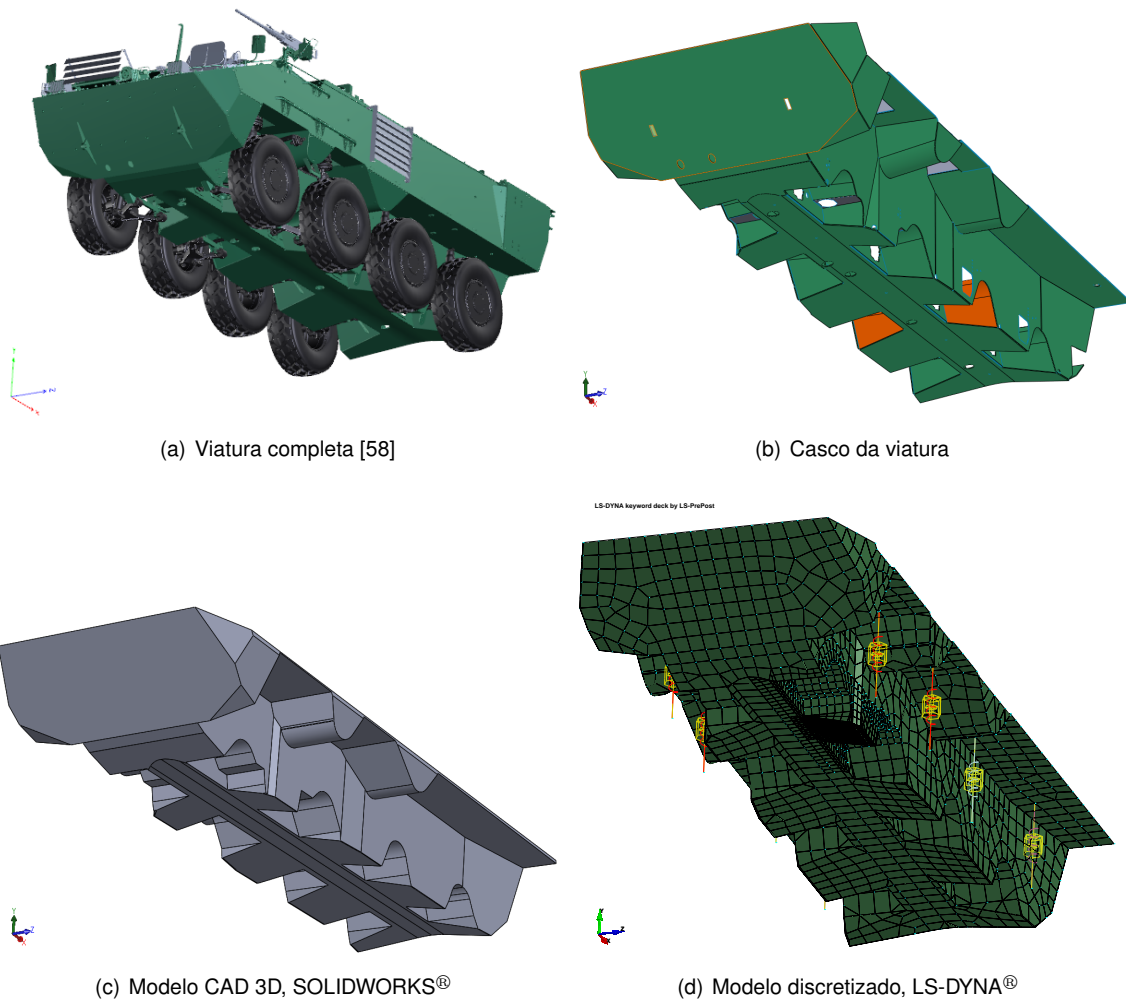


Figura 4.5: Modelação CAD 3D da viatura e discretização apresentada em 4 etapas.

modelação dos restantes elementos (gravidade, solo, propriedades do material do corpo da viatura, etc.) elaborou-se de forma semelhante à da primeira abordagem, tal como exposto na secção anterior.

## Capítulo 5

# Resultados e Discussão

Os resultados obtidos do estudo da dinâmica vertical e angular da viatura e das diferentes fases de simulação numérica são apresentados no presente capítulo. São, de igual forma, apresentados os resultados obtidos para o comportamento da viatura no simulador (dinâmica da viatura virtual), em função da resultante das forças obtidas na análise numérica. No final, é elaborada uma discussão desses resultados de modo a justificar e a qualificar a implementação dos mesmo no simulador.

### 5.1 Estudo da dinâmica da viatura

Na análise preliminar, descrita no capítulo anterior, obtêm-se os gráficos de aceleração e deslocamento lineares do corpo da viatura, figura 5.1, relativamente ao referencial  $zz$ . Observa-se um deslocamento linear máximo de 630 [mm] e uma aceleração linear máxima de 1.5 [mm/s<sup>2</sup>]. Estes valores são obtidos aos 500 [ms] após a viatura se encontrar em repouso. Os resultados representam a resposta da viatura a um impulso correspondente a uma força aplicada cujo valor absoluto da força foi escolhido de acordo com a revisão bibliográfica efetuada, nomeadamente a exposta na secção 2.4.2.

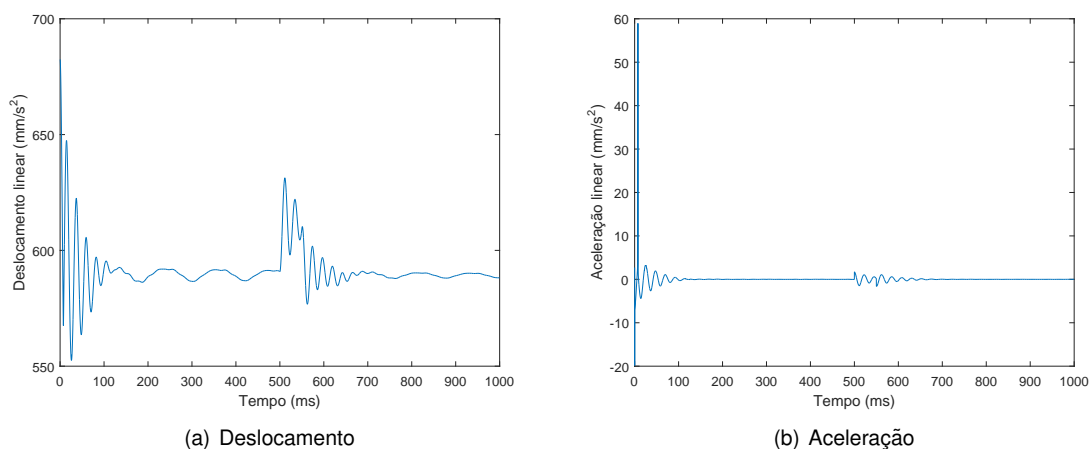


Figura 5.1: Deslocamento e aceleração vertical do modelo dinâmico da viatura.

Para efeitos de comparação com os resultados obtidos da dinâmica do sistema de simulação (*Vehi-*

cle Dynamic), a figura 5.2 ilustra a variação da aceleração angular ao longo do tempo.

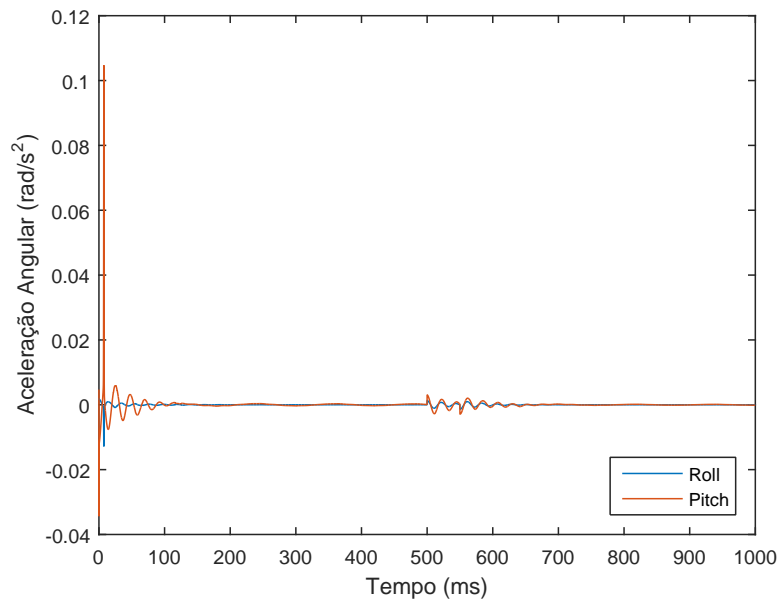


Figura 5.2: Aceleração angular do modelo da dinâmica da viatura para *pitch* e *roll*.

## 5.2 Simulações Numéricas

### 5.2.1 Viatura fixa de geometria elementar

A propagação da onda de choque para o primeiro ensaio (viatura fixa, sem suspensão) encontra-se ilustrada em anexo, figura B.1. Tal como esperado, observa-se a propagação radial da pressão provocada pela onda de choque, iniciando-se no local onde a carga se encontra colocada, ou seja, por baixo da zona do condutor (após o primeiro eixo da roda direita).

A variação de pressão em função do tempo é ilustrada pela figura 5.3. Com o gráfico referido, pretende-se verificar, também, se o andamento das curvas de pressão obtidas por simulação é semelhante às apresentadas por Barnat et al. [26], ver secção 2.4.2 desta dissertação. Tem-se, portanto, que cada curva ilustrada representa o elemento no qual se observa o maior valor de pressão nos instantes demonstrados na figura B.1. Como seria expectável, o início da propagação da onda de choque corresponde ao valor máximo de pressão, verificando-se um decaimento desta ao longo do tempo. A análise do gráfico permite verificar um pico máximo de pressão de 46 [MPa] aos 0.2 [ms]<sup>1</sup>.

Em termos de resultados obtidos para a magnitude da pressão máxima, os valores obtidos são diferentes de Barnat et al. [26]. A diferença poderá estar ligada ao facto das geometrias em análise serem diferentes, ou os métodos aplicados serem diferentes, e as distâncias entre o casco e a carga serem diferentes. No entanto, verifica-se o mesmo comportamento das curvas.

<sup>1</sup> *Blast wave reaches structure at 1.2932E-01 milliseconds* - Esta informação pode ser lida pelo ficheiro *message* que é gerado no início da compilação do projeto. De referir a diferença entre o pico máximo de pressão (output) e o tempo para o qual a onda chega ao corpo da viatura (intervalo de tempo de processamento).

