



**Duarte Filipe Romão Santos**

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

## **Análise Estrutural de Cúpulas Geodésicas sujeitas a Ações Explosivas**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil Estruturas

Orientador: Professor Doutor Filipe Pimentel Amarante dos Santos,  
Professor Auxiliar, FCT/UNL

Co-orientador: Professor Doutor Corneliu Cismaşiu,  
Professor Associado, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Professor Doutor José Nuno Varandas da Silva Ferreira,  
Professor Auxiliar, FCT/UNL

Arguente: Professor Doutor Eduardo Soares Ribeiro Gomes Cavaco,  
Professor Auxiliar, FCT/UNL

Vogal: Professor Doutor Filipe Pimentel Amarante dos Santos,  
Professor Auxiliar, FCT/UNL



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro, 2017



**Análise Estrutural de Cúpulas Geodésicas  
sujeitas a Ações Explosivas**

Copyright © Duarte Filipe Romão Santos, FCT/UNL e UNL

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



# Agradecimentos

A presente dissertação foi resultado de muitos meses de trabalho e foi possível concretizar com o apoio recebido por inúmeras pessoas e de diversas formas.

A todas elas deixo aqui o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, gostaria de expressar o meu profundo reconhecimento ao meu orientador, Professor Filipe Santos. Agradecer-lhe todo o conhecimento científico e técnico transmitido, o seu acompanhamento, orientação e também todo o companheirismo e amizade demonstrado.

Também queria apresentar o meu agradecimento ao meu co-orientador, Professor Corneliu Cismaşiu. Agradeço todo o conhecimento transmitido e a análise crítica sobre o caso de estudo.

Ao Mestre Hugo Rebelo, pela ajuda incansável e por todo o conhecimento que transmitiu no que diz respeito ao funcionamento do programa de cálculo automático LS-DYNA, deixo o meu profundo agradecimento.

Agradeço ao restante grupo docente que tornou o meu percurso académico tão gratificante e que contribui para a minha formação como engenheiro e como pessoa.

Quero ainda deixar palavras de apreço a todos os meus colegas e amigos de curso que partilharam comigo experiências desde o início até ao final do percurso académico.

Em especial, um obrigado à Joana, pelo apoio e dedicação durante todo o meu percurso académico e realização da presente dissertação.

Agradeço-lhe, a amizade e ajuda prestada na resolução de alguns problemas encontrados e não menos importante, um obrigado pela ajuda emocional que me deu em alguns momentos deste percurso.

Por fim, agradeço a toda a minha família pelo amor e suporte incondicional dado desde sempre.

Aos meus pais, Dulce e Frederico, agradeço pela possibilidade que me deram, de poder frequentar o ensino superior e ao meu irmão Simão pelos momentos de descompressão.



# Resumo

Os acidentes e ataques terroristas, perto de estruturas importantes, recorrendo a explosivos, podem causar grandes danos, e inclusive a perda de vidas humanas. Em cenários de guerra, existe a necessidade de garantir que as estruturas de aquartelamento, sejam suficientemente resistentes às ações explosivas.

Nesta perspetiva e no seguimento destas conclusões, surgiu então o interesse, em estudar a aplicação de uma tipologia estrutural alternativa, baseada no conceito de cúpula geodésica, em detrimento dos tradicionais contentores standardizados.

As cúpulas geodésicas, são estruturas constituídas por uma rede geodésica de barras e nós, que permitem cobrir grandes vãos sem recorrer a suportes internos. Estas estruturas, apresentam uma forma arredondada, que promove um comportamento colaborativo dos seus elementos.

A utilização dos contentores para o estudo comparativo, deve-se à frequente utilização destas estruturas em ambientes militares, onde estes desempenham funções de abrigo e de armazenamento de armas e sistemas de comunicação.

O objetivo desta dissertação, passa pela análise do comportamento destas estruturas, quando sujeitas a ações explosivas, para que seja possível validar a sua aplicabilidade.

Para tal, foram simulados vários modelos de elementos finitos com diferentes níveis de carga explosiva (TNT) e distâncias. Após a calibração e validação dos modelos realizados através do programa LS-DYNA, foi possível prever, da forma mais realista possível, a resposta destas estruturas perante ações explosivas.

A validação da estrutura geodésica, foi feita com base no estudo comparativo, através do registo da resposta estrutural, tanto para a cúpula geodésica como para o contentor.

Esta comparação abrange vários parâmetros, como as tensões, as pressões, os esforços axiais, os deslocamentos e ainda uma análise da ductilidade e das rotações máximas.

Os resultados deste trabalho, permitiram concluir, que as cúpulas geodésicas têm um comportamento bastante satisfatório face a ações explosivas, comparativamente com os contentores.

**Palavras-chave:** Explosão, Onda de Choque, Cúpula Geodésica, Contentor, Método Elementos Finitos.





# Abstract

Accidents and terrorist attacks using explosives near important structures can cause major damage and even loss of human life. In war there is a need to ensure that the structures of barracks are sufficiently resistant to explosive actions.

Then came the interest in studying the implementation of a structural typology alternative instead of the traditional sea containers based on concept of geodesic domes.

Geodesic domes are structures constituted by a geodesic network of bars and nodes, that allow to cover large spans without using to internal supports. These structures are a rounded shape promoting a collaborative behavior of their elements.

The use of containers in this work is due to their frequent use in war scenarios. Where they perform shelter and storage functions.

The aim of this dissertation goes through analysis of the behavior of these structures when subjected to explosive actions to be able to validate your application.

To this end were simulated various finite element models for distinct levels of explosive TNT and for various standoff distance. After calibration and validation of the models carried out with the program LS-DYNA was expected as realistic as possible the response of these structures subject to explosive actions.

Validation of the geodesic structure was made based on a comparative study noting the structural response for both the dome and the container. This comparison covers various parameters such as stress, pressures, axial forces, displacements and an analysis of ductility and maximum rotation.

The results of this work have made it possible to conclude that the geodesic domes have a very satisfactory behavior in the face of explosive action comparing with the containers.

**Keywords:** Explosion, Shock wave, Geodesic Dome, Container, Finit Element Method.



# Índice de Matérias

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>III</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE MATÉRIAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>LISTA ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS E SÍMBOLOS</b> .....	<b>XIX</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO</b>	
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos e motivações	2
1.3 Estrutura da tese	3
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>5</b>
<b>AÇÕES EXPLOSIVAS EM ESTRUTURAS</b>	
2.1 Fenómeno da explosão	5
2.1.1 Materiais explosivos .....	5
2.1.2 Distância reduzida .....	6
2.1.3 Onda de choque .....	7
2.1.4 Pico de pressão incidente.....	9
2.1.5 Duração da fase positiva .....	10
2.1.6 Impulso incidente da onda de choque .....	11
2.1.7 Pressão dinâmica .....	12
2.1.8 Velocidade da frente de choque .....	13
2.1.9 Comprimento de onda .....	14
2.1.10 Categorias de explosões .....	
2.1.11 Explosões em espaço aberto.....	15
2.1.12 Explosões no ar.....	19
2.1.13 Explosões em contacto com o solo.....	20
2.2 Ações explosivas exteriores	
2.3 Resposta estrutural a ações dinâmicas	23
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>27</b>
<b>CÚPULAS GEODÉSICAS</b>	
3.1 Cúpulas geodésicas	27
3.1.1 O inventor: Buckminster Fuller.....	27
3.1.2 A natureza das cúpulas geodésicas .....	28

3.1.3	Geometria .....	29
3.1.4	O conceito de frequência.....	30
3.1.5	Funcionamento estrutural.....	31
3.1.6	Vantagens e desvantagens .....	33
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>		<b>35</b>
<b>MODELAÇÃO NO SOFTWARE LS-DYNA</b>		
4.1	Descrição LS-DYNA .....	35
4.1.1	Programa de cálculo automático LS-DYNA.....	35
4.1.2	Método Lagrangiano .....	36
4.1.3	Load Blast Enhanced .....	37
4.2	Modelo de referência .....	38
4.3	Modelo numérico .....	41
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>		<b>47</b>
<b>ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DA CÚPULA GEODÉSICA E DO CONTENTOR</b>		
5.1	Modelação Numérica da Cúpula Geodésica .....	47
5.1.1	Geometria (GeoCadre Pro) .....	48
5.1.2	Elementos finitos e secções transversais .....	50
5.1.3	Materiais .....	51
5.1.4	Ação LBE .....	52
5.1.5	Condições de fronteira .....	53
5.1.6	Duração e passo de tempo da análise .....	
5.2	Modelação Numérica do Contendor .....	53
5.2.1	Geometria .....	54
5.2.2	Elementos finitos e secções transversais .....	
5.3	Convergência e análise de sensibilidade .....	
5.4	Resultados .....	55
5.4.1	Amostras.....	55
5.4.2	Tensões .....	57
5.4.3	Esforço Axial .....	61
5.4.4	Pressões .....	62
5.4.5	Deslocamentos .....	64
5.4.6	Análise limite .....	72
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>		<b>79</b>
<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b>		
6.1	Conclusões .....	79
6.2	Trabalhos futuros .....	80
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>81</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>		<b>83</b>

<b>RESULTADOS - TENSÕES</b>	
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>89</b>
<b>RESULTADOS - DESLOCAMENTOS</b>	



# Lista de Figuras

Figura 1.1: Destruição de um edifício federal em Oklahoma City.....	1
Figura 2.1: Influência da distância na pressão da fase positiva. ....	6
Figura 2.2: Curva pressão-tempo, adaptado de UFC 3-340-02. ....	7
Figura 2.3: Constante de forma, adaptado de. ....	8
Figura 2.4: Pico de sobrepressão, adaptado. ....	9
Figura 2.5: Duração fase positiva, adaptado de. ....	10
Figura 2.6: Impulsa da onda de choque, adaptado de [7,17]. ....	11
Figura 2.7: Pico de pressão incidente, adaptado de [7,10,23]. ....	12
Figura 2.8: Velocidade da frente de choque, adaptado de [7,10]. ....	13
Figura 2.9: Categorias de explosões não-confinadas, adaptado de UFC 3-340-02 [7]. ....	14
Figura 2.10: Categorias de explosões confinadas, adaptado de [36]. ....	15
Figura 2.11: Explosão ao ar livre, adaptado de UFC 3-340-02, [7]. ....	16
Figura 2.12: Variação pressão-tempo para explosões ao ar livre, adaptado de UFC 3-340-02, [7]. ....	17
Figura 2.13: Rácio de sobrepressão refletida, adaptado de [7,10,23]. ....	18
Figura 2.14: Coeficiente pressão refletida $C_r$ , adaptado de UFC 3-340-02, [7]. ....	19
Figura 2.15: Ambiente da explosão no ar, adaptado de UFC 3-340-02, [7]. ....	20
Figura 2.16: Ambiente de explosão em contacto com o solo, adaptado de UFC 3-340-02, [7]. ....	21
Figura 2.17: Variação pressão-tempo ideal, adaptado de UFC 3-340-02, [7]. ....	22
Figura 2.18: Comportamento dúctil e frágil. ....	24
Figura 2.19: Fatores de amplificação dinâmico para tensões de cedência a várias taxas de deformação para aços ASTM A36 e A514, [7]. ....	25
Figura 3.1: Poliedro de Caracas a), Tacoma Dome b), Montreal Biosphère c) e The Eden Project d) [8,19]. ....	28
Figura 3.2: Sólidos platónicos [35]. ....	29
Figura 3.3: Icosaedro [12]. ....	30
Figura 3.4: Círculos perfeitos [19]. ....	30
Figura 3.5: Subdivisão de Classe I [19]. ....	30
Figura 3.6: Subdivisão de Classe II [19]. ....	30
Figura 3.7: Cúpulas geodésicas: 2V, 4V e 6V, [41]. ....	31
Figura 3.8: Sistema de conexão de nós. Sistema Mero [26]. ....	32
Figura 4.1: Formulação Lagrangiana, adaptado de [9]. ....	36
Figura 4.2.: Diferentes modelos de elementos finitos de cúpulas [28]. ....	38
Figura 4.3: Modelação elementos finitos do Modelo Simplificado. ....	42

Figura 4.4: Deformação no instante de tempo igual a 0.2ms. ....	44
Figura 4.5: Deslocamento nodal no topo da cúpula circular. ....	44
Figura 5.1: Contentor de 20", [42]. ....	47
Figura 5.2: Escolha do raio da cúpula geodésica. ....	48
Figura 5.3: Exemplo de um input do gerador de cúpulas do Cadre Pro. ....	49
Figura 5.4: Cúpula geodésica 2V gerada no Cadre Pro. ....	49
Figura 5.5: Diagrama de elementos com diferentes comprimentos. ....	50
Figura 5.6: Elementos tipo viga a) e tipo casca b) segundo o LS-DYNA [20]. ....	50
Figura 5.7: Cúpula Geodésica: rede geodésica (a) e painéis (b). ....	51
Figura 5.8: Secção transversal das vigas. ....	51
Figura 5.9: Posição relativa da cúpula geodésica face à carga explosiva. ....	53
Figura 5.10: Contentor: elementos tubulares (a) e painéis (b). ....	54
Figura 5.11: Malha auxiliar de pontos: Cúpula Geodésica a) e Contentor b). ....	56
Figura 5.12: Influência das barras nas tensões para TNT=50kg a 5m. ....	57
Figura 5.13: Influência das barras nas tensões para TNT=50kg a 10m. ....	57
Figura 5.16: Influência das barras nas tensões para TNT=150kg a 20m. ....	58
Figura 5.14: Influência das barras nas tensões para TNT=50kg a 15m. ....	58
Figura 5.15: Influência das barras nas tensões para TNT=150kg a 10m. ....	58
Figura 5.17: Influência das barras nas tensões para TNT=150kg a 30m. ....	59
Figura 5.18: Influência das barras nas tensões para TNT=500kg a 10m. ....	59
Figura 5.19: Influência das barras nas tensões para TNT=500kg a 30m. ....	59
Figura 5.20: Influência das barras nas tensões para TNT=500kg a 50m. ....	60
Figura 5.21: Diagrama das tensões registadas para TNT=500kg a 10m. ....	61
Figura 5.22: Diagrama dos Esforços Axiais para TNT=500kg a 10m. ....	62
Figura 5.24: Avanço da onda de choque através do contentor para TNT=500kg a 10m. ....	64
Figura 5.23: Avanço da onda de choque através da cúpula para TNT=500kg a 10m. ....	64
Figura 5.25: Evolução da deformação da cúpula geodésica para TNT=500kg a 10m. ....	65
Figura 5.26: Evolução da deformação do contentor para TNT=500kg a 10m. ....	65
Figura 5.27: Planos de corte cúpula geodésica: central, lateral 1 e lateral 2. ....	66
Figura 5.28: Planos de corte contentor: central, lateral 1 e lateral 2. ....	66
Figura 5.29: Variação dos deslocamentos residuais para TNT=500kg a 10m: Cúpula Geodésica a) e Contentor b). ....	67
Figura 5.30: Variação dos deslocamentos residuais para TNT=150kg a 10m: Cúpula Geodésica a) e Contentor b). ....	68
Figura 5.31: Posição deformada vs. indeformada da cúpula geodésica para TNT=500kg a 10m, plano central. ....	69
Figura 5.32: Posição deformada vs. indeformada da cúpula geodésica para TNT=500kg a 10m, plano lateral 1. ....	69
Figura 5.33: Posição deformada vs. indeformada da cúpula geodésica para TNT=500kg a 10m, plano lateral 2. ....	69
Figura 5.34: Posição deformada vs. indeformada do contentor para TNT=500kg a 10m, plano central. ....	70
Figura 5.35: Posição deformada vs. indeformada do contentor para TNT=500kg a 10m, plano lateral 1. ....	70



Figura 5.36: Posição deformada vs. indeformada do contentor para TNT=500kg a 10m, plano lateral 2.....	70
Figura 5.37: Zona de Segurança para um deslocamento limite de 0.4m para TNT=50kg a 5m. ....	71
Figura 5.38: Zona de Segurança para um deslocamento limite de 0.3m para TNT=150kg a 10m. ....	71
Figura 5.39: Zona de Segurança para um deslocamento limite de 0.5m para TNT=500kg a 10m. ....	72
Figura 5.40: Curvas rotação-distância para cúpula geodésica a) e contentor b) com TNT=500kg. ....	75
Figura 5.41: Curvas rotação-distância para cúpula geodésica a) e contentor b) com TNT=150kg. ....	76
Figura 5.42: Curvas rotação-distância para cúpula geodésica a) e contentor b) com TNT=50kg. ....	76
Figura 5.43: Curva distância-carga explosiva TNT.....	77
Figura B. 1: Variação dos deslocamentos residuais para TNT=500kg a 30m: Cúpula Geodésica a) e Contentor b).....	89
Figura B. 2: Variação dos deslocamentos residuais para TNT=500kg a 50m: Cúpula Geodésica a) e Contentor b).....	90
Figura B. 3: Variação dos deslocamentos residuais para TNT=150kg a 20m: Cúpula Geodésica a) e Contentor b).....	90
Figura B. 4: Variação dos deslocamentos residuais para TNT=150kg a 30m: Cúpula Geodésica a) e Contentor b).....	91
Figura B. 5: Variação dos deslocamentos residuais para TNT=50kg a 5m: Cúpula Geodésica a) e Contentor b).....	91
Figura B. 6: Variação dos deslocamentos residuais para TNT=50kg a 10m: Cúpula Geodésica a) e Contentor b).....	92
Figura B. 7: Variação dos deslocamentos residuais para TNT=50kg a 15m: Cúpula Geodésica a) e Contentor b).....	92



# Lista de Tabelas

Tabela 2-1: Categorias das explosões [7].	14
Tabela 4-1: Propriedades do material com o modelo Johnson-Cook [28].	41
Tabela 4-2: Características geométricas do modelo numérico.	42
Tabela 4-3: Parâmetros do material com modelo Johnson-Cook (Calibrado).	43
Tabela 4-4: Comparação de deslocamentos e o seu erro relativo.	45
Tabela 5-1: Modelo constitutivo Johnson Cook Simplificado (Material 098).	52
Tabela 5-2: Análise sensibilidade da malha.	55
Tabela 5-3: Amostragem.	56
Tabela 5-4: Decréscimo de tensões com a introdução da estrutura geodésica.	60
Tabela 5-5: Esforço Axial Máximo.	61
Tabela 5-6: Análise de Pressões para TNT=50kg.	62
Tabela 5-7: Análise de Pressões para TNT=150kg.	63
Tabela 5-8: Análise de Pressões para TNT=50kg.	63
Tabela 5-9: Máximos deslocamentos residuais.	65
Tabela 5-10: Área de segurança em percentagem.	72
Tabela 5-11: Valores de ductilidade média.	73
Tabela 5-12: Valores de rotação média.	74
Tabela 5-13: Situações associados a uma rotação limite de 3º.	77
Tabela A. 1: Análise das tensões para TNT=50kg a 5m.	83
Tabela A. 2: Análise das tensões para TNT=50kg a 10m.	84
Tabela A. 3: Análise das tensões para TNT=50kg a 15m.	84
Tabela A. 4: Análise das tensões para TNT=150kg a 10m.	85
Tabela A. 5: Análise das tensões para TNT=150kg a 20m.	85
Tabela A. 6: Análise das tensões para TNT=150kg a 30m.	86
Tabela A. 7: Análise das tensões para TNT=500kg a 10m.	86
Tabela A. 8: Análise das tensões para TNT=500kg a 30m.	87
Tabela A. 9: Análise das tensões para TNT=500kg a 50m.	87



# Lista Abreviaturas, Acrónimos e Símbolos

## Abreviaturas

ConWep	Conventional Weapons
TNT	<i>Trinitrotoluene</i>

## Acrónimos

ALE	Arbitrary Lagrangian-Eulerian
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFD	Computacional Fluid Dynamics
CSM	Computacional Solid Mechanics
CST	Cross Section Type
DIF	Dynamic Increase Factor
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
IE	Internal Energy
KE	Kinetic Energy
LSTC	Livermore Software Technology Compute
MEF	Método dos Elementos Finitos
PDC	Protetive Design Center
UFC	Unified Facilities Criteria
UNL	Universidade Nova de Lisboa

## Símbolos

$\alpha$	Ângulo de incidência da onda de choque
$\gamma$	Rácio do calor específico
$\mu$	Ductilidade
$\Delta_{\text{análise}}$	Passo de tempo da análise
$\Delta_{\text{trans}}$	Tempo transitório de uma onda sonora
$\dot{\epsilon}$	Taxa de deformação
$\dot{\epsilon}_0$	Taxa de deformação de referência
$\bar{\epsilon}^p$	Taxa de deformação plástica
$\epsilon^f$	Deformação de rotura
$\epsilon_{ced}$	Deformação de cedência
$\epsilon_u$	Deformação última
$\sigma^*$	Rácio de tensão
$\sigma_y$	Fluxo de tensão
$\sigma_{eff}$	Tensão efetiva

A	Tensão de cedência
b	Constante de forma
B	Tensão de rotura
c	Coefficiente da taxa de deformação
$C_0$	Velocidade do som no ar
$C_r$	Coefficiente de pressão refletida
D1-5	Parâmetros de falha
E	Módulo de elasticidade
$f_{ds}$	Tensão de dimensionamento dinâmico
Fs	Fator de escala do passo de tempo
G	Módulo distorcional
$H_t$	Altura do ponto triplo
$H_{d(EXP)}$	Calor de explosão do explosivo
$H_{d(TNT)}$	Calor de explosão do TNT
$i_s^-$	Impulso negativo
$i_s$	Impulso positivo
$i_r$	Impulso refletido
$L_w$	Comprimento de onda
m	Expoente de influencia da temperatura
n	Expoente de endurecimento
P	Pressão
$P_a$	Pressão atmosférica
$P_o$	Pressão de referência
$P_{so}$	Pico de sobrepressão
$P_{so}^-$	Pico de pressão negativa
$P_r$	Pressão refletida
$q_s$	Pressão dinâmica
R	Distância até ao centro da explosão
t	Tempo
$t_0$	Duração positiva
$t_a$	Tempo de chegada
$t_e$	Tempo até à cedência
$t_{of}$	Duração fictícia positiva
$t_d^-$	Duração da fase negativa
$t_d^+$	Duração da fase positiva
T	Temperatura
$T^*$	Temperatura homologada
$T_M$	Temperatura de fundição
$T_{room}$	Temperatura da sala
U	Velocidade da frente de choque
V	Sufixo da frequência
W	Massa do explosivo
$W_E$	Massa do explosivo equivalente
$W_{EXP}$	Massa do explosivo em análise
Z	Distância reduzida

# Capítulo 1

## Introdução

*“A good decision is based on knowledge and not on numbers.”*

(Plato)

### 1.1 Enquadramento

Nos últimos anos, tem-se registado um aumento do número de ataques terroristas e de acidentes com explosivos. As estruturas civis, estão expostas a ameaças induzidas por cargas explosivas, causando em todo o mundo preocupações relativas à perda de vidas humanas e danos em propriedades civis [13].



Figura 1.1: Destruição do edifício federal em Oklahoma City. [36]

Existe assim, a necessidade de dimensionar as estruturas para resistir aos efeitos explosivos, nomeadamente os edifícios governamentais, militares e com importância económica, que são estruturas mais suscetíveis de sofrer estes ataques. O dimensionamento estrutural sobre explosões, necessita de um estudo especializado por parte dos Engenheiros Estruturais, visto que a maior parte da informação disponível está restrita aos grupos militares.

Um cenário de explosão, está associado a um carregamento altamente dinâmico, o que representa um grande desafio à comunidade científica. Uma carga resultante de uma explosão difere de outros tipos de cargas dinâmicas, devido à sua natureza impulsiva.

No dimensionamento de estruturas contra efeitos dinâmicos é necessário ter em conta a sua variação ao longo do tempo, assim como a não-linearidade material e da geometria da estrutura [13].

A simulação numérica de ações dinâmicas, representa uma ferramenta muito poderosa, para simular o comportamento de estruturas sujeitas a ações explosivas. Existem formulações numéricas capazes de simular as características mecânicas e geométricas de uma estrutura sujeita a cargas explosivas, assim como a sua interação com a onda de choque. O Método dos Elementos Finitos é o método mais utilizado na análise do comportamento estrutural pela sua versatilidade em simular geometrias complexas, e pela possibilidade da sua implementação num programa de cálculo automático de computador.

## 1.2 Objetivos e motivações

A presente dissertação tem como objetivo principal a análise estrutural da cúpula geodésica quando sujeita a ações explosivas, e comparar o seu desempenho com o de um contentor convencional normalizado.

O presente estudo decorre, portanto, da necessidade que existe em utilizar estruturas cada vez mais resistentes, e dimensionadas tendo em conta as explosões. A principal motivação é a de propor uma nova tipologia que dê resposta à situação em estudo. As cúpulas geodésicas, que são apresentadas neste trabalho, traduzem o paradigma de conseguirem cobrir grandes vãos, sem que seja necessário a utilização de suportes no seu interior. Por outro lado, a sua forma arredondada convida a que seja feita uma análise estrutural, onde se possa evidenciar a influência da geometria e do carácter aerodinâmico, nomeadamente pela passagem da onda de choque.

Numa primeira parte é efetuada a análise da cúpula geodésica, com a finalidade de compreender os efeitos de ações explosivas na resposta da estrutura, potenciando a sua geometria e os seus elementos estruturais.

Na segunda parte, esta dissertação propõe a aplicação destas estruturas metálicas, em campos militares como zona de abrigo e refúgio. Para validar esta aplicação prática em ambientes bélicos, foi feito um estudo comparativo entre a cúpula geodésica e o tradicional contentor.

A utilização do contentor tem a ver com a recorrente utilização destas estruturas em ambientes militares, onde, de acordo com o Departamento da Defesa dos Estados Unidos, estas desempenham várias funções como o armazenamento de equipamentos e armas, zona de instalação dos serviços de comunicações com o exterior e de abrigo. [7]



### 1.3 Estrutura da tese

A presente dissertação está organizada nos seguintes capítulos:

Capítulo 1: Breve introdução do tema abordado nesta dissertação, enquadramento e definição dos seus objetivos.

Capítulo 2: Revisão dos principais efeitos das explosões em estruturas e apresentação das diferentes abordagens para a sua definição. Apresentação da formulação aplicada ao caso de estudo.

Capítulo 3: Apresentação da cúpula geodésica, da sua história e natureza. A sua aplicação na engenharia e funcionamento, assim como as suas vantagens e desvantagens, podem ser consultados neste capítulo.

Capítulo 4: Características e definição da cúpula geodésica que foi utilizada na análise. Introdução à modelação numérica da cúpula. Calibração e validação dos modelos numéricos da cúpula geodésica, com base em modelos já desenvolvidos por outros autores [28].

Capítulo 5: Estudo comparativo entre os modelos da cúpula geodésica e do contentor normalizado. Análise paramétrica das características das explosões. Comentários aos resultados obtidos e comparação entre os dois tipos de estruturas.

Capítulo 6: Resumo do estudo desenvolvido e as suas conclusões. Sugestões para trabalhos futuros.



## Capítulo 2

# Ações Explosivas em Estruturas

Este capítulo, pretende apresentar os principais efeitos das explosões, nomeadamente na definição das categorias do impacto produzido pela onda explosiva. São abordados os parâmetros que permitem caracterizar estas ondas de choque. É também feita a referência e explicação das abordagens utilizadas para análise de ações explosivas.

### 2.1 Fenómeno da explosão

De acordo com [2] uma explosão é uma súbita libertação de energia proveniente de gases, bombas e explosivos.

As ondas explosivas são resultantes de reações químicas que podem ser divididas em dois grupos primários: deflagrações e detonações. As detonações são geradas por combustão e propagam-se através de uma onda de choque. As deflagrações diferem das detonações por se propagarem a uma velocidade mais baixa e não geram onda de choque, nem variações de pressão. Devido às altas pressões, as detonações tornam-se mais destrutivas.

#### 2.1.1 Materiais explosivos

Os materiais explosivos são classificados de acordo com o seu estado físico: sólido, líquido ou gasoso [7].

Esta secção, apenas vai apresentar a formação de ondas explosivas de grande magnitude, provocadas por materiais sólidos. Um dos materiais mais utilizado em situações bélicas e que servirá de referência é o TNT (*trinitrotoluene*) [2].

Segundo [2], as bombas e explosivos são denominadas como pequenas, médias e grandes ou muito grandes, de acordo com a seguinte caracterização:

- Pequenos aparelhos explosivos – acima dos 5kg de TNT;
- Médios aparelhos explosivos – acima dos 20kg de TNT;
- Grandes explosivos e bombas – acima dos 100kg de TNT;

- Muito grandes explosivos e bombas – acima dos 2500kg de TNT.

No entanto, nem todos os explosivos libertam a mesma energia por unidade de massa. Para podermos comparar explosões originadas por explosivos diferentes, deve-se conhecer o método de equivalência de TNT. A comparação entre explosivos não é linear, uma vez que depende da forma do explosivo e do seu confinamento. A expressão do método é apresentada na equação 2.1 e é função do calor de explosão do explosivo. [7]

$$W_E = \frac{H_{EXP}^d}{H_{TNT}^d} * W_{EXP} \quad (2.1)$$

Onde,

$W_E$  – Massa do explosivo equivalente;

$W_{EXP}$  – Massa do explosivo em análise;

$H_{EXP}^d$  – Calor de explosão do explosivo em análise;

$H_{TNT}^d$  – Calor de explosão do TNT.

### 2.1.2 Distância reduzida

Um dos parâmetros importantes na definição de cargas explosivas é a distância do ponto de detonação até à estrutura em questão. O pico de pressão da onda de choque, decresce rapidamente com o aumento da distância entre a explosão e a superfície alvo, como mostra a Figura 2.1. Nesta figura apenas estão representadas as fases positivas da onda de pressão, em que as durações desta fase são maiores quanto mais longe tiver o ponto de detonação [15].

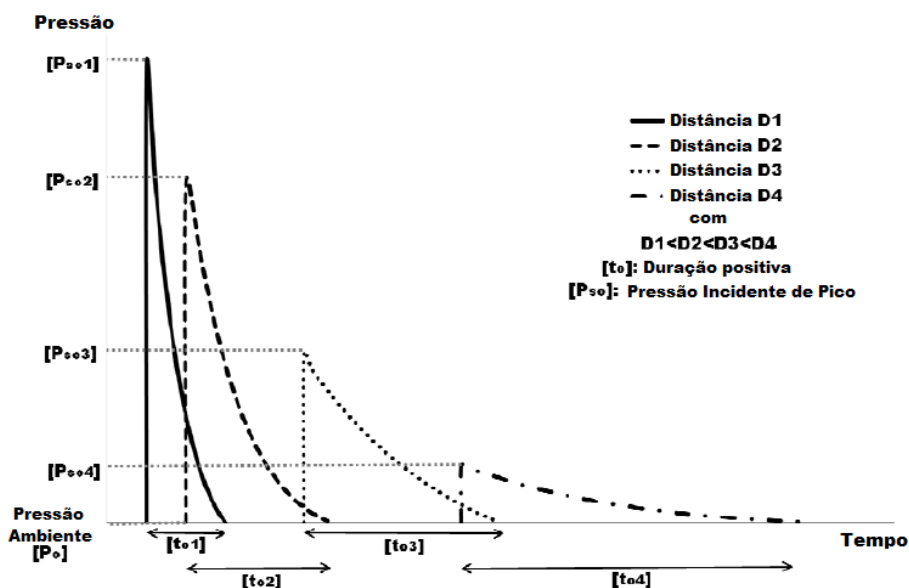


Figura 2.1: Influência da distância na pressão da fase positiva [15].

O efeito da distância nas características da explosão, pode ser tido em conta introduzindo o conceito de leis de escala. Estes princípios permitem estudar e comparar, os parâmetros da onda explosiva associada a diferentes explosões. Estes estudos são possíveis, se os parâmetros da onda forem escalados e variando simultaneamente a distância e a carga de explosiva. A definição mais comum nas explosões, é a que relaciona o parâmetro da onda de choque com raiz cúbica da quantidade de explosivo, definida por Hopkinson-Cranz, de acordo com a equação (2.2).

$$Z = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \quad (2.2)$$

Onde R é a distância, em metros (m), desde a fonte de detonação até ao ponto de interesse e W é a massa do explosivo, em quilogramas (kg) [15].

### 2.1.3 Onda de choque

Para descrever completamente o comportamento de uma onda de choque, é necessário identificar os parâmetros que a caracterizam. No resultado de uma detonação, a frente de pressão propaga-se radialmente pela atmosfera como uma onda de choque. Medido a partir do centro da explosão, o tempo de chegada da onda de choque a um determinado ponto ou alvo, é definido por  $t_a$ . No instante do impacto, há um aumento brusco de pressão, desde a pressão ambiente,  $P_a$ , até um pico de pressão incidente,  $P_{so}$ , seguido de uma redução até à pressão ambiente num intervalo de tempo  $t_0$ . Esta é a fase positiva de uma onda de choque, que é seguida de uma fase negativa, caracterizada por pressões negativas com o seu valor mínimo de  $P_{so}^-$  e uma duração de  $t_0^-$ , normalmente superior a  $t_0$ . Contudo, na maior parte dos estudos de explosões, a fase negativa da onda de choque é ignorada porque usualmente é mais fraca e mais gradual do que a fase positiva, o que traduz numa parcela pouco relevante da resposta da estrutura. Este comportamento pode ser observado na Figura 2.2. [7].

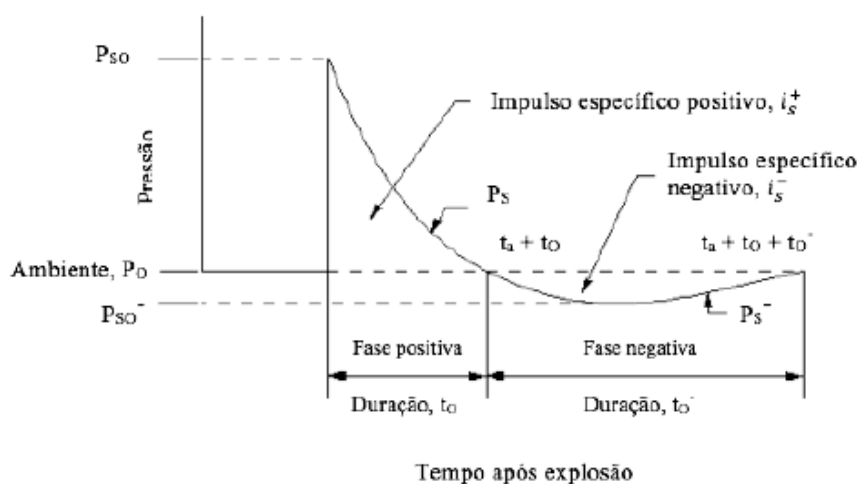


Figura 2.2: Curva pressão-tempo, adaptado de UFC 3-340-02 [7].

A relação entre a pressão e o tempo, ilustrada na Figura 2.2, pode ser expressa através da equação (2.3) de Friedlander modificada, apresentada por Baker [1].

$$P(t) = P_{so} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) \cdot e^{-\frac{bt}{t_0}} \quad (2.3)$$

Sendo b a constante de forma, definida na Figura 2.3.

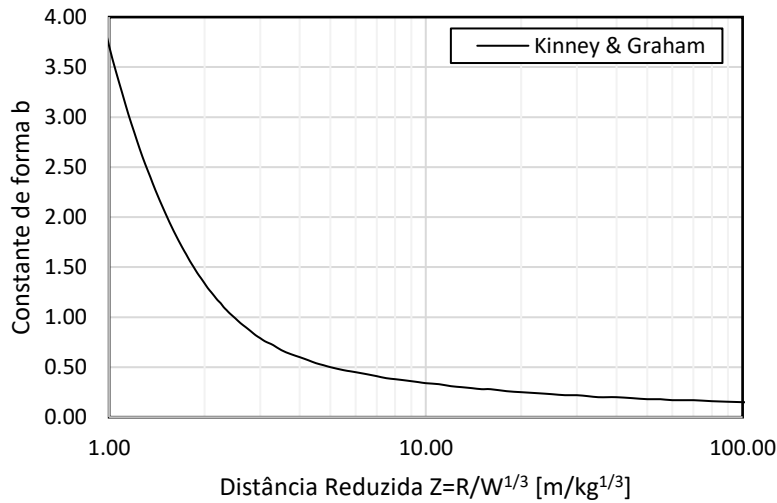


Figura 2.3: Constante de forma, adaptado de [7].

Em suma, para definir o comportamento da onda de choque, são necessárias três características. A primeira é o pico de pressão incidente,  $P_{so}$ , a segunda é a duração da fase positiva  $t_0$ . A terceira é o impulso, que é facilmente obtido pela integração da área sobre a curva de pressão-tempo, representada na Figura 2.2, resultando em  $i_s$  e  $i_s^-$  para as fases positiva e negativa, respectivamente. Utilizando a equação (2.3), da curva de pressão-tempo, podemos obter as expressões resultantes para o cálculo do impulso:

$$i_s = \int_0^{t_0} P(t) dt = \frac{P_{so} t_0}{b} \left[ 1 - \frac{(1 - e^{-b})}{b} \right] \quad (2.4)$$

$$i_s^- = \int_{t_0}^{\infty} P(t) dt = \frac{P_{so} t_0}{b^2} e^{-b} \quad (2.5)$$

Para a fase positiva e negativa, respectivamente.

2.1.4 Pico de pressão incidente

Em 1965, através de uma aproximação experimental, foi sugerida, no *US Army Technical Manual (Fundamentals of Protective Designs)* [3], uma expressão para estimar  $P_{so}$ , com  $Z$  expresso nas unidades imperiais (ft/lb<sup>1/3</sup>), como indicado pela seguinte equação:

$$P_{so} = \frac{4120}{Z^3} - \frac{105}{Z^2} + \frac{39.5}{Z} \quad (2.6)$$

No entanto, o domínio de aplicação desta expressão é muito limitado, uma vez que só deve ser aplicada quando  $P_{so}$  se insere num intervalo que vai de 2 psi a 160 psi, e também para uma relação  $R/W^{1/3}$  entre os 3 ft/lb<sup>1/3</sup> e os 20 ft/lb<sup>1/3</sup>. Face a esta limitação, a norma [7] estabelece uma relação empírica válida para  $100 \text{ ft/lb}^{1/3} > R/W^{1/3} > 0.132 \text{ ft/lb}^{1/3}$ , ilustrada na Figura 2.4.

Posteriormente, Kinney e Graham (1985) [17] propuseram definir o pico de pressão incidente em função de  $Z$ , através de (2.7).

$$\frac{P_{so}}{Pa} = \frac{808 \cdot \left[1 + \left(\frac{Z}{4.5}\right)^2\right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.048}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.32}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1.35}\right)^2}} \quad (2.7)$$

As formulações apresentadas estão representadas na Figura 2.4 em função de  $Z$  e expressas nas unidades internacionais. Analisando a Figura 2.4 podemos observar que as várias formulações apresentam valores bastante semelhantes de pico de pressões.

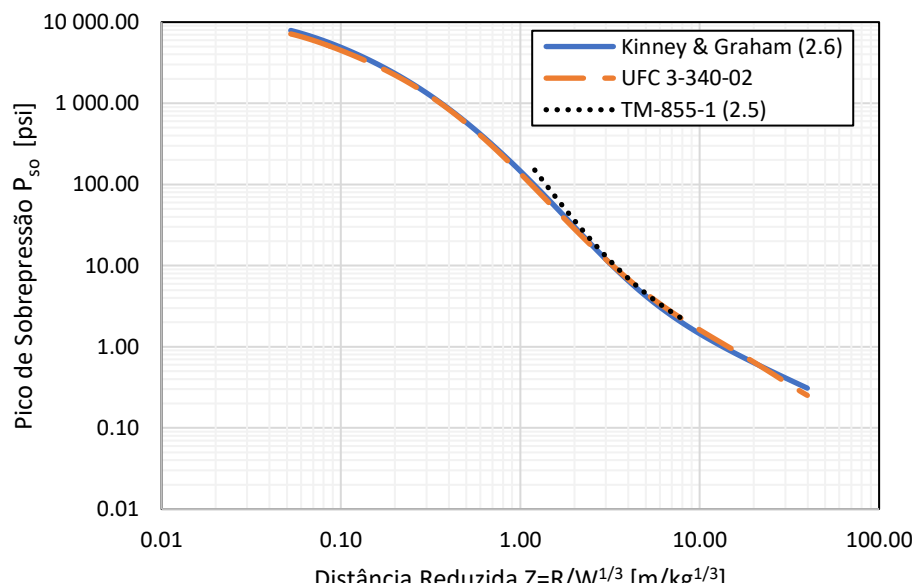


Figura 2.4: Pico de sobrepressão, adaptado [6,7,17].

2.1.5 Duração da fase positiva

Os danos infligidos numa estrutura dependem, na sua grande parte, do tempo que as forças atuam na mesma, por isso, a duração da fase positiva é uma característica importante das ondas de choque [7].

O parâmetro,  $t_0$ , é uma função de  $P_{so}$  e da energia total produzida pela explosão. O fim da fase positiva é caracterizado por uma sobrepressão de zero (pressão atmosférica), que é caracterizada por uma onda na região audível. A condição de sobrepressão igual a zero, propaga-se desde o centro da explosão à velocidade de propagação do som no ar. Esta velocidade é inferior à velocidade da frente de choque, o que significa que a duração da fase positiva aumenta com o aumento da distância, e termina quando atinge o valor de  $P_{so}=0$  [3].

Kinney e Graham [17] apresentam a equação (2.8) para o cálculo da duração da fase positiva:

$$\frac{t_0}{W^{1/3}} = \frac{980 \cdot \left[1 + \left(\frac{Z}{0.54}\right)^{10}\right]}{\left[1 + \left(\frac{Z}{0.02}\right)^3\right] \cdot \left[1 + \left(\frac{Z}{0.74}\right)^6\right] \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{6.9}\right)^2}} \quad (2.8)$$

A equação 2.7 é expressa em função de Z nas unidades internacionais, escalada para um quilograma de TNT. Outra alternativa, é estimar o valor da duração da fase positiva através da relação empírica apresentado na UFC [7], ilustrada na Figura 2.5. A diferença que se pode observar entre as duas formulações pode ser explicada pela dificuldade de medição experimental da duração da fase positiva.

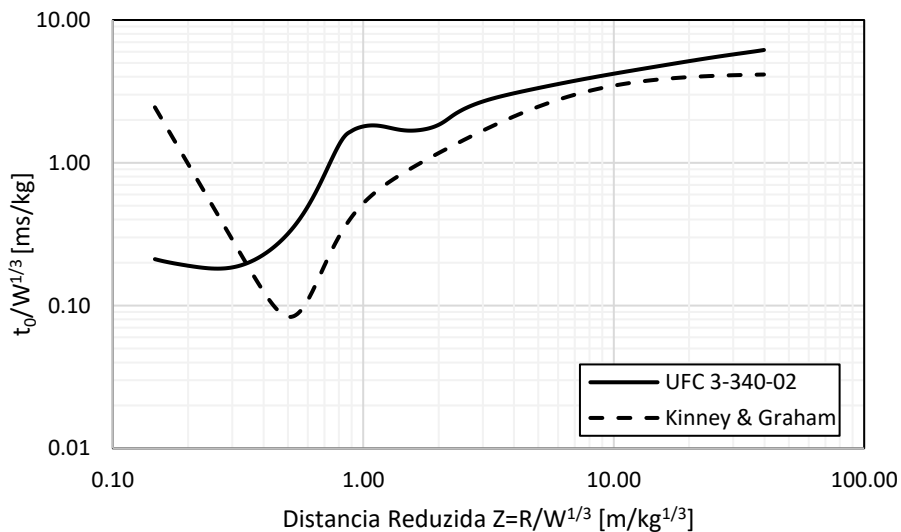


Figura 2.5: Duração fase positiva, adaptado de [7,17].



2.1.6 Impulso incidente da onda de choque

O impulso incidente é obtido com base na duração da fase positiva, e da pressão incidente de pico, e é representado graficamente como a área sob a curva de pressão-tempo. Se admitirmos, que parte da explosão está associada à fase positiva, considera-se então o impulso positivo por unidade de área, como uma característica da onda de choque inicial. A equação (2.9), é uma equação empírica, apresentada por [17], em função de Z e com a distância reduzida expressa em metros pela raiz cúbica de massa TNT em quilogramas.

$$i_s = \frac{0.0067 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.23}\right)^4}}{Z^2 \cdot \sqrt[3]{1 + \left(\frac{Z}{1.55}\right)^3}} \quad (2.9)$$

Onde  $i_s$  é expresso em MPa.ms.

Por outro lado, a *Unified Facilities Criteria* (UFC) [7], define o impulso da onda de choque dividido pela raiz cúbica da quantidade de massa explosiva. Na Figura 2.6 a definição anterior é ilustrada para um e para cinco quilogramas de explosivos TNT.