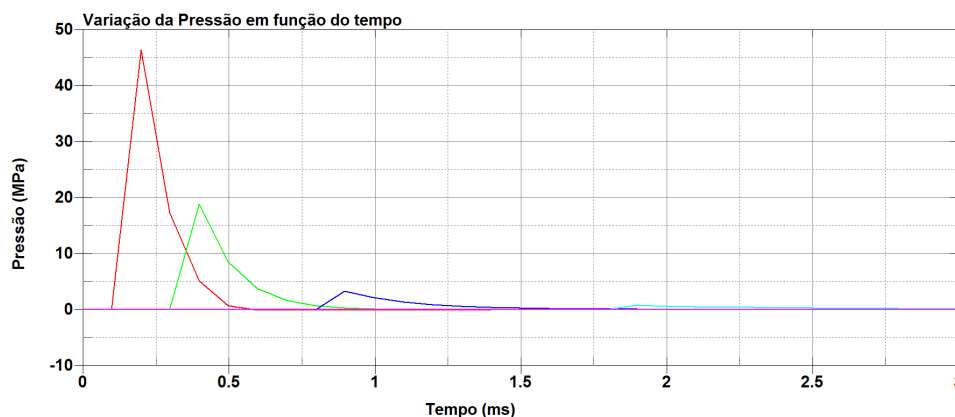


Figura 5.3: Distribuição de pressão da propagação da onda de choque pelo casco da viatura no primeiro ensaio.

### 5.2.2 Viatura livre de geometria elementar

Ao completar-se a viatura com a suspensão e ao eliminarem-se as condições de fronteira do corpo da viatura do primeiro ensaio ajustou-se o centro de gravidade, a massa e principais momentos de inércia da viatura, descrito na secção 4.2.2. Observa-se agora, o mesmo andamento das curvas de pressão para os mesmos elementos. Tendo o pico máximo de pressão se mantido igual, 46 [MPa], e no mesmo instante de tempo, 0.2 [ms], figura 5.4.

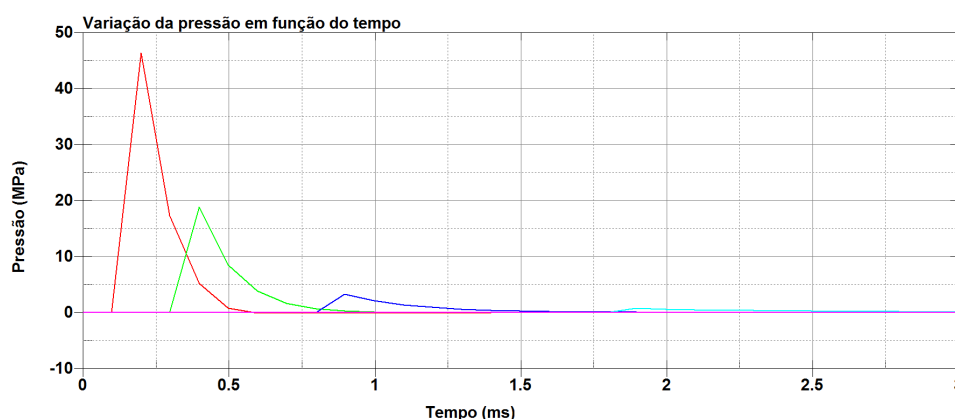
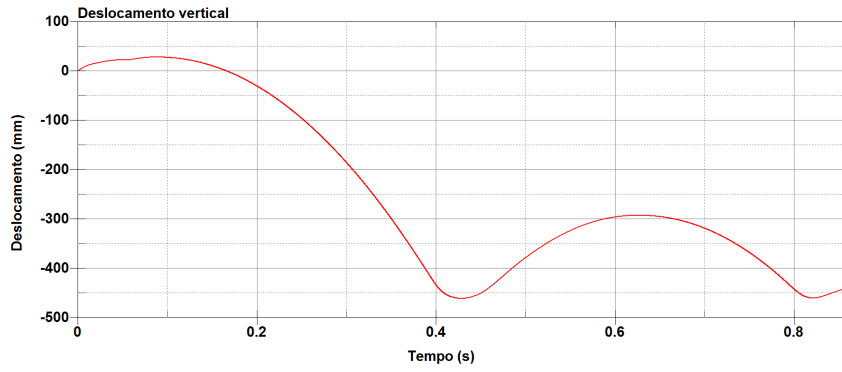


Figura 5.4: Distribuição de pressão da propagação da onda de choque pelo casco da viatura no segundo ensaio.

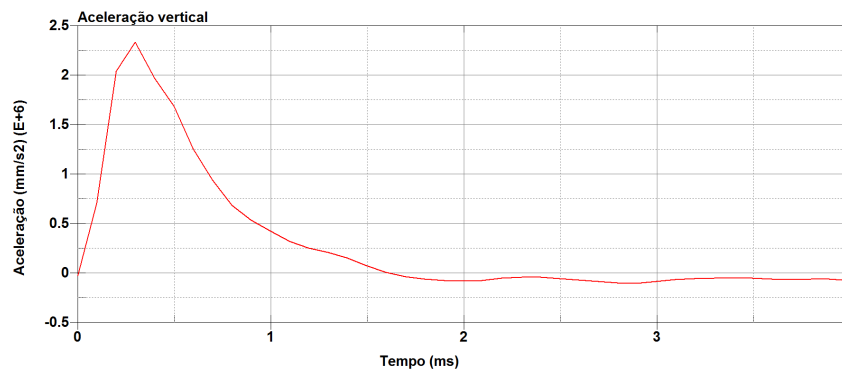
Verifica-se uma igualdade dos resultados devido ao facto da dinâmica da explosão ser mais rápida do que à dinâmica do sistema mecânico.

O *software* de modelação e análise numérica utilizado permite obter dados relativos à dinâmica da viatura: a aceleração e o deslocamento. Posto isto, a figura 5.5, permite visualizar um deslocamento vertical máximo de 25 [mm] e uma aceleração vertical máxima de aproximadamente  $2.25 \times 10^3$  [m/s<sup>2</sup>].

Se a detonação da carga explosiva ocorrer nos momentos iniciais da simulação, ou seja, a suspensão da viatura não se encontrar ainda em equilíbrio, verifica-se o exposto nos parágrafos anteriores. No entanto, ao deixar a viatura alcançar primeiro o repouso, é obtido um deslocamento vertical máximo de 124 [mm], figura 5.6(a), e um pico de aceleração vertical de  $5.87 \times 10^3$  [m/s<sup>2</sup>], figura 5.6(b).

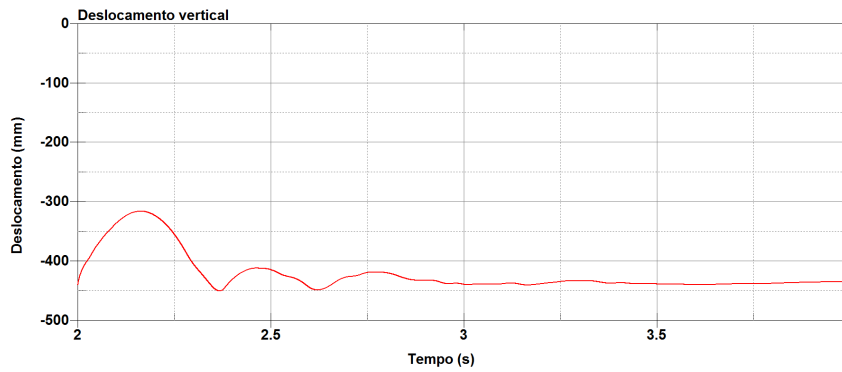


(a) Deslocamento

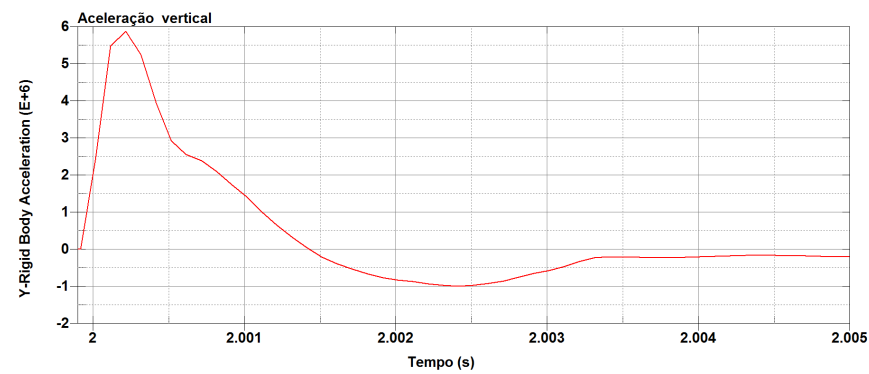


(b) Aceleração

Figura 5.5: Deslocamento e aceleração vertical para o corpo da viatura de geometria elementar.



(a) Deslocamento



(b) Aceleração

Figura 5.6: Deslocamento e aceleração vertical do modelo de geometria elementar, viatura em repouso.

Dada a diferença entre os valores obtidos, analisou-se também a curva de pressão para o elemento que verificou um pico de pressão maior, ver figura 5.7.

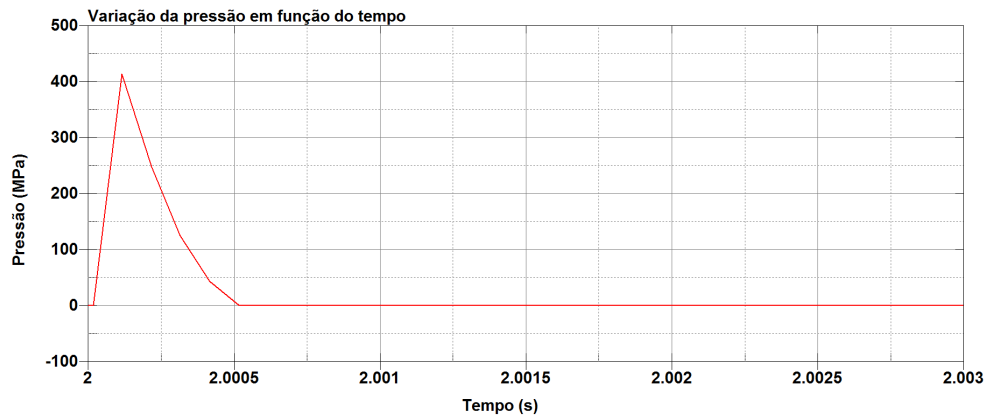


Figura 5.7: Distribuição de pressão da propagação da onda de choque pelo casco da viatura de geometria elementar, com a viatura em repouso.