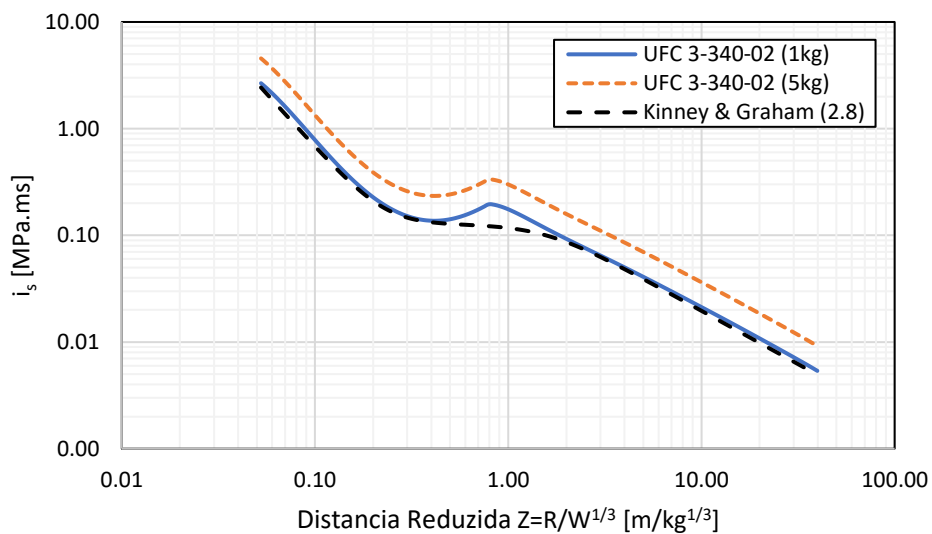


Figura 2.6: Impulsa da onda de choque, adaptado de [7,17].

A definição empírica do UFC, resulta num impulso da onda de choque, que é escalado para um quilograma de explosivo. Contudo, como a equação de Kinney e Graham não é escalada, existem algumas diferenças entre ambas as formulações, como é observado na zona do gráfico que corresponde a um Z entre 0.4 e 1.1.

2.1.7 Pressão dinâmica

Depois da passagem da frente de onda, o fluxo de ar resultante, gera uma pressão dinâmica (efeito de sopro). Este efeito é cumulativo com o pico de pressão incidente. Para baixos valores de sobrepressão e condições atmosféricas ao nível do mar, pode-se usar a equação (2.10) de Newmark [10], com  $P_{s0}$  expresso em psi.

$$q_s = 0.022 \cdot (P_{s0})^2 \tag{2.10}$$

Alternativamente, também é usual adotar a relação de Rankine-Hugoniot [23], equação (2.11) onde  $P_a$  é a pressão atmosférica ao nível do mar, expressa em MPa.

$$q_s = \frac{5}{2} \frac{P_{s0}^2}{(7P_a + P_{s0})} \tag{2.11}$$

Ambas as relações são apresentadas na Figura 2.7, juntamente com a estimativa para a pressão dinâmica definida no UFC [7]. Observando o gráfico, este traduz valores semelhantes de  $q_s$ , para as relações de Rankine-Hugoniot e de UFC. No entanto, a relação de Newmark, dá-nos valores diferentes à medida que se aumenta o pico de pressão incidente, o que pode ser explicado pela simplificação inerente à própria formulação.

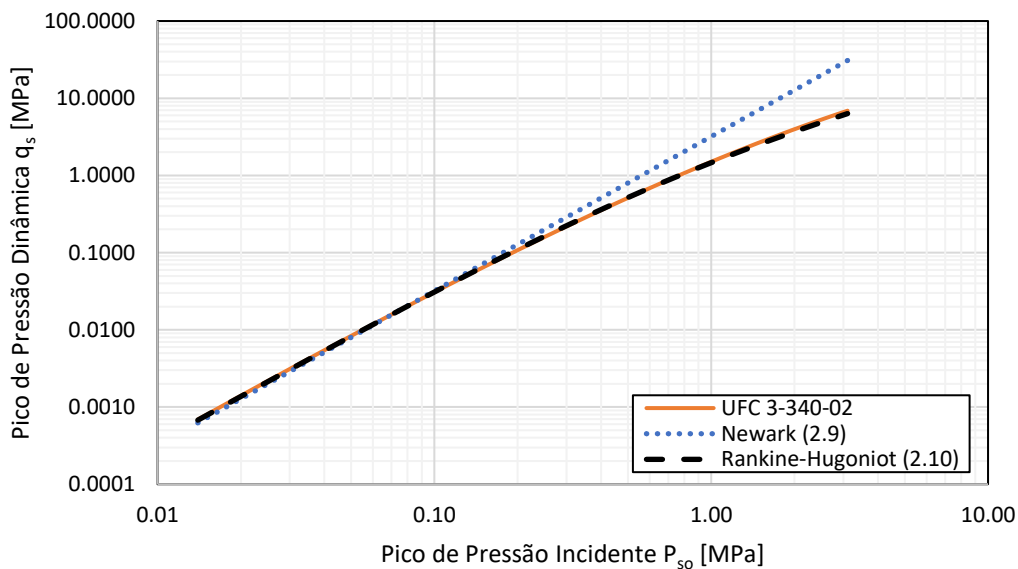


Figura 2.7: Pico de pressão incidente, adaptado de [7,10,23].

2.1.8 Velocidade da frente de choque

A velocidade de frente de choque,  $U$ , permite calcular alguns parâmetros, como o tempo de chegada da onda à estrutura e o comprimento de onda. Como explicado anteriormente, a velocidade da onda de choque é superior à velocidade de propagação do som no ar. De acordo com [23], pode ser utilizada a relação de Rankine-Hugoniot, para determinar a velocidade da onda de choque, através de:

$$U = C_0 \sqrt{1 + \frac{(\gamma+1)P_{so}}{2\gamma P_a}} \quad (2.12)$$

Onde  $C_0$  é a velocidade do som no ar (340.29 m/s). Se o ar for considerado um gás ideal, com o rácio de calor específico  $\gamma = 1.4$ , obtemos da equação (2.12):

$$U = 340.29 \sqrt{1 + \frac{6P_{so}}{7P_a}} \quad (2.13)$$

Também o UFC [7] apresenta um ábaco, para a velocidade da onda de choque, como uma função do pico de pressão incidente. Comparando as duas formulações, representadas na Figura 2.8, pode-se confirmar que estas apresentam resultados semelhantes.

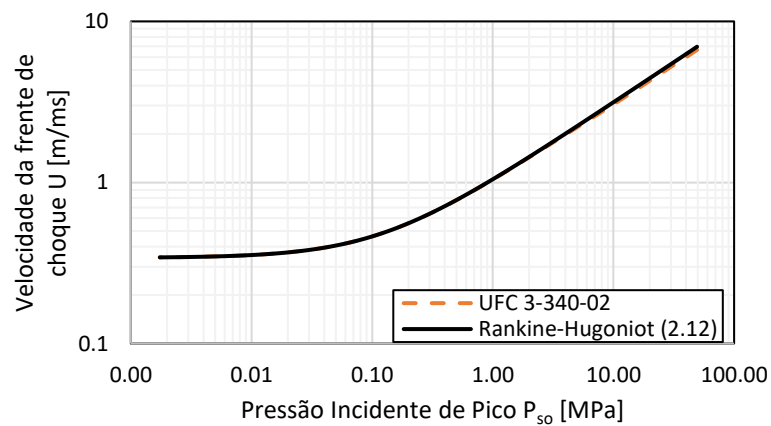


Figura 2.8: Velocidade da frente de choque, adaptado de [7,10].

2.1.9 Comprimento de onda

O comprimento da onda da fase positiva,  $L_w$ , corresponde ao comprimento da região em que a sobrepressão é experienciada a um dado tempo  $t$ . De acordo com [18], este valor pode ser obtido através da seguinte equação:

$$L_w = Ut_0 \tag{2.14}$$

Sendo  $U$  a velocidade da frente de choque e  $t_0$  a duração da fase positiva expressos em m/ms e ms, respetivamente.

2.1.10 Categorias de explosões

Considerando a zona onde se dá a explosão, de acordo com o UFC [7], podemos dividir as explosões em dois grandes grupos: as confinadas e as não confinadas, assim como nas suas categorias, indicadas na Tabela 2-1.

Estado de confinamento da carga	Categorias de explosões
Não-confinadas	Explosão em espaço aberto (No.1)
	Explosão no ar (No.2)
	Explosão em contacto com o solo (No.3)
Confinadas	Totalmente ventilada (No.4)
	Parcialmente confinada (No.5)
	Totalmente confinada (No.6)

Tabela 2-1: Categorias das explosões [7].

A localização das explosões não confinadas, está ilustrada na Figura 2.9 enquanto que as explosões confinadas estão representadas na Figura 2.10.



Figura 2.9: Categorias de explosões não-confinadas, adaptado de UFC 3-340-02 [7].

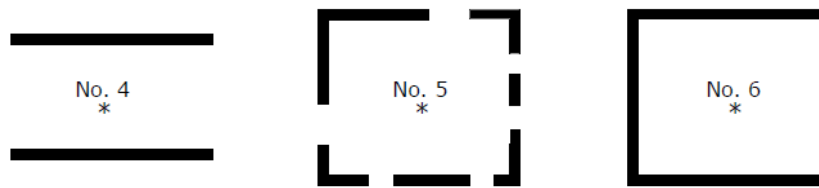


Figura 2.10: Categorias de explosões confinadas, adaptado de [36].

Se considerarmos as explosões em ar aberto, sabe-se que a onda de choque não sofre qualquer amplificação, desde a sua origem até atingir a estrutura. Esta situação corresponde ao No.1. Por outro lado, as explosões com as localizações No.2 e No.3, sofrem amplificações da sua onda de choque, devido à proximidade que têm do solo. Especificamente no caso No.3, essa amplificação da onda de choque, faz-se sentir logo a seguir ao ponto onde ocorre a detonação.

Em relação às situações de cargas explosivas confinadas, em que o explosivo se encontra dentro de barreiras, ou de outros tipos de estruturas com mais de uma superfície aberta para a atmosfera, recaímos no No.4.. Nesse caso, a onda é amplificada pelas superfícies da estrutura, e os produtos dessa detonação, são imediatamente totalmente ventilados para a atmosfera, formando uma onda de choque.

Esta ventilação total, não ocorre na situação No.5, que representa uma explosão situada no interior de uma estrutura com pequenas aberturas. Nestas situações, a onda inicial é amplificada e os produtos da detonação são ventilados para a atmosfera depois de um período de tempo finito. Por ultimo, temos a situação No.6, associada a um total confinamento do explosivo. Estas condições, geram uma onda que não é ventilada e uma pressão de gases de longa duração, dependendo esta da quantidade de material explosivo.

O principal foco desta dissertação são as explosões não-confinadas, e serão essas que terão maior destaque nas análises efetuadas. No entanto, devido à utilização das explosões em situações confinadas, como parte de validação de modelos numéricos, estas serão também mencionadas, ainda que de forma breve, nas seguintes secções.

#### 2.1.11 Explosões em espaço aberto

É uma explosão que ocorre ao ar livre, em que a onda de choque se vai propagando através da atmosfera circundante, afastando-se do centro de detonação, até, eventualmente, atingir a estrutura alvo, não havendo amplificação da onda, como mostra a Figura 2.11 [7].

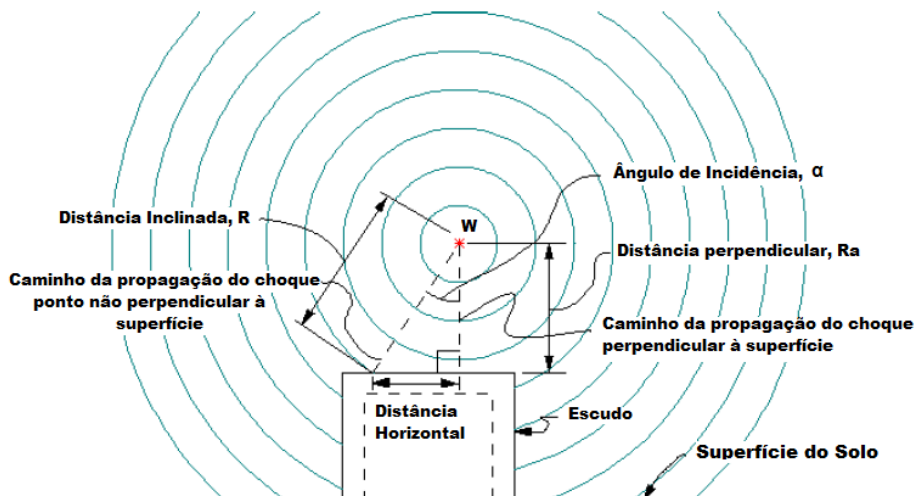


Figura 2.11: Explosão ao ar livre, adaptado de UFC 3-340-02, [7].

Antes do impacto, a onda tem um comportamento típico de uma onda de choque. Quando ocorre o impacto, a onda de choque sofre uma reflexão e amplificação. No entanto, é habitual considerar-se que as superfícies e os solos são rígidos, e não existe dissipação de energia resultante da sua deformação. De acordo com as características dos solos, esta situação é passível de levar a discrepâncias entre os resultados experimentais e analíticos.

### Reflexão Normal da Onda Explosiva

A reflexão normal, ocorre quando o vetor de deslocamento da onda de choque incide perpendicularmente numa superfície.

Quando a onda explosiva entra em contacto com uma superfície rígida, a pressão que é refletida, é maior do que o pico de pressão incidente  $P_{so}$  mostrada na Figura 2.12. Este aumento deve-se à natureza da propagação da onda explosiva através do ar.

Num caso ideal de elasticidade linear, as partículas devem ser capazes de regressar de forma livre levando a uma reflexão igual à pressão incidente, e assim a superfície iria sentir uma duplicação da pressão atuante. Numa forte explosão, a onda de choque é um fenómeno não linear, o reflexo dessas partículas está obstruído pelas partículas de ar subsequentes, que são transferidas para a superfície, levando a valores de pressão refletida muito maiores. Assim, a pressão atuante é muito maior do que a pressão incidente.

Em termos de dimensionamento, é a pressão refletida que deve ser tida em consideração. A Figura 2.12, mostra a diferença entre a pressão incidente e a pressão refletida numa superfície infinita. A pressão refletida consegue ser muito maior do que a pressão incidente, dependendo da geometria da estrutura, do tipo, tamanho, massa, distância do explosivo e também da interferência de obstáculos entre o ponto de detonação e a estrutura.

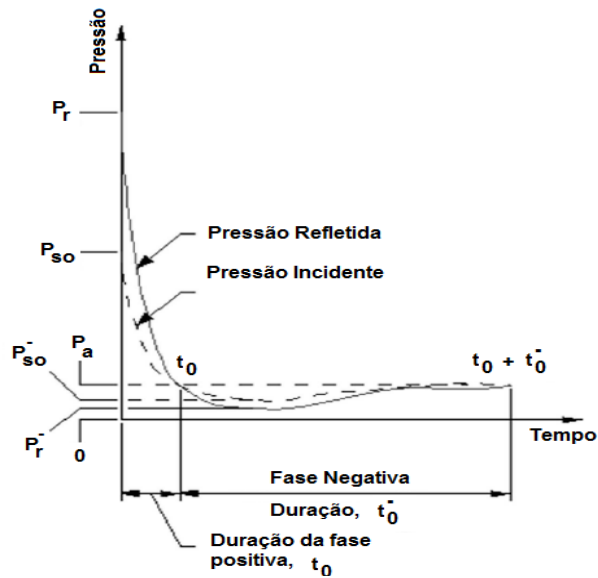


Figura 2.12: Variação pressão-tempo para explosões ao ar livre, adaptado de UFC 3-340-02, [7].

Para estimar o pico de pressão refletida, pode-se usar a equação (2.15) de Rankine-Hugoniot [23]:

$$q_s = \frac{P_{so}^2}{2\gamma P_a + (\gamma - 1)P_{so}} \quad (2.15)$$

Onde,  $\gamma$  é o rácio, entre o calor específico a pressão constante e o calor específico a volume constante, e  $P_a$  é a pressão atmosférica. Quando, a onda de choque atinge uma superfície sólida, e a sua trajetória é normal a essa superfície, o pico de sobrepressão refletida pode ser apresentada através da expressão de [23]:

$$P_r = 2P_{so} + (\gamma + 1)q_s \quad (2.16)$$

Assumindo o ar como um gás ideal,  $\gamma=1.4$ , a expressão 2.16 geralmente fornece boas aproximações para situações correntes. Assim, a expressão de Rankine-Hugoniot pode ser simplificada:

$$P_r = 2P_{so} \left( \frac{7P_a + 4P_{so}}{7P_a + P_{so}} \right) \quad (2.17)$$

Como alternativa [10], para determinar o pico de sobrepressão refletida, expressa em psi, usa-se a equação de Newark, para valores de pico de sobrepressão incidente abaixo dos 40psi:

$$P_r = (2 + 0.05P_{so})P_{so} \tag{2.18}$$

Finalmente, o UFC [7] definiu de forma empírica, o rácio da sobrepressão refletida. Estes valores são apresentados na Figura 2.13, juntamente com as formulações anteriores, de forma a serem comparadas.

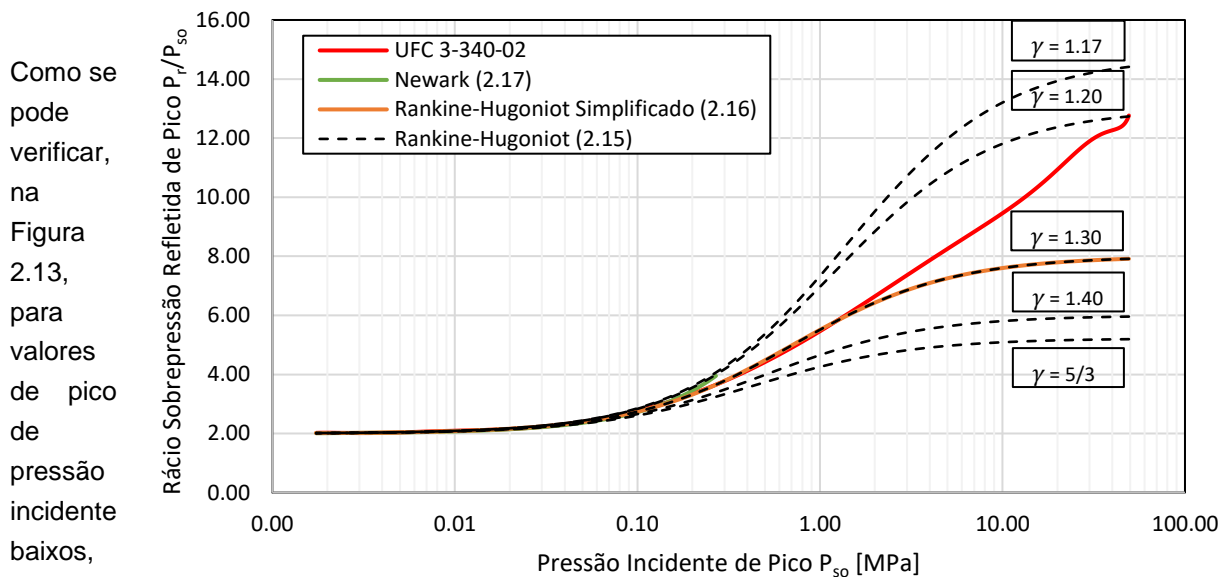


Figura 2.13: Rácio de sobrepressão refletida, adaptado de [7,10,23].

todas as formulações fornecem resultados semelhantes. No entanto, à medida que o pico de pressão incidente aumenta, a dependência do valor do rácio apresentado, na componente  $\gamma$ , torna-se bastante forte. A influência do rácio de calor específico,  $\gamma$ , é também considerada na abordagem do UFC, como mostra o gráfico.

Note-se, que as equações (2.16) e (2.17) apenas definem o pico de sobrepressão refletida, e não consideram a variação no tempo para a pressão refletida. Apenas se consegue estimar o impulso refletido se o impulso incidente for conhecido ou previsível, assumindo semelhanças entre as suas variações temporais destas duas grandezas. Assim, recorre-se a relação apresentada na equação (2.19).

$$\frac{i_r}{i_s} \approx \frac{P_r}{P_{so}} \tag{2.19}$$

### Reflexão Obliqua da Onda Explosiva



A reflexão oblíqua, ocorre quando o ângulo de incidência da onda de choque na superfície não é perpendicular. De acordo com Kinney e Graham [17], as reflexões oblíquas podem ser classificadas em dois tipos, reflexões oblíquas regulares e reflexões Mach, dependendo se o ângulo de incidência na superfície é inferior a 39,23° ou superior, respectivamente. Este ângulo, é medido em relação ao eixo perpendicular a superfície.

A variação da pressão refletida e o impulso refletido, depende do ângulo de incidência da onda de choque na superfície. Através da expressão (2.20) é possível estimar o valor do pico de pressão em função do pico de pressão incidente:

$$P_r = C_r \cdot P_{so} \tag{2.20}$$

Onde  $C_r$  é o coeficiente de pressão refletida, ou seja, o rácio entre a pressão refletida e a pressão incidente. Este pode ser determinado através de um ábaco, apresentado por UFC [7] como se pode ser na Figura 2.14.

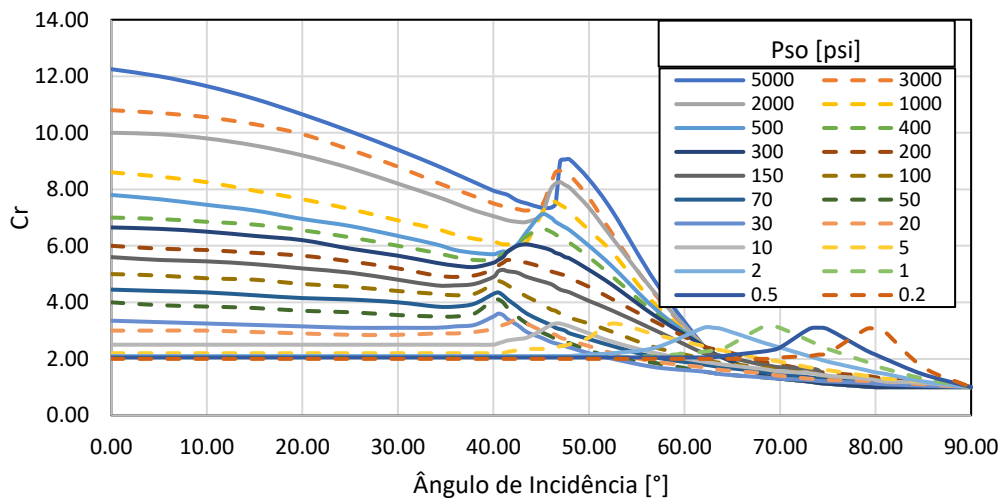


Figura 2.14: Coeficiente pressão refletida  $C_r$ , adaptado de UFC 3-340-02, [7].

### 2.1.12 Explosões no ar

Uma onda de choque no ar é aquela que sofre reflexões antes do impacto na estrutura, resultando numa amplificação das suas propriedades. No UFC, as explosões no ar são definidas como uma explosão que ocorre a duas a três vezes a altura de edifício de dois pisos.

No momento do impacto no solo, a onda de choque incidente é refletida. A onda refletida, viaja com uma velocidade maior do que a onda incidente. Isto resulta da junção da onda refletida e da onda incidente, criando aquilo que se chama uma frente Mach. Para simplificar

o problema, assume-se que a frente Mach é uma onda plana, com uma pressão uniforme e uma magnitude semelhante à pressão incidente. Este fenómeno, pode ser observado na Figura 2.15, e ocorre, quando o ângulo incidente excede o angulo crítico de incidência,  $\alpha_{crit}$ , de  $40^\circ$ .

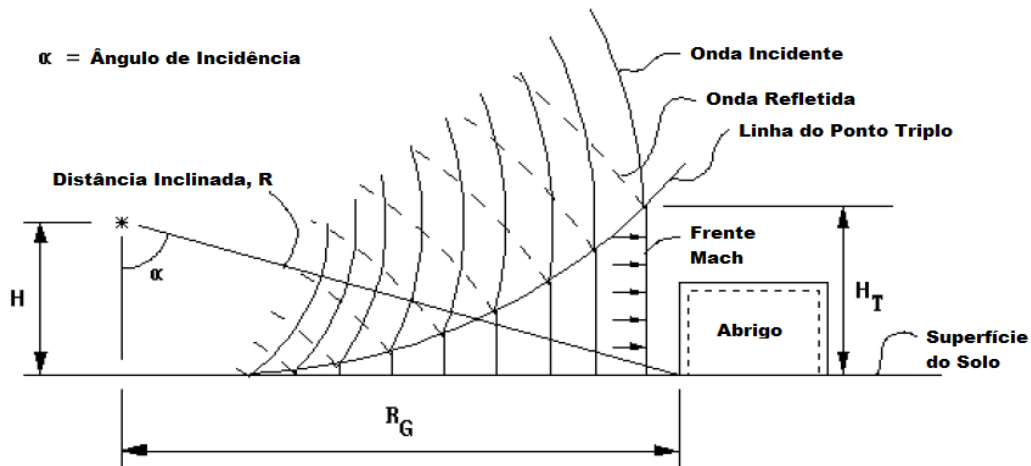


Figura 2.15: Ambiente da explosão no ar, adaptado de UFC 3-340-02, [7].

O ponto em que as ondas incidentes e refletidas, intersectam o sistema Mach, é referida como o ponto triplo. Na Figura 2.15, é possível ver a linha definida por esses pontos, cuja altitude aumenta, à medida de que a onda atravessa a atmosfera. Esta altura,  $H_t$ , é extremamente importante no dimensionamento estrutural, porque é ela que determina o carregamento da estrutura. Quando a altura do ponto triplo, é maior do que a altura da estrutura, considera-se uma distribuição uniforme da pressão.

### 2.1.13 Explosões em contacto com o solo

Uma explosão em contacto com o solo, está definida para situações em que a explosão se dá muito próximo do solo ou em contacto com o mesmo. Estas explosões, resultam numa onda de choque, que é amplificada no momento da detonação pela reflexão no solo, como é ilustrado na Figura 2.16.

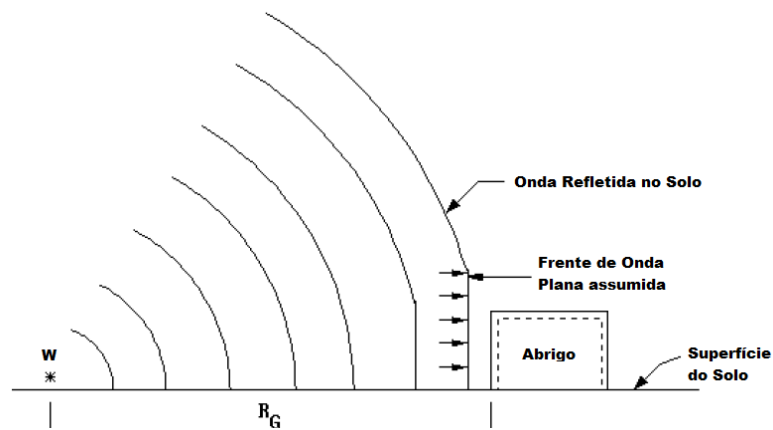


Figura 2.16: Ambiente de explosão em contacto com o solo, adaptado de UFC 3-340-02, [7].

Considerando o solo perfeitamente uniforme, definido como um rígido, uma vez que a explosão ocorra, a frente de onda deverá ser hemisférica. Com isso, a energia da explosão, deve estar concentrada numa superfície mais pequena (metade da superfície de uma explosão no ar), e as relações apresentadas no capítulo do fenómeno das explosões, secção 2.1.3, são válidas se for utilizado o valor de  $2W$  em lugar de  $W$ . No entanto, se considerarmos a dissipação de energia, este valor de 2 pode ser reduzido. De acordo com Bulson [3], é sugerido a redução do fator para 1.7, enquanto que Baker [1] propõe um valor de 1.8. Ambos os valores são obtidos de forma empírica, dependendo das características do solo. Assim, a distancia reduzida passa a ser expressa por:

$$Z = \frac{R}{(1.7W)^{\frac{1}{3}}} \quad \text{ou} \quad Z = \frac{R}{(1.8W)^{\frac{1}{3}}} \quad (2.21)$$

## 2.2 Ações explosivas exteriores

Tendo em vista que esta dissertação, dá mais ênfase nas situações de explosões não-confinadas, serão apresentadas algumas recomendações adicionais, dadas pelo UFC [7].

As cargas dinâmicas resultantes das explosões aparecem devido ao aumento instantâneo da pressão no ar, como resultado da passagem da frente de choque e das forças associadas ao fluxo de vento, que acompanham a onda explosiva. De acordo com o UFC, as ações explosivas nas estruturas dependem de vários fatores:

- A magnitude da explosão;
- A localização da explosão em relação à estrutura em causa;
- A configuração geométrica e rigidez da estrutura;
- A orientação da estrutura em relação à explosão e ao solo.

Os dois primeiros pontos foram revistos em secções anteriores. A geometria da estrutura, tem influência na forma como a onda explosiva interage com ela. Por outro lado, a sua rigidez vai determinar se a ação é influenciada pela estrutura ou não. Se a estrutura tiver rigidez suficiente, a ação explosiva não vai introduzir na estrutura um carregamento que influencie a sua deformação. Contudo, existem estruturas que se deformam ou que se movem de tal forma, que o seu comportamento muda o carregamento introduzido.

### Simplificações do UFC

Para facilitar o cálculo da resposta estrutural das ações resultantes de uma detonação, algumas simplificações são assumidas pelo UFC:

- A estrutura é geralmente retangular na forma e no posicionamento no solo face à direção da explosão;
- A estrutura tem rigidez suficiente para não influenciar o comportamento da onda de choque;
- A pressão incidente de pico de referência é  $P_{so}=1.38$  MPa (200 psi) ou menos;
- O sistema Mach estende-se acima da altura do edifício. Isto resulta num carregamento, causado por uma frente de onda de choque plana, que caracteriza este sistema.

### Curva Pressão-Tempo

Para fins de dimensionamento, a diminuição da pressão incidente, é usualmente aproximada através de um impulso de pressão triangular equivalente, como se pode observar na Figura 2.17.

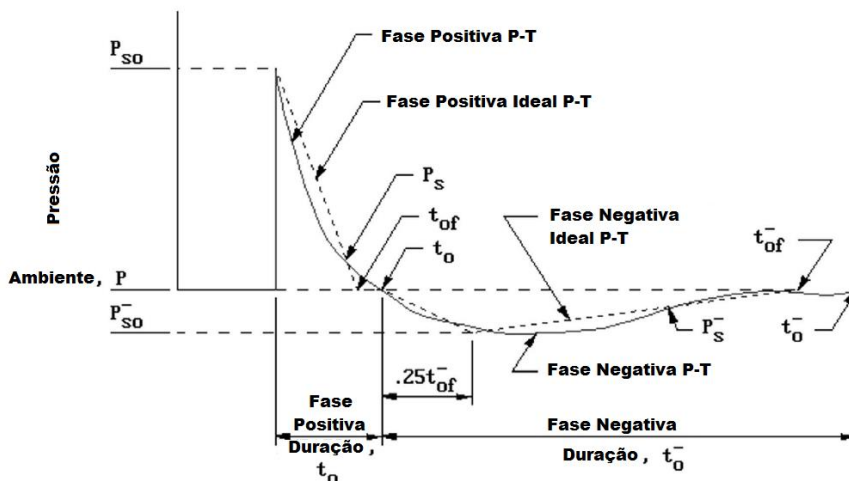


Figura 2.17: Variação pressão-tempo ideal, adaptado de UFC 3-340-02, [7].

Para manter o impulso total positivo, é necessário substituir a duração real positiva pela duração fictícia, expressa em função do impulso total e do pico de pressão:

$$t_{of} = \frac{2i}{P} \quad (2.22)$$

Esta relação é aplicada para ambas as pressões, incidente e refletida, usando posteriormente os valores de pressão e impulso obtidos para a onda refletida. Note-se que esta duração fictícia,  $t_{of}$ , é menor do que a duração real,  $t_0$ , existindo um intervalo de tempo, que ocorre entre a duração fictícia e o início da fase negativa. Este intervalo de tempo, que é visível na Figura 2.17, deve ser considerada, se o objetivo for realizar uma análise completa de deslocamentos.

### 2.3 Resposta estrutural a ações dinâmicas

Para prever o comportamento de uma estrutura sujeita a ações explosivas, é necessário ter conhecimento sobre a componente dinâmica destas ações. Quanto maior for o pico de pressão e menor for o tempo do carregamento, maiores serão as diferenças entre as ações dinâmicas e as estáticas. Em carregamentos dinâmicos, os efeitos da inércia devem-se a alterações na aceleração da massa. Estes efeitos, produzem uma resistência às mudanças de velocidade que precisam de ser consideradas. Num regime de resposta impulsivo, o tempo de duração das cargas explosivas é muito mais reduzido, tal que a carga dinâmica deixa de atuar antes que a estrutura tenha tempo de resposta.

Quanto ao dimensionamento estrutural em relação a cargas dinâmicas, é importante considerar as deformações plásticas da estrutura. Caso contrário, pode levar a uma situação de sobredimensionamento da estrutura, onde para resistir a elevadas cargas dinâmicas resultantes de uma explosão, teríamos de ter uma estrutura extremamente robusta, conduzindo a um aumento significativo do custo da mesma. Para evitar esta situação, os elementos estruturais devem ser dimensionados, de modo a tirar partido das suas deformações plásticas [22].

Paralelamente ao deslocamento de cada elemento, podemos também definir a sua deformação, de acordo com a alteração da posição relativa dos seus pontos e com a mudança da sua forma e/ou dimensão. Sobre a deformação, é habitual utilizar-se a sua taxa como medidor de níveis de deformação. A taxa de deformação representa assim, a velocidade com que a deformação ocorre. Se considerarmos uma mudança rápida no carregamento, a taxa de deformação irá ser maior e ocorrem os chamados efeitos da taxa de deformação. Estes efeitos da taxa de deformação, afetam altamente a resposta do material, uma vez que levarão a um aumento da resistência do material.

A ductilidade está relacionada com a capacidade que o material tem para conseguir deformar-se face a uma dada solicitação. Alguns elementos estruturais com um comportamento mais dúctil, têm maior capacidade de absorver energia, e podem prevenir o colapso total ou parcial de uma estrutura.

Na Figura 2.18, é apresentada a diferença, entre considerar um comportamento frágil e um comportamento dúctil. No que diz respeito a ações dinâmicas como a explosão, é preferível dimensionar a estrutura com elementos estruturais dúcteis, com grande capacidade de deformação plástica e de absorção de energia, do que com elementos mais frágeis [22].

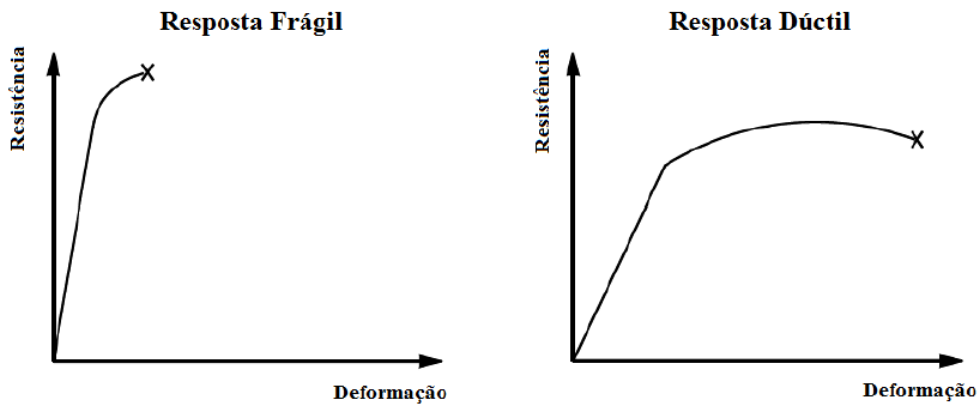


Figura 2.18: Comportamento dúctil e frágil.

### Propriedades dos materiais

Um material tem maior resistência quando é sujeito a ações impulsivas, do que quando é sujeito a ações estáticas com a mesma magnitude. Isto deve-se aos efeitos de inércia gerados, quando a estrutura tenta resistir às mudanças de velocidade, provocadas pela chegada da onda de choque. Quanto maior for a velocidade de deformação imposta pelas cargas dinâmicas num determinado material, maior será a sua resistência.

Para converter as resistências dos materiais de cargas estáticas em dinâmicas, é normalmente utilizado um fator de incremento dinâmico (DIF). O DIF é o rácio entre a resistência dinâmica e a resistência estática. Quanto maior for a velocidade de deformação maior será o DIF [22].

### Propriedades Dinâmicas do Aço Estrutural

As propriedades mecânicas do aço variam com a velocidade do carregamento. Relativamente aos valores estáticos normalmente usados no dimensionamento, as cargas dinâmicas provocam variações nas seguintes propriedades:

- A tensão de cedência aumento substancialmente;
- A tensão última de tração aumenta ligeiramente;
- O módulo de elasticidade não varia, e a extensão na rotura permanece constante ou diminui ligeiramente.

Em elementos sujeitos a ações explosivas, os efeitos dinâmicos resultantes de rápidas taxas de deformação, podem ser expressos em função do tempo até atingir a cedência. Neste caso, o comportamento mecânico, depende do regime de carregamento e do sistema de resposta, que determina o efeito dinâmico sofrido por um material específico.

Assumindo um valor constante, desde o zero até à cedência, a taxa de deformação pode ser determinada de acordo com a equação (2.23) [7].

$$\dot{\epsilon} = f_{ds}/E_s t_E \quad (2.23)$$

Onde  $\dot{\epsilon}$  é a taxa de deformação média no intervalo elástico do aço (in/in/sec),  $t_E$  o tempo até se atingir a cedência (sec) e  $f_{ds}$  a tensão de dimensionamento dinâmico.

O UFC 3-340-02, fornece exemplos de fatores de amplificação dinâmico para elementos produzidos com os aços ASTM A36 e A514, como mostra a Figura 2.19.

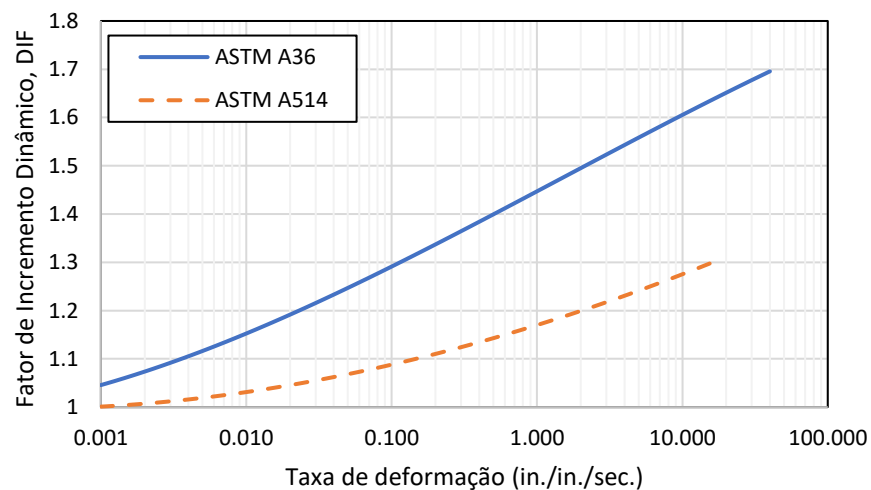


Figura 2.19: Fatores de amplificação dinâmico para tensões de cedência a várias taxas de deformação para aços ASTM A36 e A514, [7].

Hoje em dia, a utilização de programas de cálculo automático, tem vindo a ser explorada na simulação de ações explosivas. Estes programas de cálculo automático, permitem através das suas formulações, o cálculo da resposta de estruturas sujeitas a cargas dinâmicas, considerando também a não-linearidade das propriedades dos materiais e da sua geometria.

Um dos programas de cálculo automático, que lida com problemas dinâmicos e não lineares tais como, impacto, penetração e explosões é o LS-DYNA. No capítulo seguinte será abordada a utilização deste programa de cálculo automático, assim como as formulações utilizadas pelo programa, para a caracterização da resposta estrutural face a ações explosivas, através do Método dos Elementos Finitos (MEF).





## Capítulo 3

# Cúpulas Geodésicas

Neste capítulo são apresentadas as cúpulas geodésicas. Será feita uma revisão do seu enquadramento histórico, das suas características e do seu funcionamento.

### 3.1 Cúpulas geodésicas

#### 3.1.1 O inventor: Buckminster Fuller

Desde sempre, engenheiros e arquitetos, têm um especial interesse em sistemas estruturais, capazes de cobrir grandes vãos, sem a interferências dos suportes internos. As cúpulas, desde os tempos mais antigos, são utilizadas na Arquitetura, por serem capazes de ocupar o máximo volume, com a menor área de superfície, e são também uma das formas estruturais mais antiga. A primeira cúpula geodésica, foi desenhada e construída em 1922, por Walter Bauersfeld em Jena, Alemanha [12]. Nos anos 1950's, muito devido aos esforços que Buckminster Fuller fez, as cúpulas geodésicas tornaram-se mais frequentes.

Buckminster Fuller foi um americano nascido em Massachusetts, USA. Apesar de nunca ter possuído as qualificações formais de um engenheiro ou de um arquiteto, ele influenciou inúmeros responsáveis dessas áreas [40]. Conseguiu o registo de uma patente, em 1951, para uma versão melhorada do design das cúpulas geodésicas, que desde então, tem sido usada em estruturas como o Poliedro de Caracas (Caracas, Venezuela), Tacoma Dome (WA, USA), Montreal Biosphère (Expo 1967, Montreal, Canada) e The Eden Project (Cornwall, UK). Estas estruturas estão ilustradas na Figura 3.1.

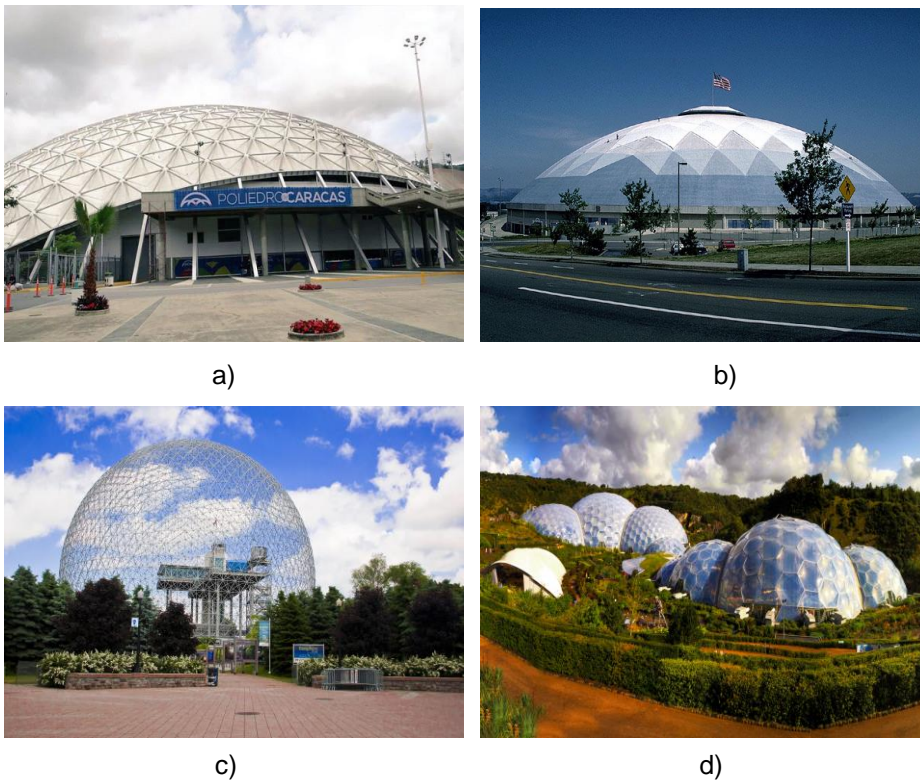


Figura 3.1: Poliedro de Caracas a), Tacoma Dome b), Montreal Biosphère c) e The Eden Project d) [8,19].

A paixão de Buckminster Fuller pelas cúpulas geodésicas, vem da afinidade do seu design com a Natureza, um efeito que ele descreveu como a “*energetic-synergetic*” geométrica das cúpulas [11]. “*Energetic*” é referência à ideia de Fuller, que a Natureza constrói sempre as estruturas mais económicas. Afirmou ainda, que as cúpulas geodésicas se baseiam em princípios, que incorporam distribuições de força semelhantes às dos átomos, moléculas e cristais, tornando as formas de construção mais leves e eficientes. A sinergia é definida como “*comportamentos integrados da natureza e comportamentos de um sistema inteiro, imprevisível pelo comportamento de qualquer subconjunto dos seus componentes*” [11].

Por exemplo, os gases de hidrogénio e oxigénio, quando combinados nas condições certas produzem água, e isso não pode ser previsto pelas propriedades individuais de outro gás [26]. Da mesma forma, a cúpula geodésica apresenta uma robustez e rigidez maiores da que resulta da soma dos componentes individuais que a constituem.

### 3.1.2 A natureza das cúpulas geodésicas

A palavra geodésica, provém do termo “*geodesia*”, que é a ciência geológica que estuda as dimensões, a forma e o campo de gravidade da Terra. Aparece no latim como “*geodaesia*”, e no grego como “*geôdaisia*”, que significa a divisão da Terra, onde “*geo*” significa Terra e “*daiestha*” significa dividir.

Geodésica, é vista como a distância entre dois pontos pertencentes ao mesmo espaço tridimensional. Na prática, define-se como uma linha geodésica, a que define o menor segmento entre dois pontos, pertencentes à superfície de uma esfera.

No domínio das engenharias, o termo estrutura geodésica, é utilizado em diversas áreas do conhecimento como Topografia, Cartografia ou Geografia. De forma geral, é usado para definir uma rede de pontos, localizados sobre uma superfície não obrigatoriamente plana.