Verifica-se um aumento na pressão máxima sentida pelo elemento mais próximo da carga para 414 [MPa], sendo que nos restantes o valor máximo decresce. Observa-se uma variação da distância da carga ao casco da viatura de 430 [mm], portanto, a influência da pressão provocada pela onda de choque é sensível à distância a que se coloca a carga.

### 5.2.3 Viatura livre de geometria detalhada

Os resultados apresentados nesta secção correspondem a um modelo projetado para o corpo da viatura com maior detalhe. Contudo, é também projetado com base nas *keywords* utilizadas para o modelo de geometria elementar.

Apesar da análise ao modelo de geometria elementar ter revelado que, para se obterem os resultados esperados, é necessário que a viatura esteja numa posição de repouso, para a geometria detalhada realizaram-se os mesmos dois ensaios. Esta abordagem deve-se ao facto do tempo de CPU ser consideravelmente mais elevado para o caso em que se coloca a viatura em repouso, isto é, o tempo de processamento para 5 [s] de simulação é maior do que um tempo de simulação de 2 [s]. Esta metodologia permite economizar tempo no projeto do modelo.

A propagação da onda de choque ao longo do casco da viatura pode ser consultada em anexo, na figura B.2. Tal como na primeira fase, observa-se a propagação radial da pressão provocada pela onda de choque, iniciando-se no local onde a carga se encontra colocada, ou seja, por baixo da zona do condutor (após o primeiro eixo da roda direita). Colocou-se a carga a uma distância de 500 [mm] do casco da viatura dado que a distância entre o casco e o solo é de aproximadamente 448 [mm], ver figura 1.3. Considera-se, assim, que a mina se encontra a uma profundidade de 52 [mm] abaixo da superfície.

## Detonação no instante inicial

A distribuição de pressão ao longo do casco da viatura, para o ensaio em que a detonação ocorre no instante inicial, é apresentada na figura 5.8, cujas curvas descritas correspondem aos elementos que apresentaram maiores picos de pressão em cada instante.



Figura 5.8: Curvas de pressão provocada pela onda de choque, detonação no instante inicial.

A análise do gráfico para as curvas de pressão, para o elemento mais próximo da carga, permite observar um pico de pressão de 138 [MPa].

Relativamente ao deslocamento e aceleração do centro de massa da viatura, observar na figura 5.9 as respetivas variações ao longo do tempo. Da análise do referido gráfico, observa-se um deslocamento máximo de 30 [mm] e uma aceleração máxima de  $0.41 \times 10^3$  [m/s<sup>2</sup>], figura 5.9.

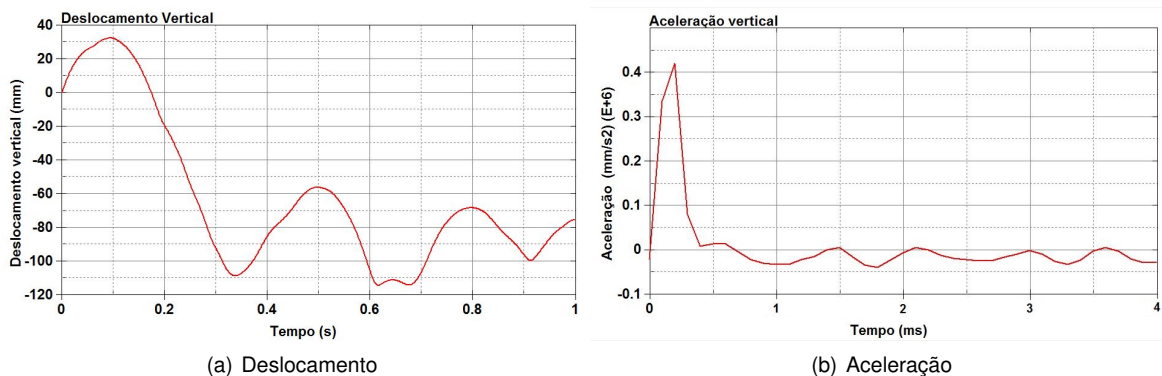


Figura 5.9: Deslocamento e aceleração vertical do modelo de geometria detalhada, detonação no instante inicial.

## Detonação iniciada com a viatura em repouso

Com a viatura em repouso, a distribuição de pressão ao longo do casco da viatura é apresentada na figura 5.10. As curvas ilustradas em 5.11, correspondem aos elementos que apresentaram maiores picos de pressão em cada instante demonstrado na figura em anexo B.2. A análise do referido gráfico



permite observar um pico de pressão de 219 [MPa] no elemento mais próximo da carga.

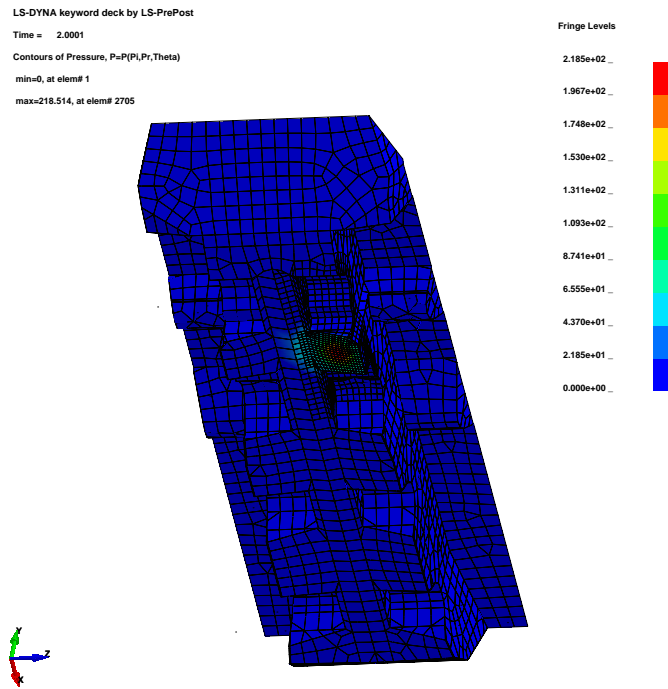


Figura 5.10: Pressão provocada pela onda de choque no instante inicial

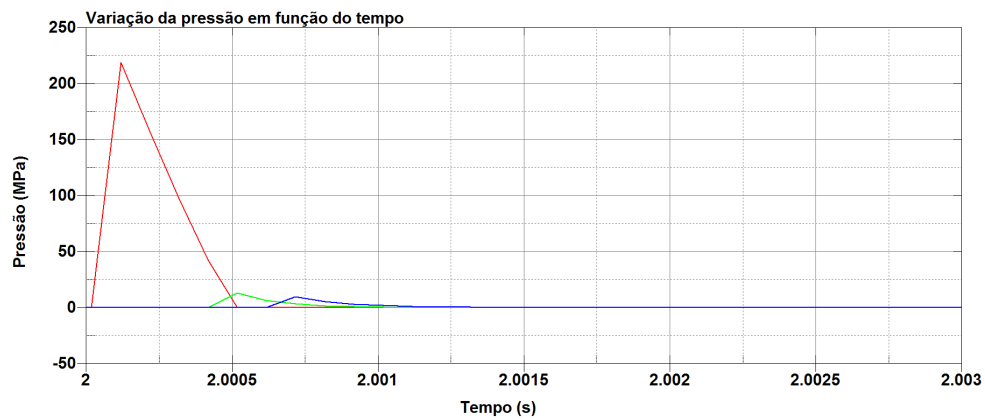


Figura 5.11: Curvas de pressão provocada pela onda de choque.

Relativamente ao deslocamento e aceleração do centro de massa da viatura, podem-se observar na figura 5.12 as respetivas variações ao longo do tempo. Verifica-se um deslocamento máximo de 58 [mm] ocorridos e uma aceleração máxima de  $1.98 \times 10^3$  [m/s<sup>2</sup>].

### 5.3 Simulador

Após a implementação no sistema de simulação da resultante das forças no CG da viatura, em função da análise numérica, guardaram-se os valores de aceleração para cada um dos 6 DOF. Na figura 5.13(a), ilustram-se as acelerações lineares verticais para as duas implementações, isto é, para

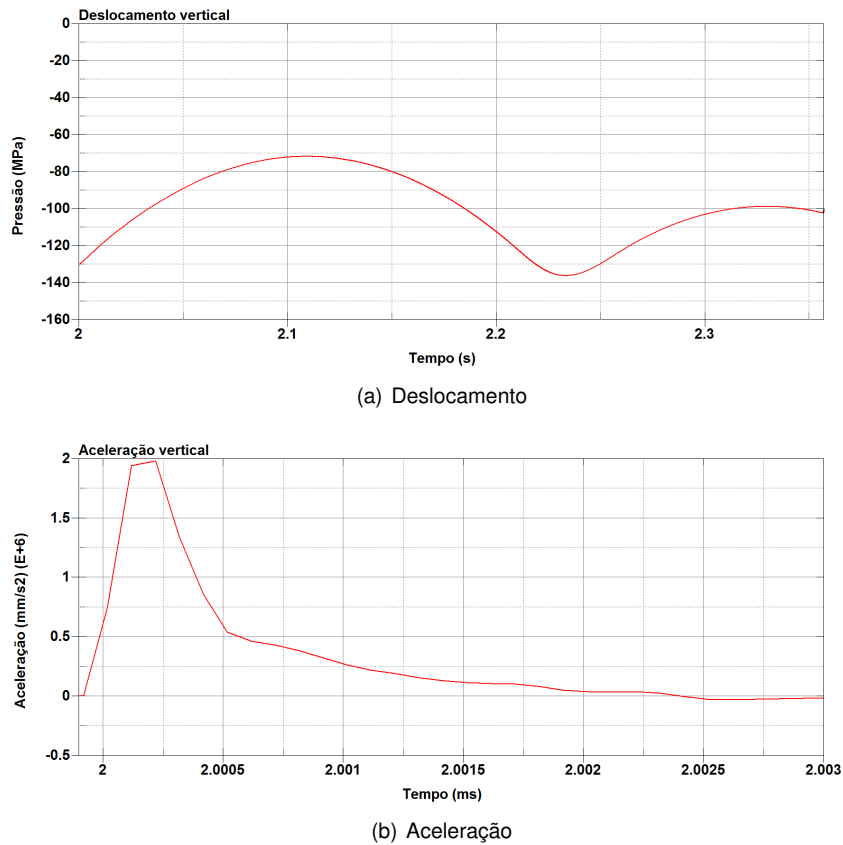


Figura 5.12: Deslocamento e aceleração vertical do modelo de geometria detalhada, viatura em repouso.

os dados originais e para quando se multiplica por um fator de 1.5.