Assim, uma estrutura geodésica, é uma superfície gerada pelo acoplamento de vários polígonos planos, em que cada uma das arestas destes polígonos, corresponde a um elemento estrutural, formando uma rede de nós e barras. Na intersecção das barras temos os nós da estrutura, que pertencem a uma superfície esférica perfeita ou oval. Estes polígonos podem ser regulares, como triângulos ou quadrados, ou irregulares, com diferentes formatos, gerando superfícies e malhas estruturais complexas, que podem ter mais do que uma camada. Pegando no exemplo da superfície do globo terrestre, podemos definir uma estrutura geodésica, através da ligação dos pontos de intersecção entre os meridianos e os paralelos imaginários desta superfície esférica [8].

#### 3.1.3 Geometria

Uma esfera é um objeto matemático, que contém o maior volume com a mínima área de superfície. Tirando partido desta característica, a estrutura da cúpula geodésica é tanto mais útil quanto mais se aproximar de uma esfera.

Os sólidos platônicos ou poliedros regulares, constituem a melhor configuração na tentativa de aproximar uma esfera. Segundo Buckminster Fuller [11], a melhor figura que aproxima uma esfera, é aquela que utiliza polígonos triangulares de dimensão constante, e que façam o mesmo ângulo entre si. Recorrendo aos sólidos platônicos existentes, apenas três cumprem esses requisitos: o tetraedro, o octaedro e o icosaedro, ilustrados na Figura 3.2. Estes três poliedros são boas aproximações, no entanto, o icosaedro é o que melhor aproxima a esfera.

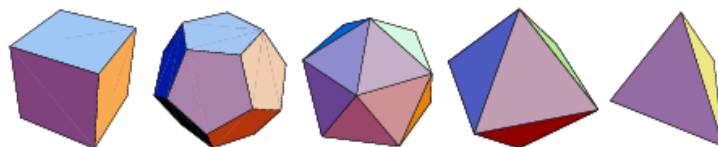


Figura 3.2: Sólidos platônicos [35].

Buckminster Fuller, baseou o design original das cúpulas geodésicas, na divisão esférica de um icosaedro, Figura 3.3, apesar de terem sido construídas inicialmente usando sistemas simétricos de octaedro e dodecaedro, para contornar a patente de Buckminster Fuller. Um

icosaedro regular, é um poliedro convexo, constituído por vinte faces caracterizadas por triângulos equiláteros, cujos vértices podem ser descritos pela intersecção de três grandes círculos (círculos com um diâmetro igual ao da esfera), e são designados por pontos geodésicos. Os pontos A, B e C, da Figura 3.4., são pontos geodésicos. Ao juntarmos os vértices com linhas retas, em vez de curvas, formam-se triângulos planos, gerando a rede geodésica utilizada em estruturas, como mostra a Figura 3.3 [19].

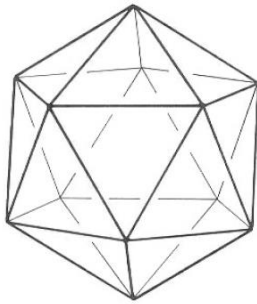


Figura 3.3: Icosaedro [12].

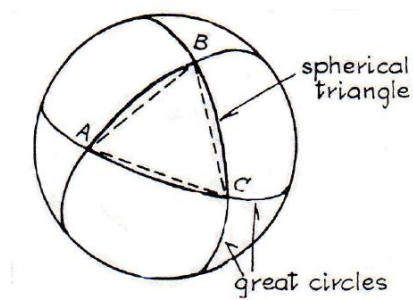


Figura 3.4: Círculos perfeitos [19].

#### 3.1.4 O conceito de frequência

A rede geodésica representa a superestrutura, constituída por elementos de barras e nós. No entanto, à medida que o diâmetro da cúpula aumenta, os membros tornam-se muito compridos e excessivamente esbeltos, o que torna a estrutura pouco eficiente. Com o objetivo de tornar a rede mais regular, opta-se por introduzir mais membros, provenientes da divisão de forma modular de cada triângulo equilátero, em várias subdivisões.

Existem duas classes para a subdivisão geodésica [19]. Na Classe I, as linhas de divisão são paralelas às arestas dos membros originais. Na Classe II, as linhas de divisão são perpendiculares aos membros. Ambas as classes são ilustradas através da Figura 3.5 e 3.6, respetivamente.

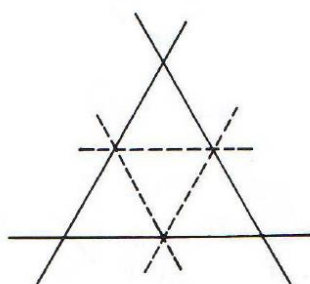


Figura 3.5: Subdivisão de Classe I [19].

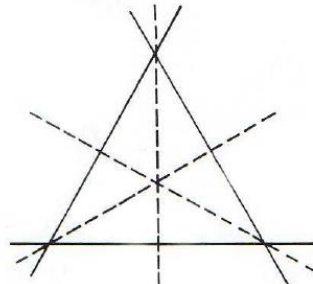


Figura 3.6: Subdivisão de Classe II [19].

A Classe I produz uma geometria onde os nós do triângulo pertencem a um círculo perfeito, o que se traduz num design simples de um hemisfério com conexões planas. Esta situação não é possível de obter através de uma subdivisão Classe II. As subdivisões de Classe II

exigem um menor valor de comprimentos de barras, o que é vantajoso no processo construtivo. No entanto, as diferenças entre os comprimentos de barras individuais, são conseqüentemente, maiores, numa cúpula de classe II, o que se traduz numa distribuição de esforços menos uniforme [19].

A subdivisão, também conhecida como frequência, é definida pelo número de triângulos em que cada aresta original é dividida. Na Figura 3.7 estão representados exemplos de várias frequências. A frequência é normalmente indicada em primeiro lugar por um número, com um sufixo "V". É de salientar, que a nova rede resultante destas subdivisões, não é constituída por triângulos equiláteros, sendo que as barras que formam o esqueleto, mostram variações de comprimentos, e o número de comprimentos diferentes necessários para fabricar a cúpula, aumenta com a frequência.

As cúpulas de frequência de ordem ímpar não podem produzir uma forma hemisférica, uma vez que o anel de perímetro equatorial só é produzido para frequências de ordem pares. As frequências de ordem ímpar são nominalmente referidas com o sufixo 3/8avos ou 5/8avos, para indicar se o anel do solo está acima ou abaixo do equador da esfera geodésica, respetivamente.

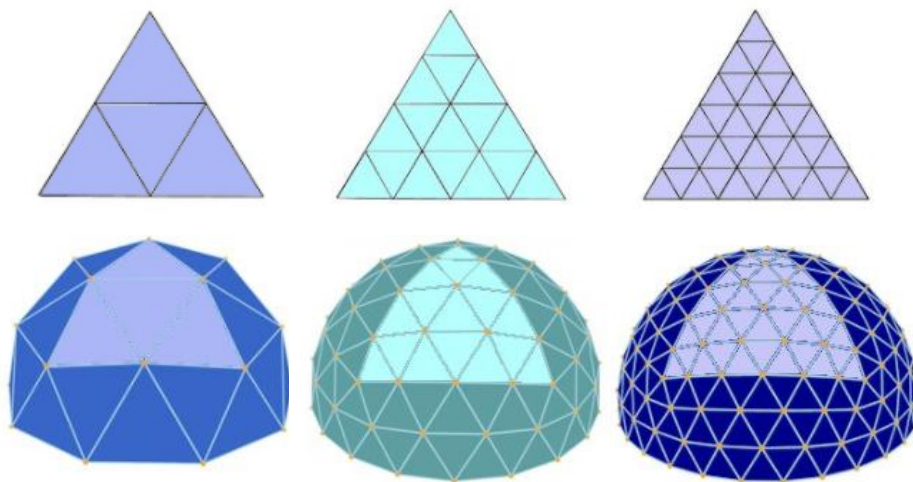


Figura 3.7: Cúpulas geodésicas: 2V, 4V e 6V, [41].

### 3.1.5 Funcionamento estrutural

A forma como as cúpulas geodésicas se comportam, depende da configuração dos seus elementos. As cúpulas geodésicas têm uma grande rigidez em todas as direções, e são cinematicamente estáveis (não há mecanismos), quando idealizadas como uma treliça espacial. Uma cúpula que não seja totalmente triangulada, não é cinematicamente estável quando idealizada como treliça espacial, e a rigidez pode variar em diferentes direções na superfície da cúpula. Enquanto as cúpulas radiais exibem uma boa rigidez face a cargas uniformes, as cúpulas triangulares demonstram excelente rigidez em relação a cargas não uniformes e concentradas. Isto torna as cúpulas geodésicas com elementos triangulares uma boa solução para resistirem a cargas dinâmicas como as explosões [24].

De acordo com Richter [27], o uso das subdivisões geodésicas, produz estruturas com uma boa resistência, comparativamente às cúpulas reforçadas com várias camadas.

O triângulo é uma figura plana, que tem a máxima rigidez associada a menores esforços. Sistemas triangulares simétricos, permitem uma absorção de energia mais eficaz, e a própria rede geodésica, é uma forma estrutural com propriedades auto estabilizadoras [27].

### Componentes do sistema

O sistema construtivo de uma estrutura geodésica [8], é composto basicamente por três elementos principais: os nós, as barras e o sistema de cobertura.

Os nós da estrutura geodésica [26], ou vértices, são os pontos mais vulneráveis e especiais do sistema. São estes que recebem os esforços de compressão provenientes das barras, podendo trabalhar articulados. Numa estrutura ideal, os nós não transmitem esforços de flexão às barras promovendo a estabilidade estrutural. Embora tenham sido feitos muitos estudos sobre os sistemas de nós estruturais a utilizar neste tipo de estruturas, não será abordada essa matéria nesta dissertação. Através da Figura 3.8, podemos observar um dos inúmeros sistemas de nós, existentes para a construção das cúpulas geodésicas.



Figura 3.8: Sistema de conexão de nós. Sistema Mero [26].

As barras são componentes das cúpulas geodésicas, que convergem aos nós. As barras estruturais podem ser feitas com tubos metálicos redondos ou quadrados, com perfis leves abertos, ou utilizando materiais pouco convencionais como o bambu e outros tipos de madeira.

Estas barras recebem os esforços axiais de tração e compressão fazendo a sua transmissão aos nós. A interação entre os nós e as barras, define a forma como a distribuição de esforços é feita.

Os painéis de revestimento são fixados às barras e aos nós da estrutura. Existem vários materiais que podem fazer parte deste sistema de cobertura. Embora a escolha do material, seja na maior parte dos casos, uma questão de estética, existem situações em que a

resistência da cobertura pode influenciar no comportamento estrutural, quando esta funciona em conjunto com a rede estrutural constituída pelos nós e pelas barras.

É também, um grande desafio da comunidade propor a utilização de tipos de materiais inovadores e de disposições construtivas alternativas que potenciem a rápida montagem e transportabilidade dos mesmos.

#### 3.1.6 Vantagens e desvantagens

As cúpulas geodésicas, proporcionam estruturas com um esqueleto extremamente leve, que são ao mesmo tempo muito robustas e rígidas, englobando uma grande área sem necessidade de recorrer a suportes internos. Devido ao baixo peso, ao perímetro arredondado, e às cargas uniformemente distribuídas das estruturas das cúpulas geodésicas, não é, geralmente necessário recorrer à utilização de fundações profundas. A construção de fundações superficiais traduz-se, num considerável ganho de tempo e dinheiro. A robustez da estrutura está associada à sua redundância estrutural, constituída por elementos individuais que em uníssono têm um funcionamento colaborativo. Este comportamento leva a que, em caso de falha de um dos elementos estruturais, os esforços sejam facilmente distribuídos para os elementos adjacentes.

No entanto, as cúpulas geodésicas também têm as suas desvantagens. Uma delas é que as cordas do seu perímetro equatorial, que acompanham a forma de um icosaedro, produzem uma linha irregular no solo, o que pode ser objeto de discussão em questões arquitetónicas. A aparência das cúpulas, é muito dependente da forma e do material com que é revestida. As contrariedades mais comuns são funcionais, como o problema do isolamento sonoro quando existem vários compartimentos no interior da cúpula, devido à sua forma hemisférica, levando à perda de privacidade. Outra questão tem a ver com a forma curva das paredes da cúpula, que podem diminuir o espaço útil [19].





## Capítulo 4

# Modelação no Software LS-DYNA

Neste capítulo é apresentado a modelação através do programa de cálculo automático LS-DYNA e todos os procedimentos utilizados na simulação das explosões. São abordadas as formulações associadas ao estudo das cúpulas geodésicas sujeitas a ações explosivas, assim como a calibração dos modelos numéricos efetuados.

### 4.1 Descrição LS-DYNA

Nesta secção apresenta-se o programa de cálculo automático utilizado nas simulações numéricas. São apresentadas as formulações utilizadas pelo programa para a aplicação das ações explosivas, com ênfase no método Load Blast Enhanced, que será aplicado nos modelos. É também explicada a abordagem Lagrangiana, para a solução de problemas de elementos finitos.

#### 4.1.1 Programa de cálculo automático LS-DYNA

O LS-DYNA é um programa de cálculo automático desenvolvido pela empresa Livermore Software Technology Corporation (LSTC), para fazer face à problemática de estudos dinâmicos e não lineares tais como, impacto, penetração e explosões [39].

Através da utilização de um programa de cálculo automático, baseado em Elementos Finitos é possível aproximar, com um nível aceitável, a resposta dinâmica de estruturas. Os programas computacionais para a simulação de ações explosões, como o LS-DYNA, utilizam soluções empíricas, baseadas em equações revistas anteriormente ou em cálculos numéricos avançados, baseados na Dinâmica Computacional dos Fluidos (CFD). Assim, o LS-DYNA permite fazer uma análise muito completa juntando à Dinâmica Computacional dos Fluidos (CFD), de forma a simular a ação explosiva, uma Análise Computacional Mecânica (CSM) para obter a resposta estrutural. A análise fica completa com a simulação da explosão

induzida pela pressão na estrutura, e com a resposta envolvendo um comportamento altamente não linear [25].

O ideal será, sempre que possível, validar os métodos para simulação da resposta à explosão pela comparação com resultados experimentais. No entanto, nesta dissertação resultados apresentados por outros autores são utilizados para validar os modelos numéricos efetuados.

É ainda importante referir que todas as simulações numéricas desta dissertação foram efetuadas num computador com processador Intel® Core™ i7-6500U, 3.1GHz, com 8GB de memória RAM e 1TB de memória interna e 4CPUs. Foi ainda utilizado um disco externo de 1TB para aumentar a capacidade de armazenamento dos resultados.

#### 4.1.2 Método Lagrangiano

Numa formulação de elementos finitos, várias considerações podem colocar-se quanto ao movimento da malha e do material. O LS-DYNA permite ao utilizador usar uma das três formulações seguintes: a formulação Lagrangiana, a formulação Euleriana e a formulação que combina as duas anteriores denominada Arbitrary-Lagrangian-Eulerian (ALE). O método utilizado nesta análise é o Lagrangiano.

O método Euler é geralmente usado na dinâmica de fluidos, onde são comuns grandes deformações, como é a propagação da onda explosiva no ar. Este método assume que a malha computacional é fixa no espaço, e que o material flui através da malha. O método Lagrangiano é bastante útil no que diz respeito à resposta dos materiais e da estrutura, como é explicado de seguida. Por outro lado, o método ALE assume que a malha se move de forma arbitrária e independente do material, combinando assim as vantagens dos dois métodos anteriores, aumentando a precisão dos resultados.

No método Lagrangiano, o domínio do material é representado por uma malha, em que os pontos do material estão ligados aos nós da malha e a malha move-se e deforma-se juntamente com o material, como mostra a Figura 4.1. Esta abordagem é mais exata e mais fácil de implementar. Vantagens como a precisão na definição de interfaces entre materiais e superfícies livres assim como a capacidade de incorporar modelos mais complexos de materiais fazem com que este método seja bastante utilizado na análise de deformações estruturais [9].

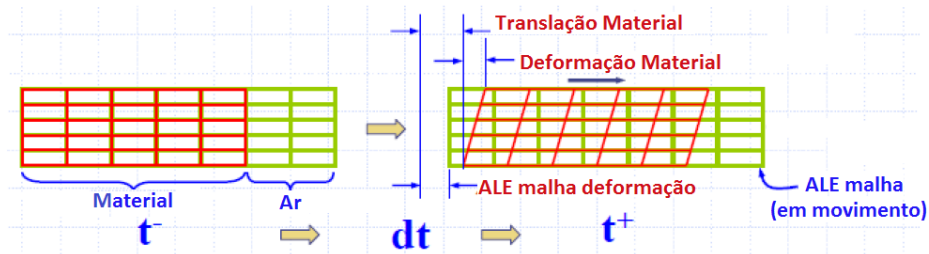


Figura 4.1: Formulação Lagrangiana, adaptado de [9].

No entanto, este método tem as suas limitações na análise de problemas envolvendo grandes deformações. As grandes deformações levam a que sejam necessários incrementos de tempo muito pequenos, caso se queira minimizar as imprecisões. Este fato pode tornar a simulação inviável, pois aumenta consideravelmente o tempo de análise.

Existem técnicas de reconstrução manual da malha e de refinamento localizado, que podem ser utilizadas para controlar a deformação da malha em zonas críticas, permitindo continuar a análise sem perder o nível de aproximação desejado. Estas técnicas requerem alguma sensibilidade e perícia por parte do operador [9].

### 4.1.3 Load Blast Enhanced

Dentro das possíveis formulações que o LS-DYNA oferece, aquela que foi utilizada em todos os modelos desta dissertação foi o Load Blast Enhanced. Este é um modelo de explosões no ar empírico que é uma versão melhorada do original Load Blast já existente no LS-DYNA [14]. O Load Blast Enhanced é baseado em dados experimentais de explosões convencionais convertidos em aproximações polinomiais, usando as leis apresentadas no capítulo 2.

O método é semelhante ao programa de cálculo automático ConWep (*Conventional Weapons*) embora este não esteja acoplado ao LS-DYNA. O método LBE é uma boa ferramenta, realista, fácil de usar e eficiente para simular carregamentos explosivos em estruturas [29].

A versão empírica do Load Blast, para explosões convencionais (TNT), foi implementada com duas opções: explosão ao ar livre de um explosivo esférico e explosão à superfície. Válido para uma distância reduzida ( $Z$ ) que varia entre  $0.147 \text{ m/kg}^{1/3}$  e os  $40 \text{ m/kg}^{1/3}$  para a situação de explosão no ar. Os parâmetros da onda de choque são provenientes de dados experimentais. O princípio base do método é a aplicação de cargas de pressão diretamente aos nós de uma estrutura Lagrangiana.

O Load Blast Enhanced, de forma a complementar a versão anterior, permite considerar o efeito de reflexão da onda no solo de explosões muito perto da superfície. A fase negativa da pressão pode ser incluída na equação (2.2) de Friedlander. É possível ainda indicar o tipo de explosão a estudar, entre quatro opções possíveis:

- “Blast = 1” (explosão hemisférica à superfície)
  - Carga posicionada no solo ou perto (amplificada pela reflexão no solo);
- “Blast = 2” (explosão esférica no ar)
  - Carga posicionada no ar (sem amplificação);
- “Blast = 3” (onda não esférica, explosão em movimento)
  - Configurações de armas criam uma frente de onda não esférica;
  - A frente explosiva é modificada se a arma se move;
- “Blast = 4” (explosão no ar com reflexão do solo)
  - Explosão aérea reflete no solo;
  - Sistema de onda de choque forma um Mach [29].

Este método é uma excelente ferramenta quando se pretende simular uma ação explosiva. A facilidade e simplicidade com que é aplicado, é em termos de modelação numérica, uma forma bastante expedita de obter a resposta da estrutura quando sujeita a cargas explosivas. Por outro lado, através do Load Blast Enhanced, não é possível controlar a propagação da onda através do ar, nem conseguir registar as reflexões que possam existir na vizinhança da estrutura.

Nas secções seguintes serão indicados e explicados com maior pormenor a aplicação do método Load Blast Enhanced.

## 4.2 Modelo de referência

Com o objetivo de elaborar os modelos numéricos das cúpulas geodésicas e das ações explosivas, recorreu-se a uma pesquisa bibliográfica de trabalhos já elaborados sobre a temática das cúpulas geodésicas sujeitas a ações explosivas. Encontrou-se então o artigo com o título “Blast Diffusion by Different Shapes of Domes” [28] para efeitos de validação das formulações utilizadas.

Embora o artigo não trate especificamente a geometria das cúpulas geodésicas, são estudados diferentes tipos de cúpulas. A informação sobre a implementação das explosões no programa e a formulação dos materiais está muito completa.

A escrita do artigo está associada ao problema de haver, cada vez mais ataques terroristas, não só em cenários de guerra, mas também em zonas residenciais ou comerciais. Pretendeu-se analisar diferentes formas de cúpulas e perceber quais as configurações que apresentam boas respostas às explosões. Os tipos de cúpulas analisados foram: circular (a), arco (b), triangular (c), pontiaguda (d), parabólica (e) e achatada (f), como mostra a Figura 4.2.

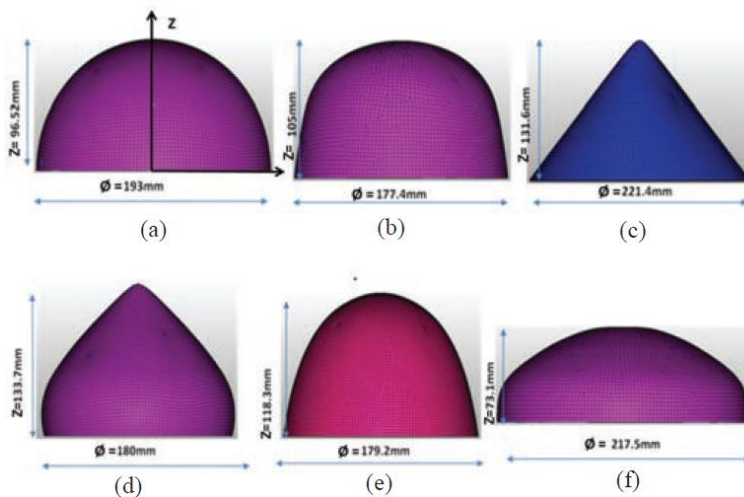


Figura 4.2.: Diferentes modelos de elementos finitos de cúpulas [28].

De acordo com o objetivo desta dissertação, e visto que a estrutura geodésica tende a aproximar o melhor possível uma esfera, apenas a cúpula circular foi considerada.

### Elementos Finitos

A malha de elementos finitos do artigo foi construída através do programa de cálculo automático HyperMesh (*Altair HyperWorks*), utilizando apenas elementos sólidos quadrangulares com dimensão igual a 2.25 mm, contando com um número de cerca de 40000 a 55000 elementos, dependendo da geometria.

A cúpula circular tem um diâmetro de 193mm, uma altura máxima de 96.52mm e uma espessura de 2mm.

A versão do modelo empírico para simular a explosão foi o Load Blast Enhanced, referido na secção 4.1.3. O tipo de explosão simulada no artigo é a de uma explosão confinada, uma vez que a detonação é feita no interior da estrutura. A massa de TNT foi de 0.15kg e foi colocada no centro da cúpula a meia altura. O tempo total da análise é de 2ms, sendo defendido pelos autores tratar-se do tempo suficiente para que a resposta da estrutura estabilize com a passagem da explosão.

### Propriedades do Material

O modelo constitutivo do material utilizado em todas os modelos numéricos foi o Johnson-Cook (Material 015 do LS-DYNA). Este modelo é sensível às deformações plásticas, sendo muitas vezes usado em problemas onde as taxas de deformação variam num intervalo alargado, e há aumentos de temperatura que causam amolecimento do material. Este material é um modelo constitutivo que reproduz a resposta de materiais quando sujeitos a impactos e a penetração de metais.

A formulação de Johnson-Cook é representada pela equação do fluxo de tensão como mostra a equação (4.1), [20].

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^n)(1 + c \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (4.1)$$

Onde,

A – Tensão de cedência do material;

B – Tensão de rotura;

n – Expoente de endurecimento (define a curvatura da fase plástica);

c – Coeficiente da taxa de deformação;

m – Expoente da influencia da temperatura;

$\bar{\epsilon}^p$  – Deformação plástica;

$\dot{\epsilon}$  – Taxa de deformação;

$$\dot{\epsilon} = \frac{\bar{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0} \quad (4.2)$$

Com  $\dot{\epsilon}_0$  como a taxa de deformação de referência.

$T^*$  - Temperatura homologada.

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_M - T_{room}} \quad (4.3)$$

Com  $T_M$  a temperatura de fundição e  $T_{room}$  é a temperatura da sala.

A deformação na rotura é dada por:

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*][1 + D_4 \ln \epsilon^*][1 + D_5 T^*] \quad (4.4)$$

Onde  $\sigma^*$  é o rácio da pressão dividida pela tensão efetiva.

$$\sigma^* = \frac{p}{\sigma_{eff}} \quad (4.5)$$

As variáveis apresentadas por D1, D2, D3, D4 e D5 representam os parâmetros de dano e a sua determinação envolve a rotura de uma serie de testes experimentais, variando a tensão (D1, D2 e D3), a taxa de deformação (D4) e a temperatura (D5). A rotura ocorre quando o parâmetro de dano D, atinge o valor de 1.

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}^p}{\epsilon^f} \quad (4.6)$$

O modelo Johnson-Cook é aplicável a elevadas taxas de deformação de muitos materiais incluindo muitos metais. Este modelo também permanece válido quando se trabalha com taxas de deformação mais baixas e até em regimes quase estáticos. Aplicações típicas para este material incluem as explosões, balística e impacto [3,19,33,37].

No artigo estudado o modelo constitutivo Johnson-Cook é caracterizado pelas variáveis indicadas na Tabela 4-1, correspondendo a um aço utilizado em armaduras militares.

<b>Modelo Constitutivo Johnson-Cook</b>			
Densidade [kgmm <sup>-3</sup> ]	7.8e-6	T <sub>m</sub> [K]	1800
Módulo de Elasticidade, E [GPa]	210	T <sub>room</sub> [K]	280
Módulo de Distorção, G [GPa]	80	Taxa de deformação de referência [s <sup>-1</sup> ]	1e-5
Coefficiente de Poisson	0.3	Calor Especifico [J/kgK]	450
Tensão de Cedência, A [GPa]	0.849	Parâmetro de dano D1	0.020
Tensão de Ruptura, B [GPa]	1.340	Parâmetro de dano D2	1.5
Coefficiente da Taxa de Deformação, c	0.03	Parâmetro de dano D3	0.2
Expoente de endurecimento, n	0.092	Parâmetro de dano D4	0.002
Expoente da influencia da Temperatura, m	0.870	Parâmetro de dano D5	0.0

Tabela 4-1: Propriedades do material com o modelo Johnson-Cook [28].

### Condições de Fronteira

A cúpula é definida como rigidamente fixa na base.

### Resultados

Os resultados das análises efetuadas no artigo são apresentados sob a forma de um balanço energético através da energia cinética (KE) e interna (IE) do material, da deformação para 0.2ms e do deslocamento no topo da cúpula.

### 4.3 Modelo numérico

Com os objetivos de validar a formulação do Blast Load Enhanced e de calibrar o modelo constitutivo do material Johnson-Cook foi elaborado um modelo numérico, idêntico ao do artigo apresentado em 3.3.

### Elementos Finitos

No que diz respeito à geometria da cúpula circular, foram respeitadas as dimensões indicadas no artigo. Em relação aos elementos finitos que constituem o modelo, foram utilizados elementos de casca em vez dos elementos sólidos utilizados no artigo. Esta diferença prende-se com o facto de no artigo ter sido usado o programa de cálculo automático HyperMesh na construção da malha, e também por dificuldades em obter uma resposta do programa quando eram aplicados elementos sólidos.

Optou-se então por utilizar elementos de casca de forma quadrangular aplicando a funcionalidade AutoMesher do LS-DYNA. Esta função permite a construção da malha de forma automática ou através da indicação do tipo de elemento e a sua dimensão. Na Tabela 4-2 estão indicadas as características geométricas do modelo de elementos finitos efetuado.

Geometria	
Diâmetro [mm]	193
Altura máxima [mm]	96.52
Elementos Finitos	
Número Elementos	12600
Número de Nós	12709

Tabela 4-2:Características geométricas do modelo numérico.

Os elementos de casca foram modelados com 2 mm de espessura. De acordo com [30,31] a formulação recomendada para este tipo de elementos, que estão sujeitos a grandes deformações e que são geralmente utilizados em metais ou plásticos, é a ELFORM=16 do LS-DYNA (EQ.16: *Fully integrated shell element*). Esta formulação é, de acordo com [20], utilizada para análises rápidas de elementos totalmente integrados considerando a distorção dos elementos e o efeito de corte. A única desvantagem é que esta formulação pode aumentar o tempo de análise. No entanto é bastante utilizado quando a precisão é desejada.

A modelação dos elementos finitos pode ser observada na Figura 4.3.

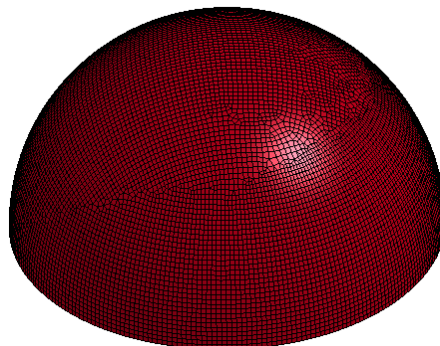


Figura 4.3: Modelação elementos finitos do Modelo Numérico.



### Propriedades do Material

Observando as equações que definem o comportamento do modelo Johnson-Cook, (3.1) e (3.4), a primeira tentativa de calibração do material recaí sobre os parâmetros de dano (D1-D5), que regem a forma como o material se comporta na rotura.

Através de um processo iterativo no LS-DYNA é então possível verificar que os resultados se aproximam dos resultados apresentados no artigo [28]. Apresenta-se na Tabela 4-3, os parâmetros do modelo Johnson Cook para o modelo numérico calibrado.

Modelo Constitutivo Johnson-Cook (Calibrado)			
Densidade [kgmm <sup>-3</sup> ]	7.8e-6	T <sub>m</sub> [K]	1800
Módulo de Elasticidade, E [GPa]	210	T <sub>room</sub> [K]	280
Módulo de Distorção, G [GPa]	80	Taxa de deformação de referência [s <sup>-1</sup> ]	1e-5
Coefficiente de Poisson	0.3	Calor Especifico [J/kgK]	450
Tensão de Cedência, A [GPa]	0.849	Parâmetro de dano D1	0.015
Tensão de Rotura, B [GPa]	1.340	Parâmetro de dano D2	1.0
Coefficiente da Taxa de Deformação, c	0.03	Parâmetro de dano D3	0.15
Expoente de endurecimento, n	0.092	Parâmetro de dano D4	0.0015
Expoente da influencia da Temperatura, m	0.870	Parâmetro de dano D5	0.0

Tabela 4-3: Parâmetros do material com modelo Johnson-Cook (Calibrado).

### Ação Explosiva

A aplicação do método Load Blast Enhanced necessita apenas de três informações: a massa de TNT, a sua posição no espaço e o tipo de explosão.

Na situação em estudo foi indicada a massa de TNT igual a 0.15kg e as coordenadas da sua posição espacial foram x=0.0000, y=0.0482 e z=0.0000, sendo que os eixos globais estão localizados no centro da base da cúpula.

O tipo de explosão escolhida para melhor representação do efeito da onda explosiva foi a que corresponde à EQ.4. Este tipo de explosão permite que a onda seja amplificada pela reflexão no solo.

## Resultados

Os resultados apresentados dizem respeito ao deslocamento no topo da cúpula. A Figura 4.4 mostra a deformação que ocorreu no instante de tempo igual a 0.2ms.

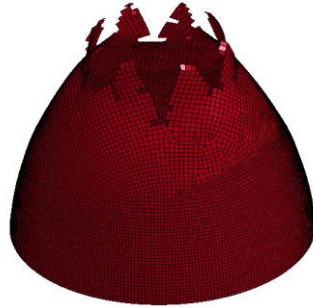


Figura 4.4: Deformação no instante de tempo igual a 0.2ms.

Em termos de magnitude do deslocamento no topo da cúpula, é apresentado a curva de deslocamento nodal ao longo do tempo, ilustrado na Figura 4.5.

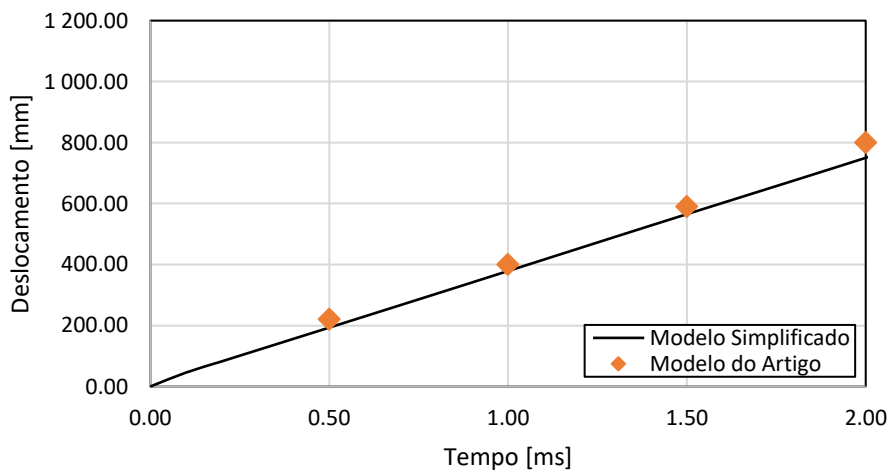


Figura 4.5: Deslocamento nodal no topo da cúpula circular.

## Comparação de Resultados

Através dos resultados obtidos com o modelo numérico desenvolvido podemos fazer a comparação com os resultados fornecidos no artigo. Esta comparação serve também de validação e calibração do modelo, para posteriormente serem utilizados os mesmos princípios nos modelos com a estrutura das cúpulas geodésicas.

A comparação de resultados entre o modelo numérico desenvolvido e o modelo do artigo [28] é sintetizada na Tabela 4-4.

<b>Comparação Modelo Numérico vs. Artigo [28]</b>			
Deslocamento resultante topo da cúpula [mm]			
Instante de Tempo [ms]	Modelo Numérico	Artigo [28]	Erro relativo [%]
0.5	200	220	9
1	380	400	5
1.5	570	590	3
2	770	800	4

Tabela 4-4: Comparação de deslocamentos e o seu erro relativo.

Em termos globais os resultados mostram uma boa aproximação, tornando válido a utilização das mesmas características do modelo numérico nos modelos completos das cúpulas geodésicas, que apresentar-se-á no capítulo seguinte com maior detalhe.



## Capítulo 5

# Estudo Comparativo do Desempenho da Cúpula Geodésica e do Contentor

Este capítulo pretende descrever como foi desenvolvida toda a modelação numérica da cúpula e do contentor que foi utilizado para comparação. Será feita uma explicação de como se obteve a geometria das estruturas e de como se aplicou a ação explosiva através do LS-DYNA. Também será abordada a forma como os modelos foram calibrados, com base no modelo numérico apresentado no capítulo anterior.

Na segunda parte deste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos para ambas as estruturas em estudo, assim como a comparação entre elas, com vista a poder validar a utilização prática das cúpulas geodésicas.

### 5.1 Modelação Numérica da Cúpula Geodésica

Para a construção do modelo numérico da cúpula geodésica, foi necessário definir as suas características geométricas. Como já foi referido, a estrutura utilizada para a comparação consiste num contentor estandardizado de 20'' (pés), normalmente utilizados em campos militares. Estes contentores de 20'' (pés) têm comprimento de 6.058m, 2.438m de largura e 2.590m de altura, como ilustrado na Figura 5.1.



Figura 5.1: Contentor de 20''. [42]

Estas dimensões serviram de base para a escolha das dimensões da cúpula geodésica, de forma a que ambas as estruturas tivessem o mesmo espaço útil interior. Assim, determinou-se o valor do raio da cúpula que permite cobrir por completo o contentor referido. A Figura 5.2 mostra este processo da escolha do raio da cúpula geodésica.

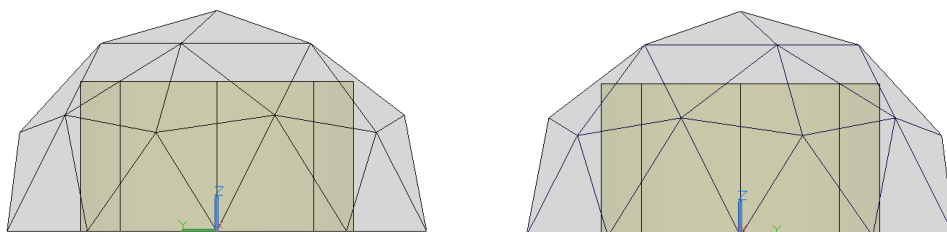


Figura 5.2: Escolha do raio da cúpula geodésica.

O próximo passo diz respeito à escolha dos elementos e secções. A modelação destes elementos, dos materiais e da ação explosiva, será também abordada nesta secção.

#### 5.1.1 Geometria (GeoCadre Pro)

Após a escolha do raio da cúpula geodésica, foi necessário definir as coordenadas geométricas dos vértices da cúpula geodésica. Com o auxílio do programa de cálculo automático CADRE Pro, programa que permite fazer análises estruturais recorrendo ao método dos elementos finitos, e criar geometrias de estruturas complexas. A particularidade do programa, é ter incorporado um gerador de estruturas geodésicas, em que, definindo alguns parâmetros geométricos, a cúpula geodésica é criada de forma automática.

A primeira variável a escolher é o tipo de poliedro, sendo que se pode escolher entre o Icosaedro, o Octaedro e o Tetraedro. Também se deve indicar qual é a classe de subdivisão do polígono, como referido em 3.1.4. Em seguida, introduz-se o valor do raio da cúpula geodésica e a frequência, esta última explicada em 3.1.4.

O método de discriminação, tem a ver com a forma como a subdivisão do polígono é executada. Partindo da subdivisão de classe I, o método da discriminação #1, faz simplesmente a divisão da aresta em comprimentos iguais, enquanto o método de discriminação #2, faz a divisão utilizando ângulos esféricos iguais. A escolha do método, tem influência no número de painéis com dimensões diferentes, e na variação da forma e tamanho dos painéis. Sendo que, o método 1 cria maior variação no tamanho do painel, mas fornece menos variação na forma. O método 2 resulta num maior numero de painéis e numa maior variação da forma.

Por último é importante definir-se o zénite, que indica o eixo para o polo da cúpula geodésica. Todos estes parâmetros são definidos no programa de cálculo automático Cadre Pro, através do input apresentado pela Figura 5.3.

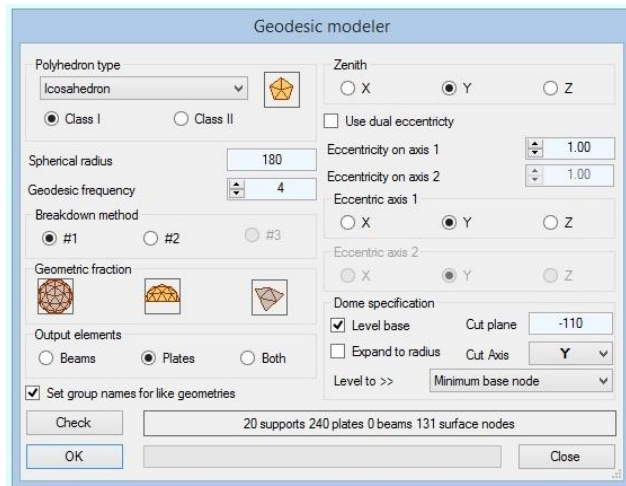


Figura 5.3: Exemplo de um input do gerador de cúpulas do Cadre Pro.

Em suma, nesta dissertação, a cúpula geodésica que será estudada, é uma estrutura desenhada a partir de um Icosaedro, com polígonos triangulares de classe I e com método de discriminação 1. A frequência da cúpula é de 2, sendo que ao aumentar essa frequência a estrutura aproxima-se cada vez mais de uma esfera e apresenta uma maior resistência.

Apenas se pretende analisar semi-cúpulas de raio igual a 3.60m, em que o zénite é o eixo Z. A estrutura em estudo é apresentada na Figura 5.4.

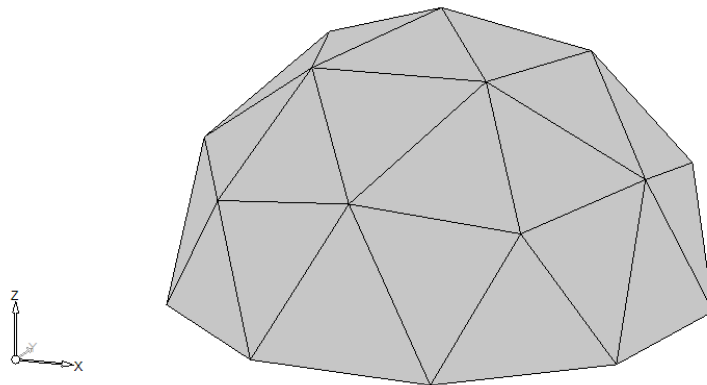


Figura 5.4: Cúpula geodésica 2V gerada no Cadre Pro.

O modelo da cúpula geodésica, é então constituído por 65 vigas e 40 painéis triangulares, que corresponde a 26 vértices, sendo que 10 vértices pertencem ao plano da base da estrutura. As vigas têm apenas dois tipos de comprimentos diferentes (A e B), como ilustra a Figura 5.5.

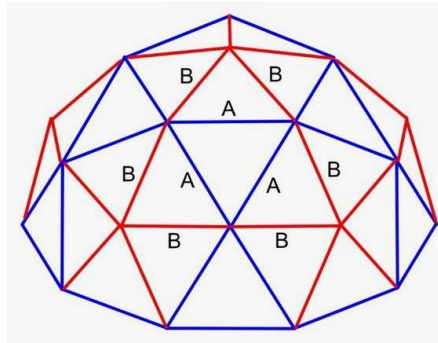


Figura 5.5: Diagrama de elementos com diferentes comprimentos.

Definida a geometria da estrutura com a ajuda do programa de cálculo automático Cadre Pro, esta foi exportada para o programa LS-DYNA.

### 5.1.2 Elementos finitos e secções transversais

A construção do modelo numérico, passa pela criação de dois tipos de elementos que constituem a estrutura: vigas e cascas.

Os elementos estruturais que formam a rede geodésica da cúpula, foram definidos como elementos do tipo viga, em que cada barra foi subdividida em 20 sub-elementos com 2 nós cada. Os painéis que correspondem ao revestimento da estrutura geodésica, foram definidos como elementos do tipo casca (*SHELL*), recorrendo à ferramenta AutoMesh do LS-DYNA. A malha que diz respeito aos elementos de casca é constituída por elementos triangulares com 3 nós, com lados de dimensão 0.144m.

Os elementos utilizados estão ilustrados na Figura 5.6, onde para cada nó do elemento estão associados três graus de liberdade de translação e três graus de liberdade de rotação.

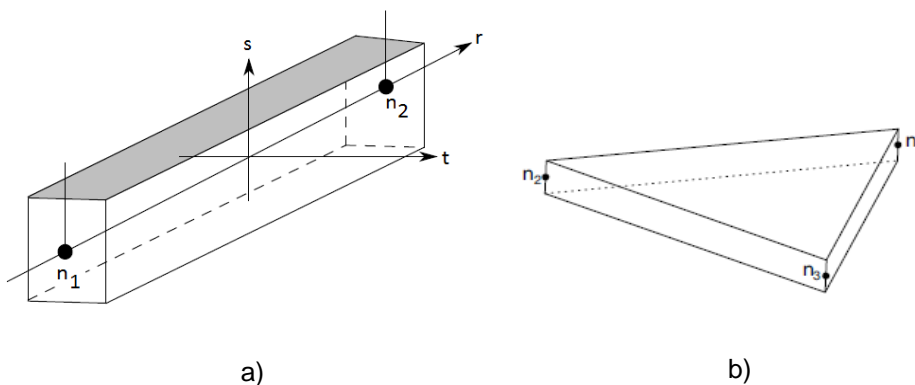


Figura 5.6: Elementos tipo viga a) e tipo casca b) segundo o LS-DYNA. [20]



Em suma, a modelação numérica é constituída por 9430 elementos, sendo que 980 são elementos do tipo viga (*Beam*) e 8450 são elementos do tipo de casca (*Shell*), com um número total de nós de 5262, como mostra a Figura 5.7.

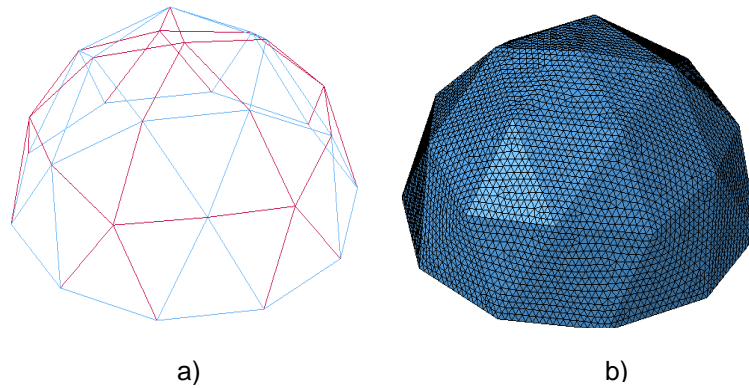


Figura 5.7: Cúpula Geodésica: rede geodésica a) e painéis b).