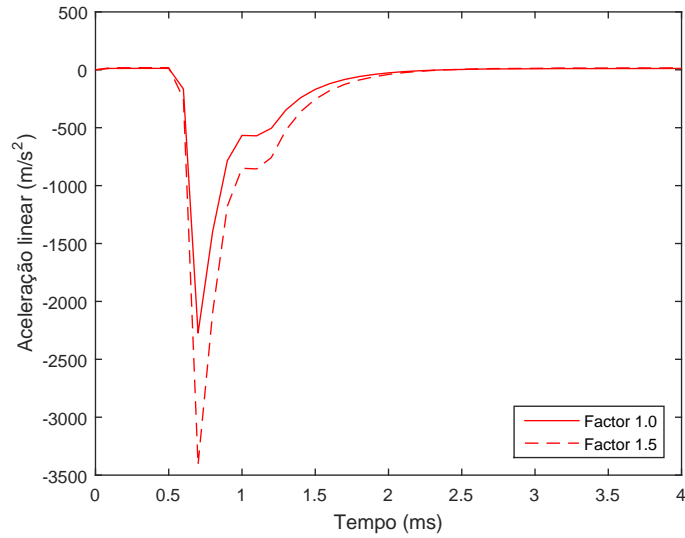
Recorde-se que o sistema de eixos do Sistema de Simulação (PDDS), figura 3.9, não é o mesmo utilizados pelas simulações numéricas, figura 4.3. Relativamente ao eixo vertical  $zz$ , observa-se uma aceleração máxima de  $2275 \text{ [m/s}^2\text{]}$  na direção negativa do eixo dos  $zz$ , ou seja, no sentido contrário ao do solo.

A viatura teria um comportamento visualmente melhor se a resultante das forças aplicadas no CG fossem multiplicadas por um fator de 1.5. Verifica-se, portanto, uma aceleração linear vertical máxima de  $3412 \text{ [m/s}^2\text{]}$ . Verifica-se um fator próximo daquele que é proposto por Brill et al. [40] para o método CONWEP, abordado na secção 2.4.2 do presente trabalho.

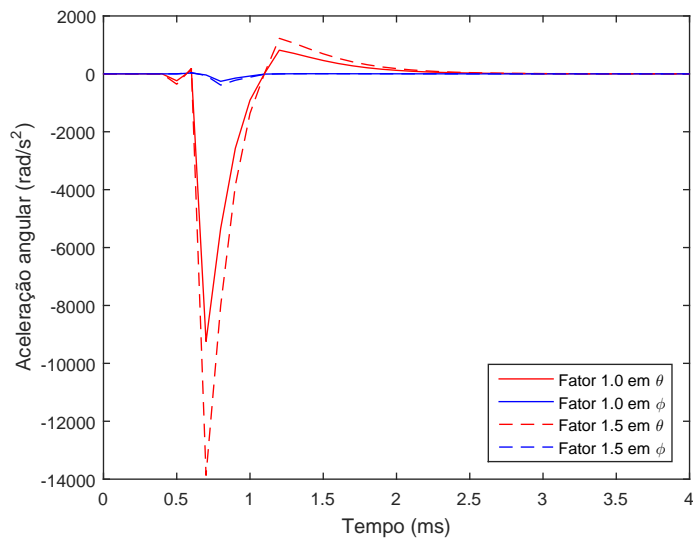
Relativamente às acelerações angulares obtidas pela dinâmica do simulador, estas ilustram-se na figura 5.13(b).

## 5.4 Discussão

Relativamente ao projeto dos modelos numéricos implementados, foram apresentados 2 modelos, sendo que o primeiro difere do segundo pelo detalhe do projeto, nomeadamente da geometria do casco da viatura. É com este projeto detalhado que pretende alcançar o objetivo final, ou seja, implementação dos resultados obtidos no PDDS. A tabela 5.1 permite validar o modelo em termos de propriedades



(a) Aceleração linear



(b) Aceleração angular

Figura 5.13: Aceleração linear vertical e angulares para os modelos implementados.

físicas do corpo da viatura, nomeadamente, massa e principais momentos de inércia no CG da viatura. As coordenadas apresentados para o centro de massa são de acordo com o referencial aplicado pela GDELS-steyr, ver anexo ??.

De modo a facilitar a discussão dos resultados obtidos, a tabela 5.2 apresenta os valores de picos de pressão, aceleração e deslocamento máximos obtidos para cada modelo numérico. Na mesma tabela, são expostos os números de elementos que compõe cada modelo, assim como o tempo gasto em cada simulação permitindo associar a complexidade do modelo ao tempo gasto em processamento e cálculo. A linha da tabela refere-se ao simulador, tem como objetivo permitir uma discussão dos resultados sobre a forma como a implementação foi materializada tal como exposta na secção 3.3. Na mesma tabela, são apresentados os resultados já demonstrados na secção 2.4.2. Estes últimos modelos têm o propósito de validar os modelos implementados nesta dissertação.

Tabela 5.1: Valores de massa e principais momentos de inércia no CG da viatura

	Massa (ton)	Eixo	Principais Momentos de Inércia (ton.mm <sup>2</sup> × 10 <sup>7</sup> )	Centro de Massa (mm)
Modelo numérico	18.034	x	1.38	2059.28
		y	7.42	-3.67
		z	8.41	374.11
Real	18.00	x	1.04	1998
		y	3.78	-22
		z	3.5	620
Erro absoluto	0.002	x	0.327	0.031
		y	0.963	0.833
		z	1.403	0.397

Tabela 5.2: Comparação de resultados para cada fase.

Modelo		Pressão (MPa)	Aceleração (m/s <sup>2</sup> )	Deslocamento (mm)	Número de partes/elementos	Tempo total de CPU (min)
Geometria elementar	Fixa	46	-	-	1/1382	3.45
	Livre	46	2250	25	7/1396	7.31
	detonação no instante inicial					
	Livre	414	5870	124	7/1396	35.88
Geometria detalhada	Livre	138	410	30	7/2794	711.77
	detonação no instante inicial					
	Livre	219	1980	58	7/2794	1620.00
	detonação com viatura em repouso					
Simulador	1.0	-	2275	-	-	-
	1.5	-	3412	-	-	-
VBL M113	Brill et al. [40]	144.6	2550	65	-	-
VBL 4x4 (detonação a 500 [mm] do solo)	Mikulic et al. [39]	60	-	-	-	-

Pela análise da tabela 5.2, observa-se de uma forma geral que, para cada um dos parâmetros avaliados, estes encontram-se todos na mesma ordem de grandeza, isto é, dentro de cada parâmetro avaliado, a variação que se verifica entre cada abordagem ou método não é significativa.

Relativamente ao objetivo final, pode-se observar que em termos de aceleração vertical, os valores obtidos pelo sistema de simulação (modulo *Vehicle Dynamic*), são coerentes e próximos daqueles que estão previstos pelas simulações numéricas. Nomeadamente, a aceleração obtida para o modelo de geometria detalhada, 1980 [m/s<sup>2</sup>], e a aceleração obtida pelo PDDS, 2275 [m/s<sup>2</sup>].

Os dados recolhidos na revisão bibliográfica ajudam a validar os modelos numéricos. Para o caso do modelo da viatura VBL M113 apresentado por Brill et al. [40], verifica-se uma diferença de 570 [mm/s<sup>2</sup>] de aceleração vertical e uma diferença entre pressões de 74.4 [Mpa], em relação ao modelo de geometria detalhada. Como seria esperado, a VBR Pandur II apresenta uma aceleração menor, devido ao facto da massa da VBL M113 ser menor.

Analisando as duas últimas colunas da referida tabela, é notório o incremento de tempo gasto em

processamento numérico com o evoluir da modelação. Pelo número de elementos verifica-se o incrementar no detalhe do modelo e, relativamente ao tempo, observa-se um tempo inicial de 3.45 [min] do modelo de geometria elementar fixa e um tempo de 1620 [min] para o modelo detalhado.



## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalhos Futuros

Ao longo deste trabalho, foi desenvolvida uma metodologia de análise numérica para eventos de rebentamento de minas sob a viatura VBR Pandur II. Este trabalho teve como base uma revisão bibliográfica e o estudo dos fenómenos em causa. Esta metodologia teve em vista tornar possível uma simulação virtual aproximada da realidade.

Neste capítulo, pretende-se tecer algumas conclusões sobre a metodologia desenvolvida, com base nos resultados obtidos. Propondo-se, no final, dar continuidade ao trabalho desenvolvido através de possíveis trabalhos futuros.

### 6.1 Conclusões

Após uma análise dos resultados obtidos em cada fase do estudo, é possível verificar que os resultados se encontram coerentes e enquadrados com trabalhos realizados anteriormente. Ao implementar-se o modelo numérico no PDDS, verificou-se que devido ao tempo de amostragem do simulador (16 [ms]) ser relativamente elevado, dada a constante de tempo da dinâmica da explosão, seria necessário reduzir-se o tempo de amostragem do simulador para 0.1 [ms], que corresponde ao tempo de amostragem das simulações numéricas. Este processo foi possível no módulo *Vehicle Dynamic*, produzindo os resultados já verificados e devidamente validados. No entanto, devido a fatores como o próprio *hardware* ou a mesma plataforma terem tempos de amostragem diferentes, tornam a sensação de simulação de certo modo diferente do esperado. Contudo, tendo em vista a aplicação dos resultados pretendidos para a simulação virtual no PDDS, verificou-se uma utilidade e implementação positiva.