### Secção Transversal da Viga

No caso das cúpulas geodésicas, e de acordo com a pesquisa efetuada, as vigas são na maior parte dos casos, secções tubulares. Os elementos tubulares utilizados nesta dissertação, têm 50mm de diâmetro e 5mm de espessura, como mostra a Figura 5.8. [37].

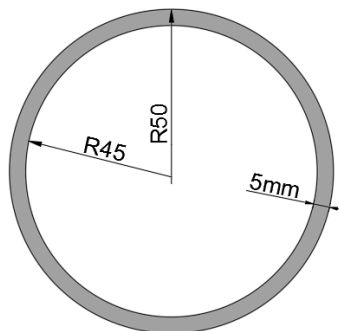


Figura 5.8: Secção transversal das vigas.

### Secção Transversal da Shell

Foi também utilizada a formulação do elemento número dezasseis do LS-DYNA, ELFORM=16. Em termos de espessura, os painéis foram modelados com 2mm de espessura.

#### 5.1.3 Materiais

O modelo constitutivo Johnson-Cook, é o modelo que define o comportamento do material utilizado em toda a modelação, quer seja para vigas, quer para os painéis da cúpula geodésica.

De acordo com [21,28], o modelo constitutivo, quando aplicado a elementos de viga, recorre ao modelo Johnson Cook Simplificado. Este modelo é em tudo baseado no modelo completo Johnson Cook, não entrando em consideração com os efeitos térmicos e de dano. Assim, o modelo constitutivo para o material utilizado nas vigas tem as características apresentadas na Tabela 5-1.

<b>Modelo Johnson-Cook Simplificado</b>	
Densidade [kgmm-3]	7.8e-6
Módulo de Elasticidade, E [GPa]	210
Coefficiente de Poisson	0.3
Tensão de Cedência, A [GPa]	0.849
Tensão de Ruptura, B [GPa]	1.340
Coefficiente da Taxa de Deformação, c	0.03
Expoente de endurecimento, n	0.092

Tabela 5-1: Modelo constitutivo Johnson Cook Simplificado (Material 098).

Relativamente aos elementos de casca, o material utilizado foi o modelo Johnson Cook (Material 015), apresentado no capítulo anterior.

#### 5.1.4 Ação LBE

O método Load Blast Enhanced, cujos princípios de aplicação já foram explicados anteriormente, é o método utilizado para simular a ação explosiva sobre a cúpula geodésica.

Neste capítulo, apenas serão utilizadas explosões exteriores hemisféricas com o explosivo localizado perto do solo, considerando a reflexão de onda e sua amplificação no solo. Assim, a indicação necessária no LS-DYNA sobre o tipo de fonte explosiva, é feita através da opção BLAST e respetiva escolha da equação número um (EQ.1).

Para além do tipo de explosão que pretendemos simular, existem apenas mais dois parâmetros necessários à definição da ação explosiva: a massa de explosivo e a posição espacial do mesmo. Mais à frente nesta dissertação, serão mostrados todos os diferentes tipos de modelos que foram analisados, os respetivos valores de massa de TNT e as coordenadas da posição do explosivo.

Como complemento do método Load Blast Enhanced, foi ainda utilizado o Blast Segment Set, que tem como função, selecionar quais os elementos que pretendemos que sejam atingidos pela onda explosiva, para que o cálculo da sua resposta seja executado. Neste caso, os elementos selecionados foram os elementos de viga e de casca que constituem a estrutura.

A imagem da Figura 5.9 pretende mostrar a posição da carga explosiva em relação à estrutura e a direção da onda de choque.

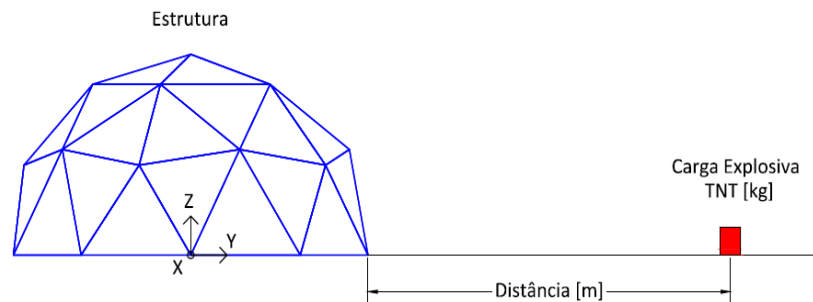


Figura 5.9: Posição relativa da cúpula geodésica face à carga explosiva.

#### 5.1.5 Condições de fronteira

As cúpulas geodésicas estão rigidamente fixas ao solo, através dos nós que se encontram nessa interface.

#### 5.1.6 Duração e passo de tempo da análise

É necessário definir o tempo total da análise e o passo de tempo com que essa análise é calculada.

O tempo total é definido de acordo com a duração da passagem da onda e o tempo que a estrutura leva até se encontrar novamente numa posição estável. No que diz respeito às explosões, este tempo pode ser definido a partir do momento em que a pressão proveniente da onda de choque volta a atingir um valor igual ao da pressão atmosférica.

O valor do passo de tempo,  $\Delta_{tanálise}$ , equivale aproximadamente ao tempo transitório de uma onda sonora, através de um elemento usando a distância mais curta. O passo de tempo é então calculado segundo a expressão (5.1).

$$\Delta_{tanálise} = \Delta_{trans} \times Fs \quad (5.1)$$

De acordo com [21], é definido um fator de escala ( $Fs$ ) para o passo transitório ( $\Delta_{trans}$ ). Este fator, é por defeito igual a 0.9, no entanto para explosões o fator diminui para um valor de 0.67. Neste caso, para uma maior precisão e de forma conservativa adotou-se o valor de 0.6.

## 5.2 Modelação Numérica do Contentor

A utilização do contentor, prende-se com o facto de não existirem resultados experimentais, que possam validar a aplicação prática das cúpulas geodésicas, como abrigo em ambientes militares. Assim, optou-se por modelar também uma estrutura como o contentor normalizado de 20" (pés), por forma a comparar a resposta a ações explosivas com os resultados obtidos pela cúpula geodésica.

### 5.2.1 Geometria

Devido à geometria mais simples do contentor, utilizou-se o programa de cálculo automático SAP2000, para desenhar a estrutura e posteriormente exportá-la para o LS-DYNA.

Foram utilizados painéis de revestimento com uma área idêntica aos utilizados na cúpula. Foram então considerados 5 pórticos ao longo do eixo longitudinal e ainda um perfil em cada um dos topos do contentor, como mostra a Figura 5.9 a).

### 5.2.2 Elementos finitos e secções transversais

A malha de elementos finitos e as secções transversais utilizadas no modelo numérico do contentor, foram idênticas às referidas em 5.1.2, como está ilustrado na Figura 5.10.

Por outro lado, a modelação numérica do contentor é constituída por 10217 elementos, sendo que 753 são elementos do tipo viga (*Beam*) e 9464 são elementos do tipo de casca (*Shell*), com um número total de nós de 5560.

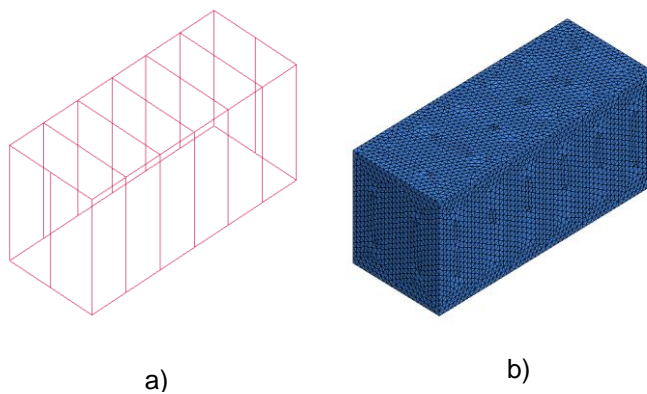


Figura 5.10: Contentor: elementos tubulares a) e painéis b).

Todos os outros parâmetros que definem o modelo, como os materiais, as condições de fronteira, a ação LBE, a duração e o passo de tempo, foram definidos de forma idêntica àquela que foi feita para a cúpula geodésica. Todos os procedimentos foram anteriormente descritos na secção 5.2.

### 5.3 Convergência e análise de sensibilidade

A calibração dos modelos numéricos, consistiu num estudo de convergência da malha de elementos finitos utilizada. O parâmetro que ajuda nesta análise, é o deslocamento no topo da cúpula.

### **Análise sensibilidade da malha**

O programa de cálculo automático LS-DYNA permite gerar as malhas de elementos finitos de forma automática através do AutoMesh, possibilitando escolher entre elementos quadrangulares, triangulares e mistos.

Para testar a convergência da malha gerada automaticamente pelo AutoMesh foram feitos três modelos com diferentes dimensões dos elementos. A Tabela 5-2 mostra, para cada modelo, a dimensão dos elementos utilizados e o deslocamento resultante registrado no topo da cúpula geodésica.

Dimensão dos elementos [m]	Tempo [s]	Deslocamento Resultante [m]
0.072	0.2	0.1962
0.144	0.2	0.1962
0.288	0.2	0.1962

Tabela 5-2: Análise sensibilidade da malha.

Podemos observar, que os resultados obtidos são iguais nas três situações, registrando-se uma convergência de resultados. A malha que foi utilizada nos modelos foi a que se gerou através do AutoMesh, com uma dimensão de elementos igual a 0.144m.

Outro tipo de análise de sensibilidade que se realizou foi relacionado com o intervalo de tempo. Foi facilmente perceptível que a utilização de um intervalo de tempo cada vez mais pequeno não tem influência nos resultados, apenas suaviza a apresentação das suas curvas. Para além de que, a utilização de intervalos de tempo mais pequenos aumenta significativamente o tempo de análise do modelo numérico.

## **5.4 Resultados**

Nesta secção serão apresentados os resultados obtidos na análise dos modelos numéricos. Por fim, apresentar-se-á a devida comparação de resultados obtidos entre a resposta estrutural da cúpula geodésica e do contentor.

### **5.4.1 Amostras**

A resposta das estruturas em estudo depende diretamente do tipo de ação a que estão sujeitas e da sua magnitude. Com o objetivo de alargar a base de dados de resultados e de modo a que fosse possível capturar diferentes níveis de dano, foi desenvolvido um estudo paramétrico.

Este estudo paramétrico tem como princípio a aplicação de diferentes quantidades de material explosivo,  $W$ , fazendo variar a distância que este se encontra da estrutura,  $R$ . Estas duas grandezas fazem parte da denominada distância reduzida  $Z$  [ $m/kg^{1/3}$ ], abordada no Capítulo 2.

Os parâmetros a variar foram escolhidos fixando o valor de carga de TNT simulando situações reais de ameaças, como são os casos de uma pequena mala de viagem (50kg), um automóvel (150kg) e uma carrinha (500kg). Para cada situação foram então seleccionadas três distâncias adequadas a cada quantidade de explosivo.

Os modelos numéricos estudados estão indicados na Tabela 5-3.

TNT [kg]	Bagagem			Automóvel			Carrinha		
	50	100	150	150	300	450	500	1000	1500
Distância [m]	5	10	15	10	20	30	10	30	50
$Z$ [ $m/kg^{1/3}$ ]	1.4	2.7	4.1	1.9	3.8	5.6	1.3	3.8	6.3

Tabela 5-3: Amostragem.

Para as análises de resultados que se seguem, foi utilizada uma malha de controlo para cada estrutura. Esta malha contém vários pontos da estrutura, uns pertencentes aos painéis e outros às vigas. Isto permite escolher os pontos de maior interesse e que dão uma visão global da resposta da estrutura.

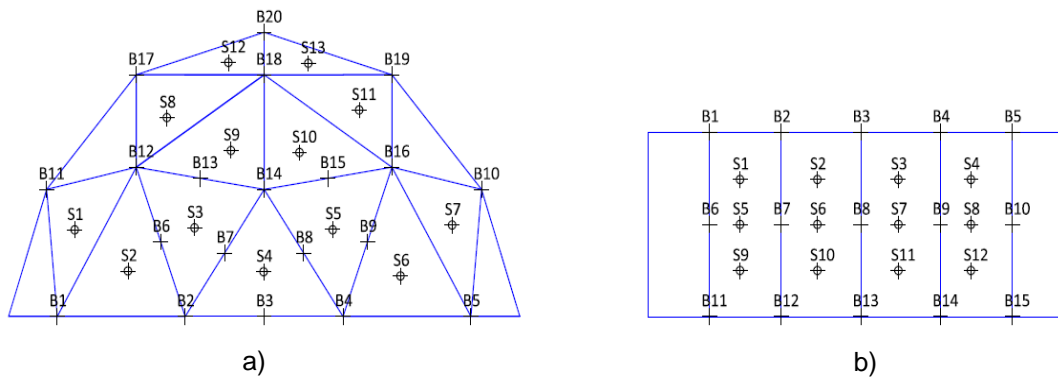


Figura 5.11: Malha auxiliar de pontos: Cúpula Geodésica a) e Contentor b).

B-elementos de viga; S-elementos de laje.

Em resumo, a malha de pontos da cúpula geodésica é constituída pelos pontos S1-S13 e B1-B20, e no caso do contentor pelos pontos S1-S12 e B1-B15, como mostra a Figura 5.11.

5.4.2 Tensões

Registaram-se as tensões de Von-Mises nos elementos “S” da malha de pontos. Foram também guardados os resultados para duas situações: uma em que se considera a estrutura com elementos de barra e outra em que não se considera aqueles elementos.

Os resultados de tensões máximas podem ser observados nos gráficos seguintes (Figura 5.12 a 20). Estes gráficos permitem observar a diferença de tensões entre as estruturas sem os elementos de barra bem como as estruturas com aqueles elementos, quer para a cúpula quer para o contentor.

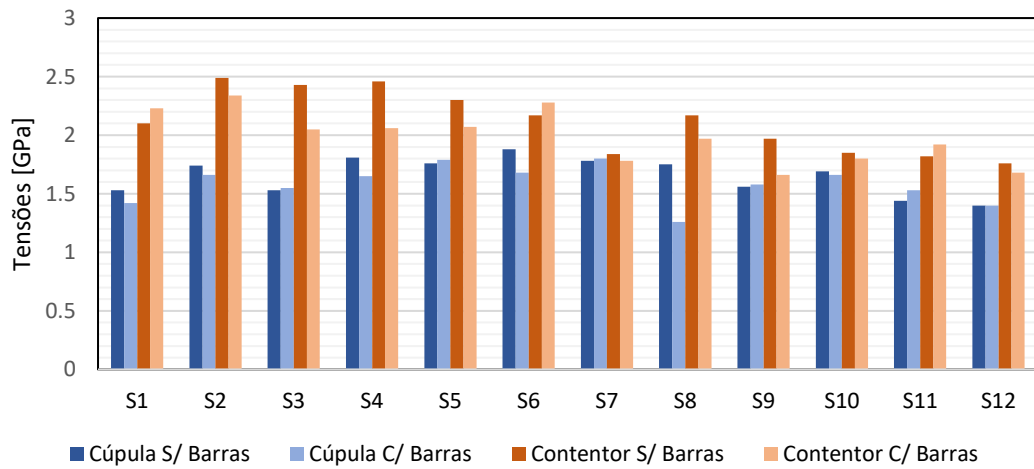


Figura 5.12: Influência das barras nas tensões para TNT=50kg a 5m.

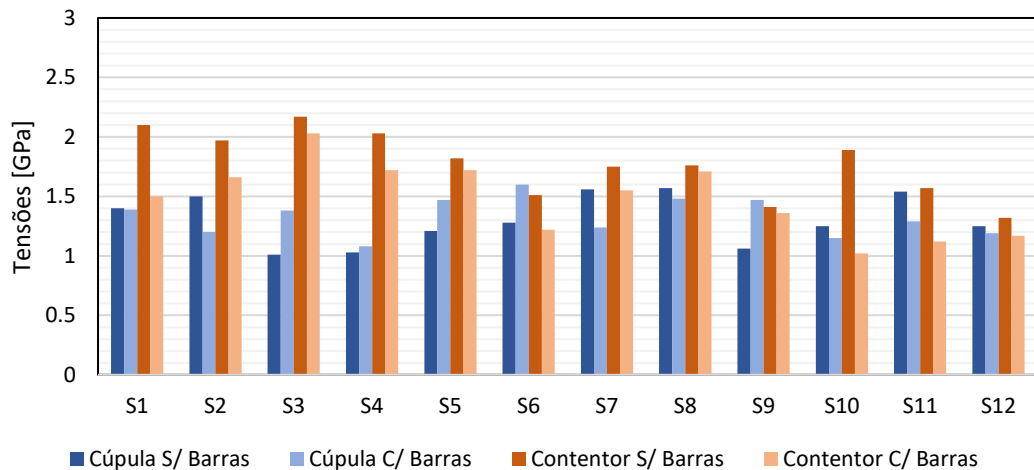


Figura 5.13: Influência das barras nas tensões para TNT=50kg a 10m.

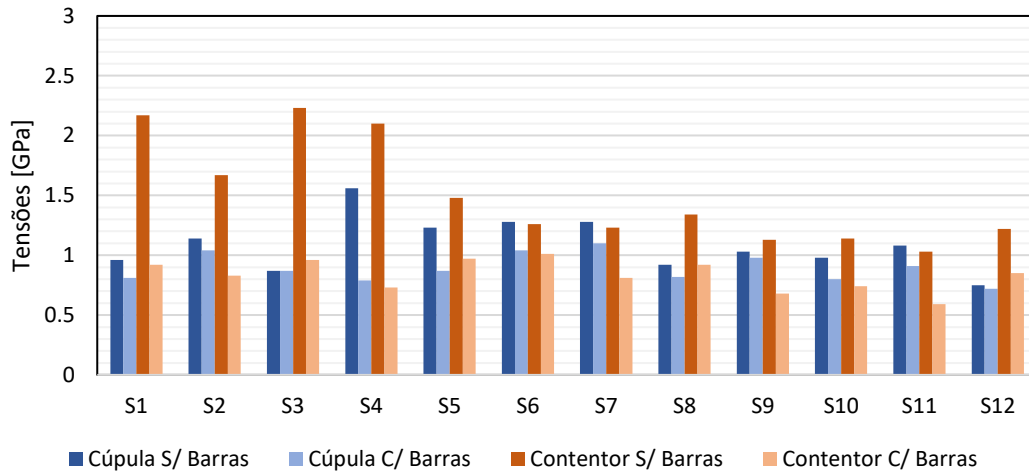


Figura 5.15: Influência das barras nas tensões para TNT=50kg a 15m.

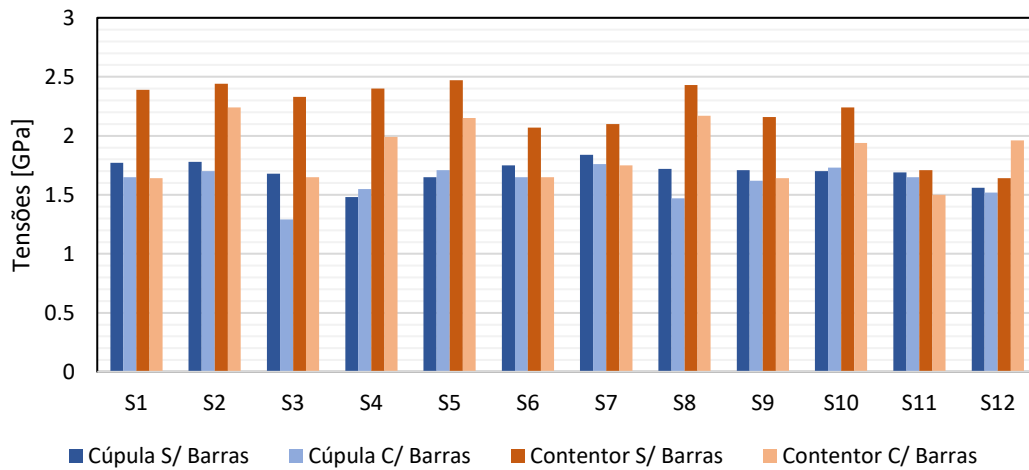


Figura 5.16: Influência das barras nas tensões para TNT=150kg a 10m.

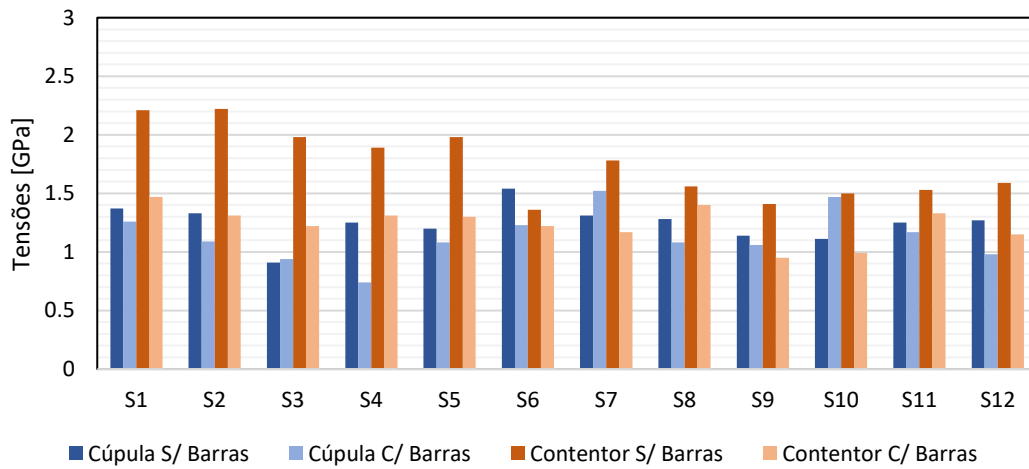


Figura 5.14: Influência das barras nas tensões para TNT=150kg a 20m.



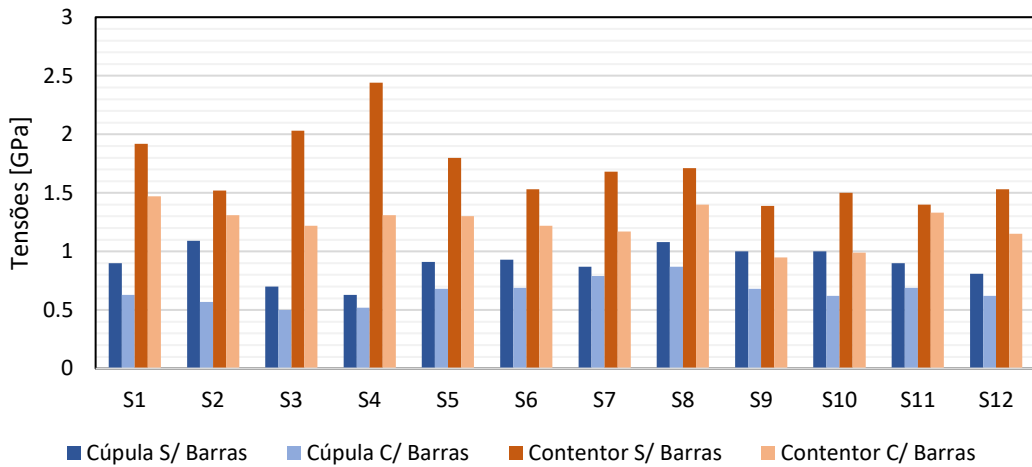


Figura 5.17: Influência das barras nas tensões para TNT=150kg a 30m.