A análise numérica, realizada de forma gradual, incrementado o nível de detalhe de cada modelo permitiu verificar que:

- O fenómeno de explosão resulta na libertação quase instantânea de uma elevada quantidade de energia;
- O valor de pressão máxima provocada num obstáculo é consideravelmente influenciada pela distância desse mesmo obstáculo à carga explosiva;

No entanto, esta dissertação acaba por ser também ela uma proposta de metodologia para o estudo de rebentamento de minas sob a viatura VBR Pandur II. Desta forma:

- Seria necessário testar outros métodos (ALE e acoplamentos) por forma a verificar se os resultados seriam melhores, mais precisos e rigorosos;
- Não recorrer apenas ao LS-DYNA® na fase de discretização, mas sim, recorrer a outros programas de modo a procurar as potencialidades e vantagens que cada *software* apresenta. Aproveitar as vantagens de uns para colmatar falhas ou desvantagens de outros. O LS-DYNA® apresenta potencial considerável para a parte de processamento e cálculo, a base em *keywords* é intuitiva e eficiente na aplicação de determinados modelos, como é o caso da modelação de explosivos, no entanto é menos *user friendly* na geração de geometrias e criação da respetiva malha, requerendo um outro *software* para colmatar essa desvantagem.
- A realização de testes experimentais ajudaria a validar o trabalho desenvolvido, tendo em vista outro tipo de análise, como por exemplo, verificar se a viatura cumpre, na verdade, o exposto no STANAG 4569.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Pelas conclusões, verifica-se a existência de continuidade do trabalho desenvolvido na presente dissertação. Nomeadamente:

- Desenvolver trabalho de modelação e simulação para o evento de rebentamento de granadas de artilharia, também previstas pelo STANAG 4569 [3];
- Continuar o desenvolvimento de uma análise numérica, agora com recurso a manequins virtuais de teste, de modo a analisar as acelerações sentidas pelo condutor, assim como pelo resto da guarnição da viatura;
- No seguimento do tópico anterior, validar os resultados com recurso a testes experimentais;
- Abrir o desafio à continuidade do desenvolvimento de análise do rebentamento de minas sob a VBR Pandur II tendo em vista levar ao conhecimento dos efeitos causados por este tipo de eventos na guarnição destas viaturas e propor, se for caso disso, novos tipos de proteções que o Exército Português possa projetar.



# Bibliografia

- [1] G. Pereira. Especificação técnicas gerais para o simulador de condução dinâmica PANDUR 8x8. Repcoopmilal-2013-009465, Estado Maior do Exército - Exército Português, Lisboa, Portugal, 2013. Documento reservado.
- [2] E. M. do Exército. Descrição da operação. Projeto VII-01, Estado Maior do Exército - Exército Português, Lisboa, Portugal, 2013. Documento reservado.
- [3] STANAG. 4569, protection levels for occupants of logistic and light armoured vehicles. *NATO Standardization Agency*, 2012.
- [4] E. M. do Exército. 5ª reunião do steering board do simulador dinâmico de condução VBR Pandur II. Informação nº: Dr/ri-2015-000668, Portugal, 2015. Documento reservado.
- [5] E. Fino. System requirements specification. ERS 120-00-00-01-04, EMPORDEF - Tecnologias de Informação S.A., Sobreda de Caparica, Portugal, 2015. Documento Reservado.
- [6] E. Fino. System development plan. PDS 120-00-00-01-02, EMPORDEF - Tecnologias de Informação S.A., Sobreda de Caparica, Portugal, 2015. Documento Reservado.
- [7] P. Gomes. Os sistemas de armas de origem europeia e a sua sustentação logística. Trabalho de investigação individual, Instituto de Estudos Superiores Militares, IUM, Lisboa, Portugal, 2012.
- [8] J. Tavares. As novas VBR VBR Pandur II 8x8 dos Batalhões de Infantaria da Brigada de Intervenção: implicações sobre as Técnicas, Tácticas e Procedimentos na Companhia de Atiradores em Operações de Apoio à Paz. Trabalho de investigação aplicada, Academia Militar, IUM, Lisboa, Portugal, 2011.
- [9] GDELS-Steyr. Manual do operador - vbr pandur 8x8 12,7 mm. Technical Report MT 10 Volume 1, Ministério da Defesa Nacional - Portugal, Maio 2011. Documento Reservado.
- [10] GDELS-Steyr. Technical Description: VBR Pandur II 8x8 Terrestrial Infantry Carrier Vehicle 12,7mm MG (ICV 12,7mm MG). Technical report, Fevereiro 2005. Documento Reservado.
- [11] M. Fonseca. O conceito de proteção da força. sistemas de proteção para carros de combate face às atuais ameaças. Trabalho de investigação aplicada, Academia Militar, IUM, Lisboa, Portugal, 2014.

- [12] A. Barbosa. Batalhão de infantaria equipado com as viaturas blindadas de rodas pandur ii (8x8): impacto na formação dos recursos humanos. Master's thesis, Academia Militar. Direção de Ensino, 2008.
- [13] A. Showichen. *Numerical analysis of vehicle bottom structures subjected to anti-tank mine explosions*. PhD thesis, Cranfield University. College of Defense Management and Technology, Department of Engennering Systems and Management for the Defense and Security Sectors, 2008.
- [14] CEME. Directiva n.º 170/09. Política de Simulação para o Exército.
- [15] H. Caetano. Necessidade e importância da simulação na Cavalaria Portuguesa. Trabalho de investigação aplicada, Academia Militar, IUM, Lisboa, Portugal, 2008.
- [16] R. Ferreira. A simulação como parte do treino operacional. Master's thesis, Instituto de Estudos Superiores Militares, 2000.
- [17] H. Caetano. Necessidade e importância da modelação & simulação. *Revista da Cavalaria*, (16): 8–14, Dezembro 2008.
- [18] J. Santos. A simulação, contributos para a formação e treino. Trabalho de investigação aplicada, Academia Militar, IUM, Lisboa, Portugal, 2012.
- [19] M. Oliveira. Os simuladores e as ti para pc para a formação do pessoal aeronáutico. Master's thesis, Instituto Superior de Ciências do Trabalho e da Empresa, IUL, 2005.
- [20] M. Macedonia. Games, simulation, and the military education dilemma. In *Internet and the University: 2001 Forum*, pages 157–167, 2002.
- [21] J. Simões. Utilização de ambientes de simulação de voo de baixo custo em ambiente académico na academia da força aérea. Trabalho de investigação individual, Instituto de Estudos Superiores Militares, IUM, Lisboa, Portugal, 2010.
- [22] L. Félix and A. Lesiário. Da dissertação à simulação. *Revista Científica da Academia da Força Aérea*, (2):14–21, 2012.
- [23] J. Basso. Modelo de avaliação de competências para oficiais de quarto à ponte - indicadores de competências não técnicas em ambiente simulado. Dissertação de mestrado, Escola Naval, IUM, Alfeite, Portugal, 2016.
- [24] S. Lahiri and L. Ho. Simulation of rapid structural failure due to blast loads from conventional weapons (conwep). In *Proceedings of the NAFEMS World Congress*, 2011.
- [25] U. S. Army. Fundamentals of protective design for conventional weapons. Technical manual tm855-1, Headquarters, Department of the Army, 1986.
- [26] W. Barnat, R. Panowicz, and T. Niezgoda. Influence of armoured vehicle's bottom shape on the pressure impulse. *Journal of KONES*, 18:39–46, 2011.

- [27] R. Santos. *Manual do Aluno - Elementos de Armamento M211*. Academia Militar, IUM, Lisboa, Portugal, 2010/2011.
- [28] D. Carlucci and S. Jacobson. *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition*. Taylor & Francis, 2007.
- [29] P. Cooper. *Explosives engineering*. Wiley-VCH, 1996.
- [30] W. Barnat, R. Panowicz, and T. Niezgodna. Numerical investigation of the influence of a rigid obstacle on the multiple reflected pressure impulse. *Journal of KONES*, 17:45–54, 2010.
- [31] A. Remennikov. A review of methods for predicting bomb blast effects on buildings. *Journal of battlefield technology*, 6(3):5, 2003.
- [32] C. Kingery and G. Bulmash. *Air blast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst*. Ballistic Research Laboratories, 1984.
- [33] D. Hyde. Microcomputer Programs CONWEP and FUNPRO, Applications of TM 5-855-1, 'Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons' (User's Guide). Technical report, DTIC Document, 1988.
- [34] L. Schwer and T. Slavik. Buried charge engineering model: Verification and validation. *9th European LS-DYNA Conference*, 2013.
- [35] P. Westine, B. Morris, P. Cox, and E. Polch. Development of computer program for floor plate response from land mine explosions. *Contract Report*, (1345), 1985.
- [36] J. Tremblay. Impulse on blast deflectors from a landmine explosion. Technical report, DTIC Document, 1998.
- [37] J. Hallquist. *LS-DYNA theory manual*. Livermore software Technology corporation, 2006.
- [38] W. Barnat, G. Sławiński, G. Moneta, and R. Panowicz. Introduction to modelling side ied explosion influence on special military vehicle. *Journal of KONES*, 19:15–20, 2012.
- [39] D. Mikulić, V. Stojković, and T. Gašparić. Modelling of all protected vehicles. In *The 4th DAAAM International Conference on Advanced Technologies for Developing Countries*, 2005.
- [40] A. Brill, B. Cohen, A. Paul, and D. Bois. Simulation of a mine blast effect on the occupants of an APC. In *6th European LS-DYNA Users' Conference*, 2000.
- [41] M. Larsen and K. Jorgensen. Landmine protection of armoured personnel carrier m113. In *6th European LS-DYNA Users' Conference*, 2007.
- [42] K. Williams, S. McClennan, R. Durocher, B. St-Jean, and J. Tremblay. Validation of a loading model for simulating blast mine effects on armoured vehicles. In *Proceeding from the 7th International LS-DYNA Users Conference*, pages 6–35, 2002.

- [43] Z. Tabatabaei and J. Volz. A comparison between three different blast methods in LS-DYNA: LBE, MM-ALE, Coupling of LBE and MM-ALE. In *Proceedings of the 12th International LS-DYNA Users Conference, Dearborn, MI, USA*, pages 3–5, 2012.
- [44] L. Schwer. A brief introduction to coupling load blast enhanced with Multi-Material ALE: the best of both worlds for air blast simulation. In *LS-DYNA Forum. Bamberg*, 2010.
- [45] GDELS-Steyr. Set-up and results measurements in mine test with the general dynamic european land systems steyr Pandur 6x6. Internal report, General Dynamic European Land Systems Steyr, Vienna, Austria, February 2012. Documento Reservado.
- [46] J. Coimbra and J. Ferreira. Analysis and desing document. DAD 120-01-00-01-02, EMPORDEF - Tecnologias de Informação S.A., Sobreda de Caparica, Portugal, 2015. Documento Reservado.
- [47] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo. *Robotics: modelling, planning and control*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [48] Z. Bingul and O. Karahan. *Dynamic Modeling and Simulation of Stewart Platform*. INTECH Open Access Publisher, 2012.
- [49] F. Szufnarowski. Stewart platform with fixed rotary actuators: a low cost design study. *Advances in Medical Robotics*, 2013.
- [50] D. Stewart. A platform with six degrees of freedom. *Proceedings of the institution of mechanical engineers*, 180(1):371–386, 1965.
- [51] V. Gough and S. Whitehall. Universal tyre test machine. In *Proc. FISITA 9th Int. Technical Congress*, pages 117–137, 1962.
- [52] S. Gao, D. Lei, Q. Liao, and F. Zhang. Generalized stewart-gough platforms and their direct kinematics. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(2):141–151, 2005.
- [53] M. Mol. Operator training – motion software tuning. NI001975-training-motion-tuning-r00, Bosch Rexroth B.V., P.O. Box 32, NL-5280 AA Boxtel, The Netherlands, 2016. Documento Reservado.
- [54] L. Nehaoua, H. Arioui, S. Espie, and H. Mohellebi. Motion cueing algorithms for small driving simulator. In *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, pages 3189–3194. IEEE, 2006.
- [55] G. Reymond and A. Kemeny. Motion cueing in the renault driving simulator. *Vehicle System Dynamics*, 34(4):249–259, 2000.
- [56] M. Nilsson. Constitutive model for armoX 500t and armoX 600t at low and medium strain rates. Weapons and protection se-147/25, FOI, Swedish Defense Research Agency, December 2003.
- [57] M. Świerczewski, M. Klasztorny, P. Dziejulski, and P. Gotowicki. Numerical modelling, simulation and validation of the sps and ps systems under 6 kg tnt blast shock wave. *acta mechanica et automatica*, 6:77–87, 2012.

- [58] GDELS-Steyr. Outer shell including suspension. *Vereif Darst auf Anfrage: Tdp.eti.2015*. Internal report, General Dynamic European Land Systems Steyr, Vienna, Austria, 2015. Documento Reservado.
- [59] GDELS-Steyr. Damper and spring characteristics. Internal report, General Dynamic European Land Systems Steyr, Vienna, Austria, 2015. Documento Reservado.
- [60] GDELS-Steyr. Origin of ordinates. Internal report, General Dynamic European Land Systems Steyr, Vienna, Austria, 2015. Documento Reservado.



# Apêndice A

## VBR 8x8 Pandur II

### A.1 Características Gerais

Tabela A.1: Características gerais [9].

Descrição	Dados Técnicos
Peso aproximado máximo (sem guarnição e equipamento individual)	18000 kg
Peso máximo permitido	20000 kg
Número de rodas motrizes	8
Número de eixos direcionáveis	2
Diâmetro do raio de viragem (parede a parede)	14.5 m - com travão de direção 22 m - sem travão de direção
Velocidade Máxima (em estrada pavimentada)	105 km/h
Velocidade máxima à retaguarda	13 km/h
Autonomia (estrada pavimentada, 60 km/h, 18.5 ton)	600 km
Combustível	Diesel
Depósito de combustível	Total 377 l (350 l + 27 l)
Motor	6 cilindros em linha, a 4 tempos
Cilindrada	8900 cm <sup>3</sup>
Potência	455 cv às 2200 rpm
Binário máximo	1627 Nm às 1300 rpm
Pneumáticos	Michelin 365/80 R20 XZL 152 K
Amortecedores	Telescópicos hidráulicos
Molas	Molas Helicoidais - 1.º e 2.o eixos Barras de torção - 3.º e 4.º eixos

## A.2 Níveis de Proteção

<b>PANDUR II 8x8 TERRESTRIAL</b> ICV-12,7mm MG		Date: February 2005 Revision: - Page: 7 / 60																			
<p><b>2 HULL AND MISSION COMPARTMENTS</b></p> <p><b>2.1 HULL AND PROTECTION</b></p> <p>The hull is a self-supporting structure made of heat-treated armor steel plates (RHA). Additional girders increase the torsional stiffness and provide optimal attachment and guidance of the single-wheel suspension.</p> <p>The basic hull structure provides protection against following threats:</p> <p><b>BALLISTIC PROTECTION:</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Level</th> <th>KE-Threat</th> <th>Reference-Artillery-Threat</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1*</td> <td>Assault Rifles: Ball Ammunition Distance: 30 m Angle: azimuth 360°; elevation: 0°-30° Ammunition: 7,62 x 51 mm NATO ball; v = 833 m/s 5,56 x 45 mm NATO ss 109; v = 900 m/s 5,56 mm x 45 NATO M 193; v = 937 m/s**</td> <td>Artillery: 155 mm Estimated range of burst: 100 m Angle: azimuth 360°; elevation 0°-18°</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>MINE PROTECTION:</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Level</th> <th>Grenade and Blast Mine Threat</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2a*</td> <td>Mine Explosion pressure activated under any wheel location any 6 kg (explosive mass) Blast AT Mine</td> </tr> </tbody> </table> <p>The hull is provided with attachments for ADD-ON armor to increase the protection level up to the following threat levels:</p> <p><b>BALLISTIC PROTECTION:</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Level</th> <th>KE-Threat</th> <th>Reference-Artillery-Threat</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2*</td> <td>Assault Rifles: Armour piercing steel core Distance: 30 m Angle: azimuth 360°; elevation: 0°-30° Ammunition: 7,62 x 39 mm AP/BZ; v = 695 m/s** 7,62 x 51 mm AP P80; v = 833 m/s**</td> <td>Artillery: 155 mm Estimated range of burst: 80 m Angle: azimuth 360°; elevation 0°-22°</td> </tr> <tr> <td>3*</td> <td>Assault and Sniper Rifles: AP tungsten carbide core Distance: 30 m Angle: azimuth 360°; elevation: 0°-50° Ammunition:</td> <td>Artillery: 155 mm Estimated range of burst: 60 m Angle: azimuth 360°; elevation 0°-30°</td> </tr> </tbody> </table>			Level	KE-Threat	Reference-Artillery-Threat	1*	Assault Rifles: Ball Ammunition Distance: 30 m Angle: azimuth 360°; elevation: 0°-30° Ammunition: 7,62 x 51 mm NATO ball; v = 833 m/s 5,56 x 45 mm NATO ss 109; v = 900 m/s 5,56 mm x 45 NATO M 193; v = 937 m/s**	Artillery: 155 mm Estimated range of burst: 100 m Angle: azimuth 360°; elevation 0°-18°	Level	Grenade and Blast Mine Threat	2a*	Mine Explosion pressure activated under any wheel location any 6 kg (explosive mass) Blast AT Mine	Level	KE-Threat	Reference-Artillery-Threat	2*	Assault Rifles: Armour piercing steel core Distance: 30 m Angle: azimuth 360°; elevation: 0°-30° Ammunition: 7,62 x 39 mm AP/BZ; v = 695 m/s** 7,62 x 51 mm AP P80; v = 833 m/s**	Artillery: 155 mm Estimated range of burst: 80 m Angle: azimuth 360°; elevation 0°-22°	3*	Assault and Sniper Rifles: AP tungsten carbide core Distance: 30 m Angle: azimuth 360°; elevation: 0°-50° Ammunition:	Artillery: 155 mm Estimated range of burst: 60 m Angle: azimuth 360°; elevation 0°-30°
Level	KE-Threat	Reference-Artillery-Threat																			
1*	Assault Rifles: Ball Ammunition Distance: 30 m Angle: azimuth 360°; elevation: 0°-30° Ammunition: 7,62 x 51 mm NATO ball; v = 833 m/s 5,56 x 45 mm NATO ss 109; v = 900 m/s 5,56 mm x 45 NATO M 193; v = 937 m/s**	Artillery: 155 mm Estimated range of burst: 100 m Angle: azimuth 360°; elevation 0°-18°																			
Level	Grenade and Blast Mine Threat																				
2a*	Mine Explosion pressure activated under any wheel location any 6 kg (explosive mass) Blast AT Mine																				
Level	KE-Threat	Reference-Artillery-Threat																			
2*	Assault Rifles: Armour piercing steel core Distance: 30 m Angle: azimuth 360°; elevation: 0°-30° Ammunition: 7,62 x 39 mm AP/BZ; v = 695 m/s** 7,62 x 51 mm AP P80; v = 833 m/s**	Artillery: 155 mm Estimated range of burst: 80 m Angle: azimuth 360°; elevation 0°-22°																			
3*	Assault and Sniper Rifles: AP tungsten carbide core Distance: 30 m Angle: azimuth 360°; elevation: 0°-50° Ammunition:	Artillery: 155 mm Estimated range of burst: 60 m Angle: azimuth 360°; elevation 0°-30°																			

(a)

<b>PANDUR II 8x8 TERRESTRIAL</b> ICV-12,7mm MG		Date: February 2005 Revision: - Page: 8 / 60				
<p><b>4</b></p> <p>7,62 x 51 mm AP (WC); v = 930 m/s** 7,65 x 54 mm RB3 Heavy Machine Gun: AP Ammunition Distance: 200 m Angle: azimuth 0°; elevation: 0° Ammunition: 14,5 x 114 mm AP/B32; v = 911 m/s**</p> <p><b>MINE PROTECTION:</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Level</th> <th>Grenade and Blast Mine Threat</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3a*</td> <td>Mine Explosion pressure activated under any wheel location any 8 kg (explosive mass) Blast AT Mine</td> </tr> </tbody> </table> <p>* according to STANAG 4569 ** v = figures are mean values; tolerances of striking velocity for an individual shot ± 20 m/s All the ICV's are to be equipped with frontal Level 3 ADD-ON (KE-Threat). The first 73 ICV's are to be delivered with all round Level 3 (KE-Threat) protection. The remaining ICV's have to be capable of mounting all round ADD-ON protection.</p> <p>Frontal Level 3 ADD-ON (KE-Threat) protection weight..... approx. 300 kg All round Level 3 ADD-ON (KE-Threat) protection weight..... approx. 1.800 kg</p>			Level	Grenade and Blast Mine Threat	3a*	Mine Explosion pressure activated under any wheel location any 8 kg (explosive mass) Blast AT Mine
Level	Grenade and Blast Mine Threat					
3a*	Mine Explosion pressure activated under any wheel location any 8 kg (explosive mass) Blast AT Mine					

(b)

Figura A.1: Níveis de proteção da VBR 8x8 Pandur II ICV [10]



## A.3 Material



<sup>1(2)</sup>  
Data Sheet 195en ArmoX 500T 2014-03-06

# ArmoX 500T

## Protection Plate

### General Product Description

ArmoX 500T combines good ballistic properties with excellent toughness.

#### Available Dimensions

ArmoX 500T is available in thicknesses between 3.0 and 80.0 mm. Other dimensions to be agreed with SSAB.

### Mechanical Properties

Plate thickness mm	Hardness HBW Min - Max	Charpy-V -40°C <sup>1)</sup> 10x10 mm test specimen <sup>2)</sup> Min. (J)	Yield Strength R <sub>p0.2</sub> Min MPa	Tensile Strength R <sub>m</sub> MPa	Elongation A <sub>5</sub> Min %	Elongation A <sub>50</sub> Min %
3.0 - 80.0	480 - 540	25	1250	1450 - 1750	8	10

<sup>1)</sup> Average of three tests. Transverse to rolling direction. Single value min. 70% of specified average.

<sup>2)</sup> For plate thicknesses under 12 mm sub-size Charpy-V specimen are used. The specified minimum value is then proportional to the specimen cross-section.

### Mechanical Testing

Brinell hardness test according to EN ISO 6506-1 on each heat treatment individual.

Charpy impact test according to EN ISO 148 on each heat and thicknesses from 4 mm.

Tensile test according to EN ISO 6892 on each heat and thicknesses under 19.9 mm.

#### Ultrasonic testing

According to EN ISO 10 160 Class E<sub>S1</sub> on each plate in thicknesses between 60 and 80 mm.

### Chemical Composition (ladle analysis)

C <sup>1)</sup> max %	Si <sup>1)</sup> max %	Mn <sup>1)</sup> max %	P max %	S max %	Cr <sup>1)</sup> max %	Ni <sup>1)</sup> max %	Mo <sup>1)</sup> max %	B <sup>1)</sup> max %
0.32	0.4	1.2	0.015	0.010	1.0 <sup>1)</sup>	1.8 <sup>1)</sup>	0.7	0.005

The steel is grain-refined.<sup>1)</sup> Intentional alloying elements.

<sup>1)</sup> For plate thicknesses >70 mm Cr ≤ 1.5 and Ni ≤ 3.5.

[www.armoxplate.com](http://www.armoxplate.com)



Figura A.2: Dados sobre as placas ARMOX 500T



## **Apêndice B**

# **Simulações numéricas**

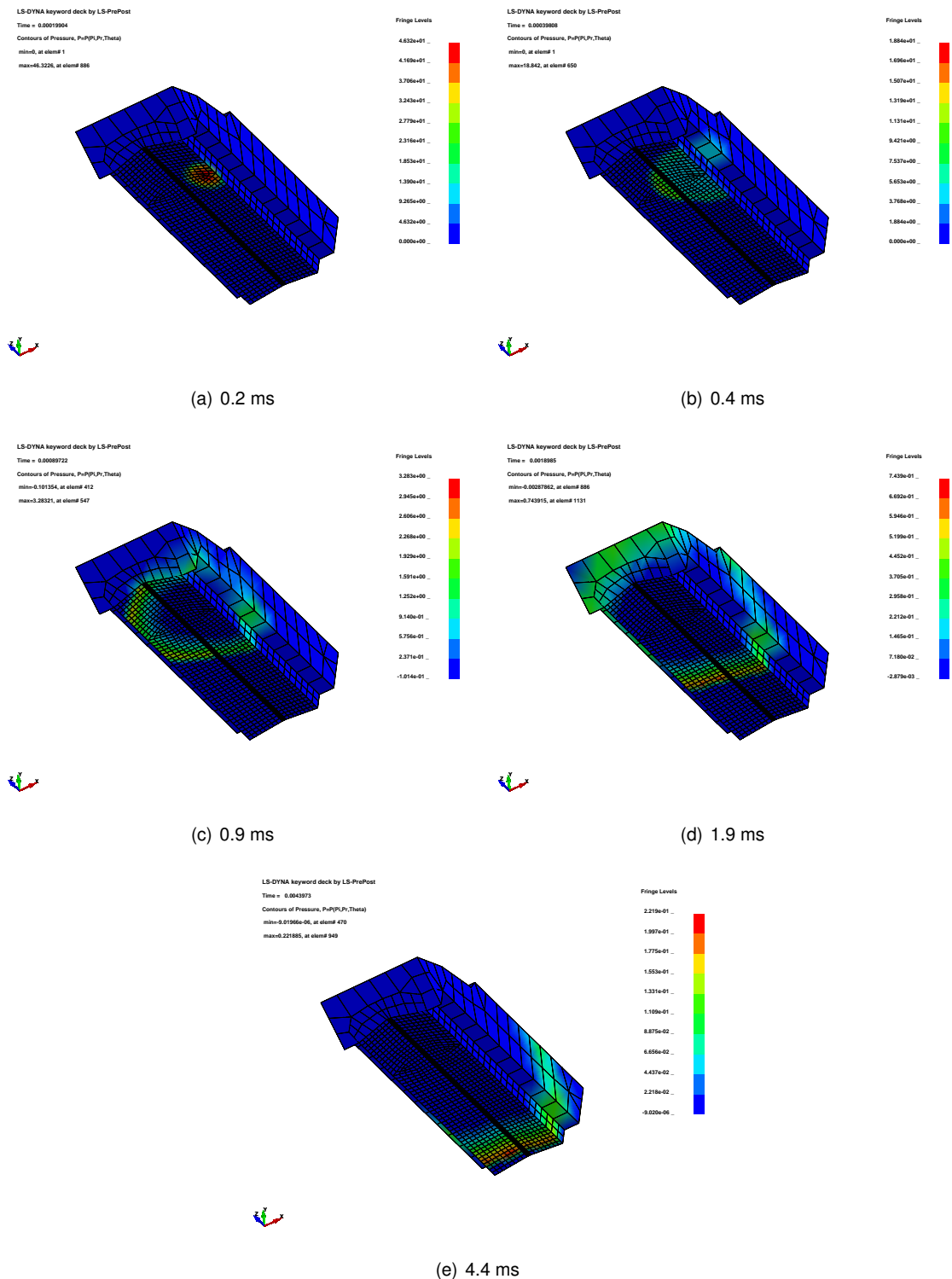
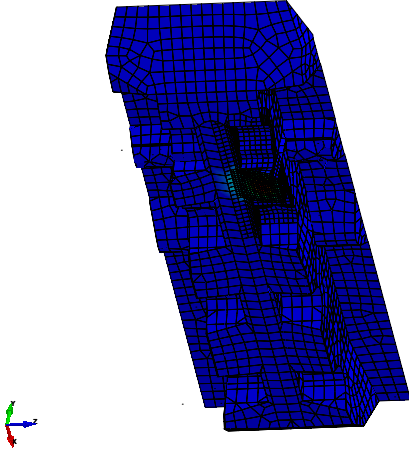


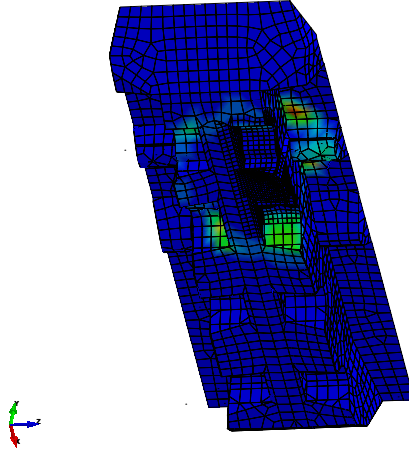
Figura B.1: Representação da animação virtual da propagação da onda de choque para a viatura de geometria elementar livre.

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
 Time = 2.0001  
 Contours of Pressure, P=PP(Pi,Theta)  
 min=0, at elem# 1  
 max=218.514, at elem# 2705



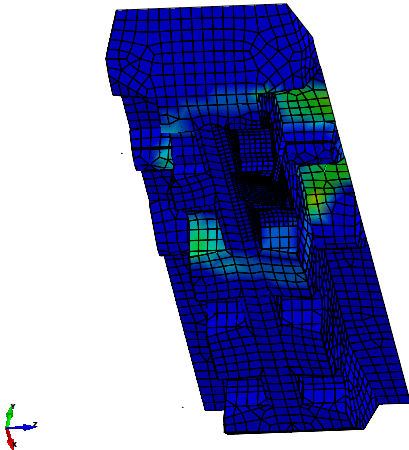
(a) 0.1 ms

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
 Time = 2.0005  
 Contours of Pressure, P=PP(Pi,Theta)  
 min=0.101354, at elem# 21  
 max=12.8559, at elem# 1991



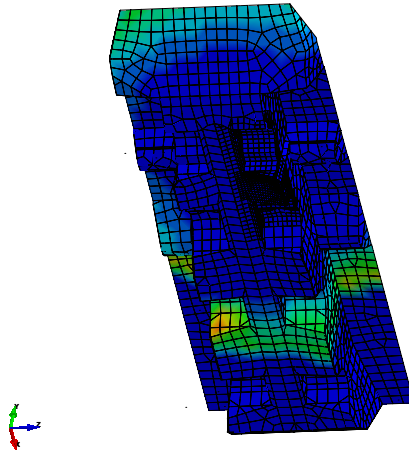
(b) 0.5 ms

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
 Time = 2.0007  
 Contours of Pressure, P=PP(Pi,Theta)  
 min=0.101354, at elem# 2  
 max=9.434, at elem# 2545



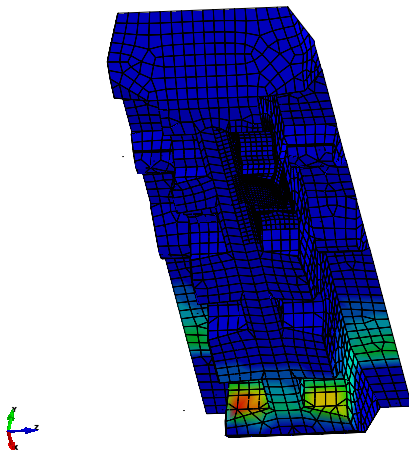
(c) 0.7 ms

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
 Time = 2.0021  
 Contours of Pressure, P=PP(Pi,Theta)  
 min=0.00087388, at elem# 1503  
 max=0.937248, at elem# 2122



(d) 2.1 ms

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
 Time = 2.0038  
 Contours of Pressure, P=PP(Pi,Theta)  
 min=-2.19632e-05, at elem# 245  
 max=0.596093, at elem# 552



(e) 3.8 ms

Figura B.2: Representação da animação virtual da propagação da onda de choque para a viatura de geometria detalhada.



# Apêndice C

## Código da simulação numérica

### Viatura de geometria detalhada

```
*CONTROL_TERMINATION
$#  endtim    endcyc    dtmin    endeng    endmas
      5.0      0      0.0      0.01.000000E8

*CONTROL_TIMESTEP
$#  dtinit    tssfacc    isdo    tslimt    dt2ms    lctm    erode    ms1st
      0.0      0.6      0      0.0      0.0      0      0      0

$#  dt2msf    dt2mslc    imsc1    unused    unused    rmscl
      0.0      0      0      0      0      0.0

*LOAD_BLAZT_SEGMENT_SET
$#  bid      ssid    alepid    sfnrh    scalep
      1      1      0      0.0      1.0

*LOAD_BLAZT_ENHANCED
$#  bid      m      xbo      ybo      zbo      tbo      unit    blast
      1      0.006    750.0    -500.0    400.0    2.0      7      1

$#  cfm      cfl      cft      cfp      nidbo    death    negphs
      0.0      0.0      0.0      0.0      01.000000E20    0

*LOAD_BODY_Y
$#  lcid      sf    lciddr    xc      yc      zc      cid
      2      9806.0    0      0.0      0.0      0.0      0

*PART
$#                                     title
Corpo SHELL
$#  pid      secid    mid    eosid    hgid    grav    adpopt    tmid
      1      2      2      0      0      0      0      0

*SECTION_SHELL_TITLE
Corpo
```

\$\$	secid	elform	shrf	nip	propt	qr/irid	icomp	setyp
	2	2	1.0	2	1.0	0	0	1

\$\$	t1	t2	t3	t4	nloc	marea	idof	edgset
	50.0	50.0	50.0	50.0	0.0	0.0	0.0	0

\*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC\_TITLE

Corpo

\$\$	mid	ro	e	pr	sigy	etan	beta
	27.83400E-9	210000.0	0.3	200.0	0.0	0.0	0.0

\$\$	src	srp	fs	vp
	0.0	0.0	0.0	0.0

\*PART

\$\$ title

Spring 1axis

\$\$	pid	secid	mid	eosid	hgid	grav	adpopt	tmid
	11	3	3	0	0	0	0	0

\*SECTION\_DISCRETE\_TITLE

Spring

\$\$	secid	dro	kd	v0	cl	fd
	3	0	0.0	0.0	0.0	0.0

\$\$	cdl	tdl
	0.0	0.0

\*MAT\_SPRING\_NONLINEAR\_ELASTIC\_TITLE

Spring 1axis

\$\$	mid	lcd	lcr
	3	3	0

\*PART

\$\$ title

Spring 3axis

\$\$	pid	secid	mid	eosid	hgid	grav	adpopt	tmid
	12	3	5	0	0	0	0	0

\*MAT\_SPRING\_NONLINEAR\_ELASTIC\_TITLE

Spring 3axis

\$\$	mid	lcd	lcr
	5	5	0

\*PART

\$\$ title

Damper 12axis

\$\$	pid	secid	mid	eosid	hgid	grav	adpopt	tmid
	13	4	7	0	0	0	0	0



\*SECTION\_DISCRETE\_TITLE

Damper

\$#	secid	dro	kd	v0	cl	fd
	4	0	0.0	0.0	0.0	0.0
\$#	cdl	tdl				
	0.0	0.0				

\*MAT\_DAMPER\_NONLINEAR\_VISCOUS\_TITLE

Damper 12axis

\$#	mid	lcdr
	7	7

\*PART

\$#									title
-----	--	--	--	--	--	--	--	--	-------

Damper 34axis

\$#	pid	secid	mid	eosid	hgid	grav	adpopt	tmid
	14	4	8	0	0	0	0	0

\*MAT\_DAMPER\_NONLINEAR\_VISCOUS\_TITLE

Damper 34axis

\$#	mid	lcdr
	8	8

\*PART

\$#									title
-----	--	--	--	--	--	--	--	--	-------

Spring 2axis

\$#	pid	secid	mid	eosid	hgid	grav	adpopt	tmid
	15	3	4	0	0	0	0	0

\*MAT\_SPRING\_NONLINEAR\_ELASTIC\_TITLE

Spring 2axis

\$#	mid	lcd	lcr
	4	4	0

\*MAT\_SPRING\_NONLINEAR\_ELASTIC\_TITLE

Spring 4axis

\$#	mid	lcd	lcr
	6	6	0

\*RIGIDWALL\_PLANAR\_FINITE\_ID

\$#	id								title
-----	----	--	--	--	--	--	--	--	-------

	1								
--	---	--	--	--	--	--	--	--	--

\$#	nsid	nsidex	boxid	offset	birth	death	rwksf
	0	0	0	0.0	0.01.00000E20		1.0

\$#	xt	yt	zt	xh	yh	zh	fric	wvel
	250.0	0.0	-800.0	250.0	813.0	-800.0	0.0	0.0

```

$#   xhev   yhev   zhev   lenl   lenm
    4485.0   0.0  -890.0  4500.0  500.0

```

```
*RIGIDWALL_PLANAR_FINITE_ID
```

```

$#   id                                     title
    2

```

```

$#   nsid   nsidex   boxid   offset   birth   death   rwksf
    0       0       0       0.0     0.01.00000E20   1.0

```

```

$#   xt     yt     zt     xh     yh     zh     fric   wvel
    250.0   0.0   1250.0  250.0  813.0  1250.0  0.0    0.0

```

```

$#   xhev   yhev   zhev   lenl   lenm
    270.0   0.0   1250.5  4500.0  500.0

```

```
*DEFINE_CURVE_TITLE
```

```
Gravity
```

```

$#   lcid   sidr   sfa   sfo   offa   offo   dattyp   lcint
    2       0     1.0   1.0   0.0   0.0     0         0

```

```

$#           a1           o1
           0.0           1.0
           500.0          1.0

```

```
*DEFINE_CURVE_TITLE
```

```
Spring_1axis
```

```

$#   lcid   sidr   sfa   sfo   offa   offo   dattyp   lcint
    3       0     1.0   1.0   0.0   0.0     0         0

```

```

$#           a1           o1
          -128.583         0.0

```

```
(LONG LIST)
```

```
*DEFINE_CURVE_TITLE
```

```
Spring_2axis
```

```

$#   lcid   sidr   sfa   sfo   offa   offo   dattyp   lcint
    4       0     1.0   1.0   0.0   0.0     0         0

```

```

$#           a1           o1
          -126.9         63.9

```

```
(LONG LIST)
```

```
*DEFINE_CURVE_TITLE
```

```
Spring_3axis
```

```

$#   lcid   sidr   sfa   sfo   offa   offo   dattyp   lcint

```

	5	0	1.0	1.0	0.0	0.0	0	0
\$#		a1		o1				
		-131.1		3287.17				

(LONG LIST)



# Apêndice D

## Implementação do modelo dinâmico em SIMULINK®

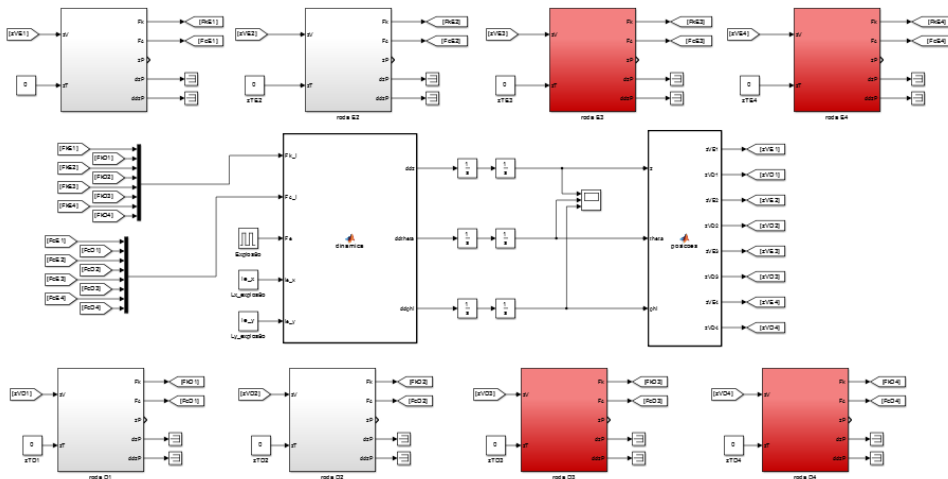


Figura D.1: Modelo geral

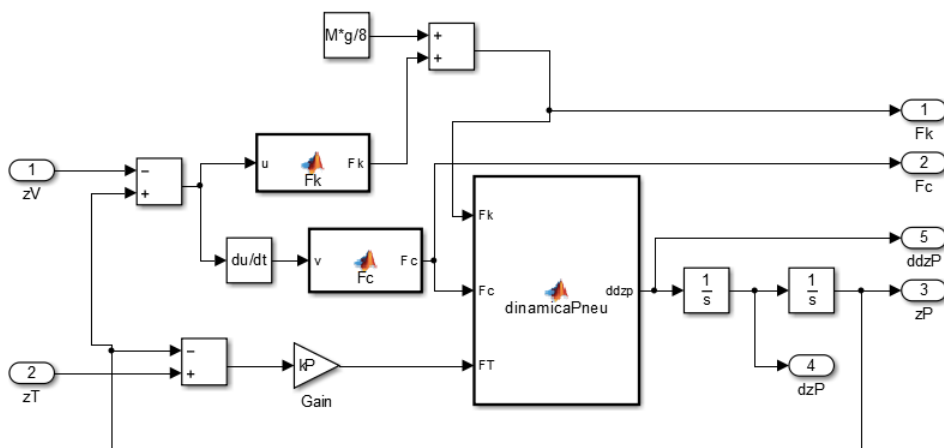


Figura D.2: Detalhe do Pneu