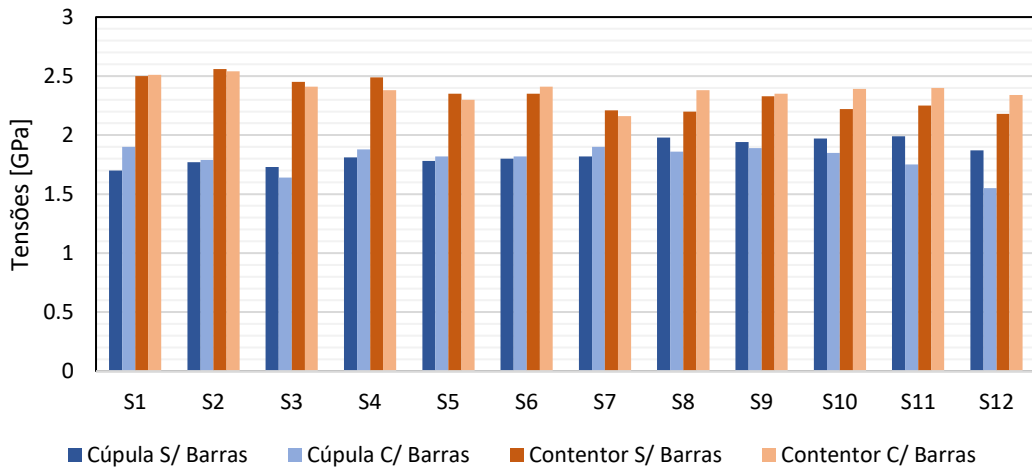


Figura 5.18: Influência das barras nas tensões para TNT=500kg a 10m.

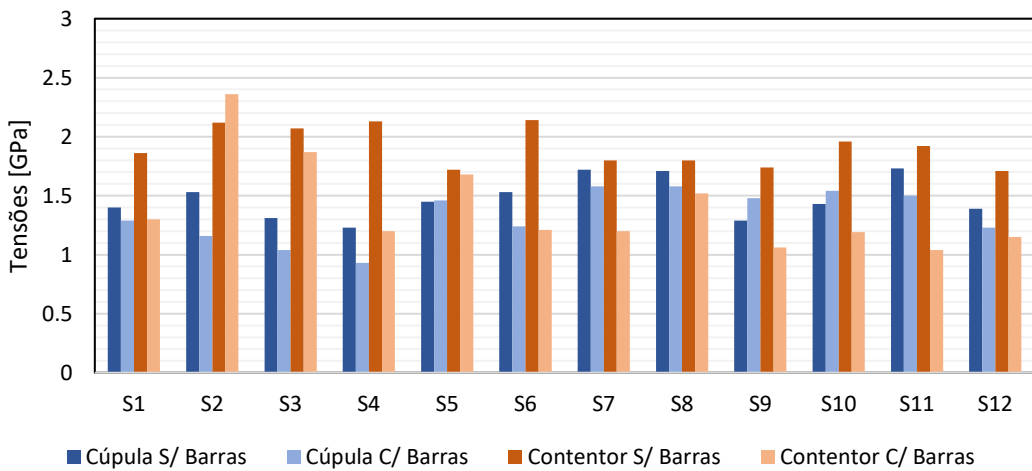


Figura 5.19: Influência das barras nas tensões para TNT=500kg a 30m.

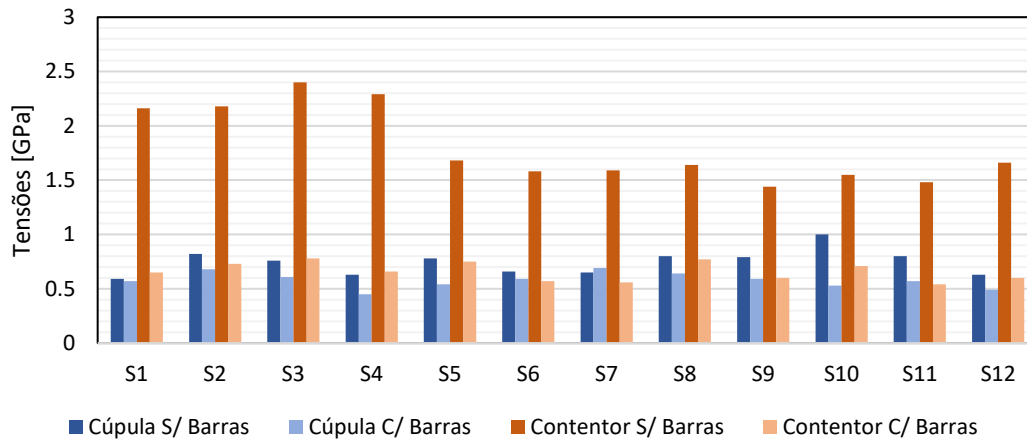


Figura 5.20: Influência das barras nas tensões para TNT=500kg a 50m.

Os valores apresentados graficamente, podem ser consultados nas tabelas do Anexo A. Os resultados apresentados foram obtidos através de uma lista de resultados correspondentes aos nós “S” da malha de pontos. Na Tabela 5-4, e em forma de resumo, estão indicados os valores médios de decréscimo das tensões.

TNT [kg]	Distância [m]	Decréscimo Médio de Tensões [%]	
		Cúpula	Contentor
50	5	4.4	5.6
	10	-2.8	16.2
	15	21.0	41.6
150	10	4.6	14.7
	20	10.0	28.3
	30	26.6	49.3
500	10	4.1	-1.8
	30	10.8	27.0
	50	22.7	62.6

Tabela 5-4: Decréscimo de tensões com a introdução da estrutura geodésica.

Nos resultados apresentados, o sinal negativo significa que houve um aumento de tensões do modelo não considerando as barras para o modelo com as barras.

Se considerarmos individualmente as estruturas, chegamos a conclusão que a introdução dos elementos de barra traduz, de forma geral, uma diminuição das tensões nos painéis. Comparando as duas estruturas, é importante notar que, na situação em que não se considera os elementos de barras, as tensões são mais baixas na cúpula geodésica. No entanto, a estrutura que apresenta maior decréscimo de tensões, após a introdução da rede geodésica, é o contentor. Considerando apenas o modelo de 500kg a 10m, podemos concluir que num mesmo instante as tensões registadas na cúpula são inferiores às tensões do contentor, como é ilustrado na Figura 5.21.

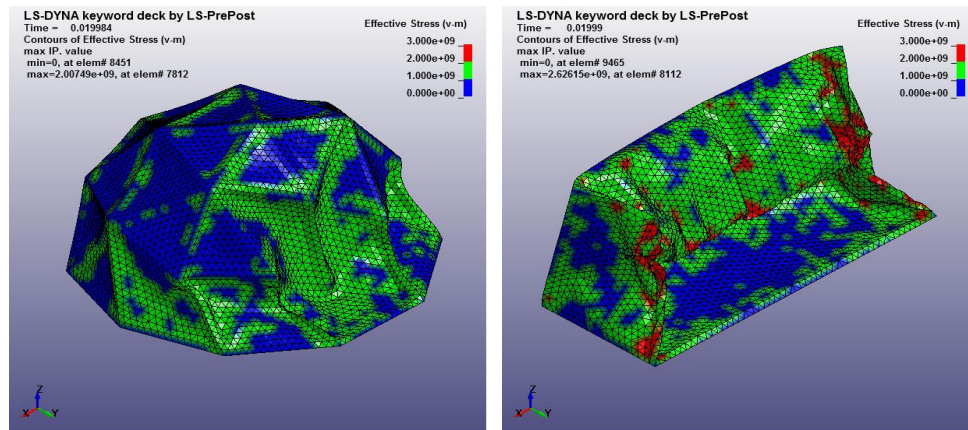


Figura 5.21: Diagrama das tensões registadas para TNT=500kg a 10m.

### 5.4.3 Esforço Axial

Como foi referido anteriormente, o comportamento da cúpula geodésica passa por ter os seus elementos comprimidos e tracionados. Por isso, houve a necessidade de registar os níveis de esforço axial a que os elementos tubulares estão sujeitos.

Foram então reunidos os valores de esforço axial para cada elemento “B” da malha de pontos. Na Tabela 5-5 podem ser vistos os valores do esforço axial máximo, para cada um dos modelos.

TNT [kg]	Distância [m]	Esforço Axial Máximo [kN]	
		Cúpula	Contentor
50	5	-697.0	-273.4
	10	-570.0	-268.3
	15	-371.5	-249.1
150	10	-695.0	-281.5
	20	-490.1	-274.3
	30	-291.6	-224.8
500	10	-745.9	-439.0
	30	-547.7	-274.9
	50	-287.0	-237.0

Tabela 5-5: Esforço Axial Máximo.

O esforço axial máximo é em todos os modelos, um esforço de compressão. Também podemos realçar que o esforço axial é globalmente superior nas cúpulas geodésicas. Isto já era esperado, devido à capacidade geométrica que estas estruturas geodésicas têm para acomodar elevados esforços axiais e distribuir esses mesmo esforços ao longo da sua configuração. Através da Figura 5.22 são ilustrados os diagramas de esforços axiais para ambas as estruturas, para um caso de carga explosiva de 500kg a 10m de distância.

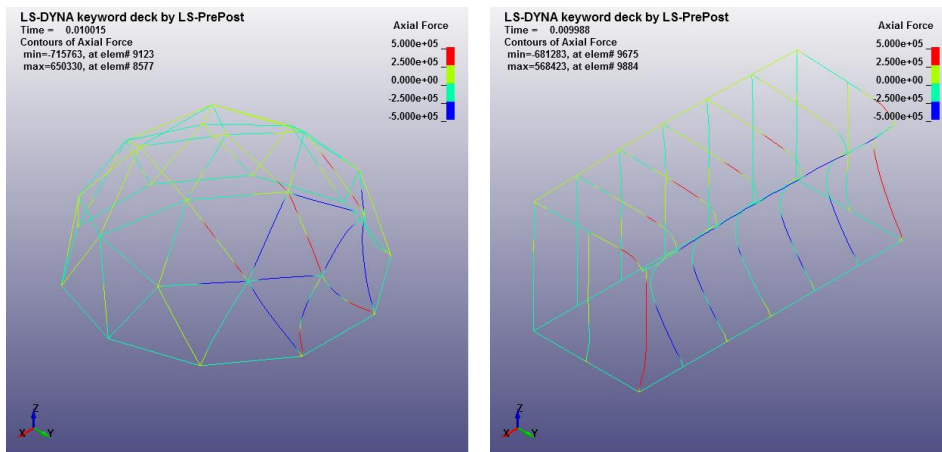


Figura 5.22: Diagrama dos Esforços Axiais para TNT=500kg a 10m.

#### 5.4.4 Pressões

As pressões que são aplicadas à estrutura, traduzem a magnitude da onda de choque proveniente da explosão. Através do registo das pressões a que a estrutura está sujeita, é possível quantificar a pressão máxima incidente e a pressão máxima efetiva. A diferença entre estes dois parâmetros já foi discutida anteriormente nesta dissertação.

Outra grandeza que caracteriza a resposta da ação explosiva é o impulso que está associado a uma determinada pressão. Neste caso, o impulso foi obtido através da integração da curva da variação da pressão efetiva ao longo do tempo.

Todos estes resultados serão mostrados nas tabelas 5-6 a 5-8. Pretende-se assim mostrar, para cada estrutura, as pressões instaladas na face mais exposta à ação explosiva. Adotou-se como a face mais exposta aquela que se encontra na direção da carga explosiva e que é a primeira a sentir a chegada da onda de choque.

Distância [m]	Pico de Sobrepressão [psi]			Impulso [N.s/m <sup>2</sup> ]		
	Contentor	Cúpula	Diferença [%]	Contentor	Cúpula	Diferença [%]
5	480.2	412.0	14	2283	2131	7
10	62.5	58.1	7	951	917	4
15	22.5	21.6	4	590	575	3

Distância [m]	Pico de Pressão Incidente [psi]		
	Contentor	Cúpula	Diferença [%]
5	99	89	2
10	21	20	1
15	9	9	0

Tabela 5-6: Análise de Pressões para TNT=50kg.

Distância [m]	Pico de Sobrepressão [psi]			Impulso [N.s/m <sup>2</sup> ]		
	Contentor	Cúpula	Diferença [%]	Contentor	Cúpula	Diferença [%]
10	182.5	168.4	8	2162	2083	4
20	27.0	26.1	3	930	907	3
30	11.5	11.3	2	589	577	2

Pico de Pressão Incidente [psi]			
Distância [m]	Contentor	Cúpula	Diferença [%]
10	47	45	1
20	11	10	0
30	5	5	0

Tabela 5-7: Análise de Pressões para TNT=150kg.

Distância [m]	Pico de Sobrepressão [psi]			Impulso [N.s/m <sup>2</sup> ]		
	Contentor	Cúpula	Diferença [%]	Contentor	Cúpula	Diferença [%]
10	611.1	563.3	8	5427	5148	5
30	26.8	26.1	3	1372	1346	2
50	9.5	9.3	2	776	768	1

Pico de Pressão Incidente [psi]			
Distância [m]	Contentor	Cúpula	Diferença [%]
10	118	113	1
30	10	10	0
50	4	4	0

Tabela 5-8: Análise de Pressões para TNT=500kg.

As pressões resultantes da ação explosiva são muito semelhantes, quer nas cúpulas geodésicas quer nos contentores. A diferença entre os resultados raramente ultrapassa os 10%. No entanto, dada a sua geometria, as cúpulas geodésicas apresentam sempre valores de pressão inferiores às dos contentores. A geometria circular da cúpula tem influência na forma como a onda de choque entra em contato com a estrutura e na forma como a ultrapassa.

De seguida é ilustrado o avanço da onda de pressão ao longo das estruturas, Figuras 5.23 e 5.24. Apenas será apresentado um modelo representativo de cada estrutura, sendo que para os outros modelos o processo é similar.

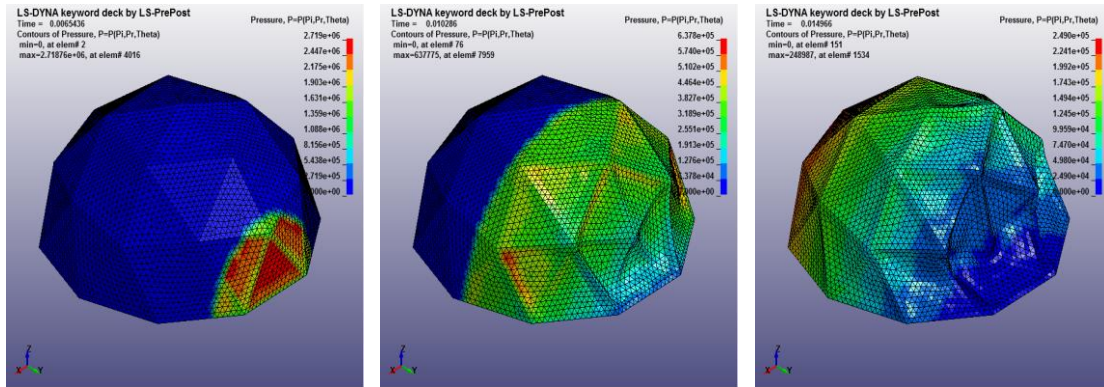


Figura 5.24: Avanço da onda de choque através da cúpula para TNT=500kg a 10m.

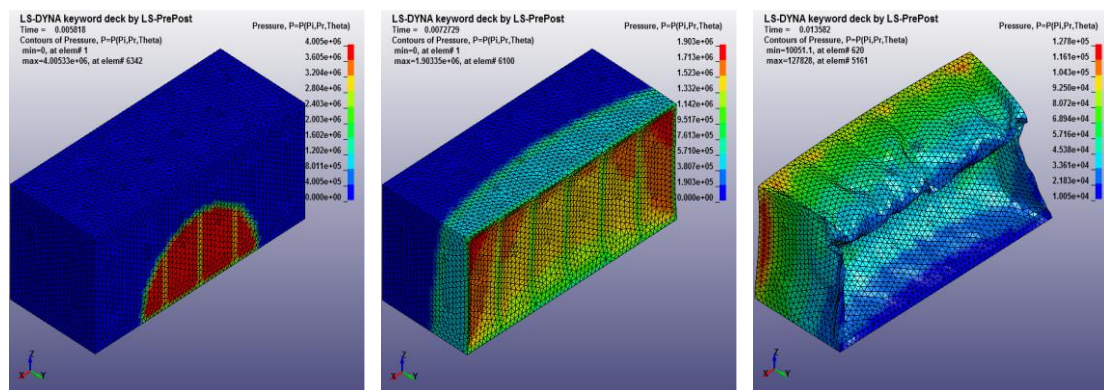


Figura 5.23: Avanço da onda de choque através do contentor para TNT=500kg a 10m.

### 5.4.5 Deslocamentos

Na análise de deslocamentos, o principal foco diz respeito à posição final deformada da estrutura, correspondente à sua deformação residual. Esta permite-nos perceber qual é o deslocamento total que a estrutura irá ter devido à ação em estudo. A posição final, após a passagem da onda de choque, é aquela que nos dá indicação das áreas que ficam mais danificadas e onde os danos causados podem ser, ou não, catastróficos.

Após uma pequena análise sobre a influência da estrutura geodésica, conclui-se que, como era de esperar, a introdução das barras impede a liberdade de deformação que existe quando não existem barras. Assim, é normal que os deslocamentos sejam inferiores quando se inclui os elementos tubulares. Através dos resultados dos deslocamentos residuais em cada nó da estrutura, chegou-se aos seguintes valores máximos, Tabela 5-9.



TNT [kg]	Distância [m]	Máximo Deslocamento Residual [m]		
		Contendor	Cúpula	Diferença [%]
50	5	0.753	0.530	29.61
	10	0.193	0.026	86.64
	15	0.081	0.025	69.16
150	10	0.796	0.385	51.72
	20	0.091	0.028	68.86
	30	0.081	0.020	75.25
500	10	2.543	1.849	27.30
	30	0.318	0.021	93.27
	50	0.089	0.020	77.22

Tabela 5-9: Máximos deslocamentos residuais.

Outra forma de perceber e analisar o comportamento da estrutura, no que diz respeito aos deslocamentos, é através da visualização gráfica do seu efeito gradual que ocorre durante a passagem da onda explosiva. A evolução da deformação global das estruturas pode ser observada através das Figuras 5.25 e 5.26. Apenas os modelos com maior deformação serão apresentados, visto que para os outros casos os efeitos podem não ser tão perceptíveis, por representarem níveis de dano mais baixos.

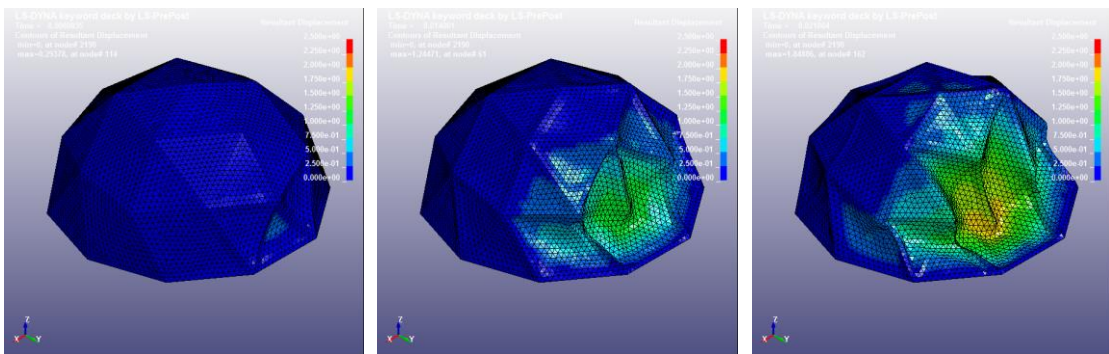


Figura 5.25: Evolução da deformação da cúpula geodésica para TNT=500kg a 10m.

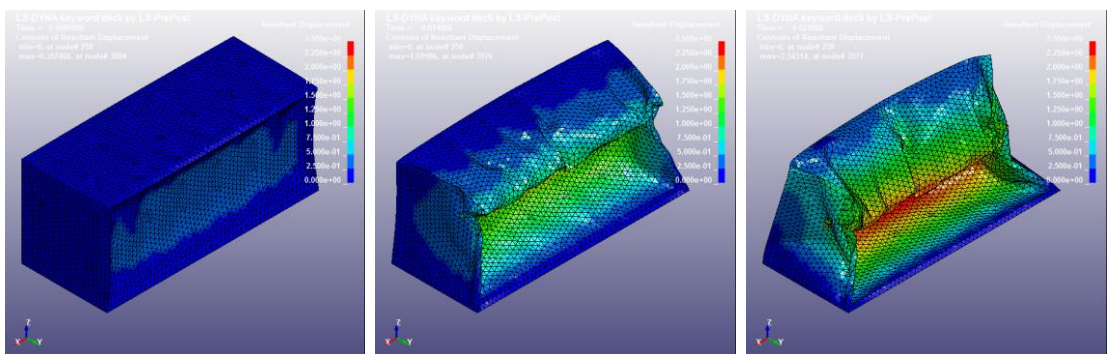


Figura 5.26: Evolução da deformação do contendor para TNT=500kg a 10m.

Através das figuras da evolução da deformação facilmente chegamos à conclusão de que a cúpula geodésica tem maior capacidade de resistir à ação explosiva, ainda que nos casos apresentados o dano seja muito agressivo.

**Deslocamento por planos de corte**

Para complementar esta ideia, foram elaboradas algumas curvas representativas dos valores de deformação para cada modelo. Para tal, escolheu-se um método que mostrasse ao longo do perímetro e da envolvente das estruturas, a variação de deslocamentos.

Este método consiste na elaboração de três planos de corte longitudinais, ou seja, na direção da onda explosiva, denominado como plano central, lateral 1 e lateral 2 de acordo com a sua posição relativa ao eixo de simetria. Por simplificação e tirando partido da simetria não se representam os planos à direita do eixo de simetria. Na Figura 5.27 e 5.28 estão ilustrados os planos referidos anteriormente, para a cúpula geodésica e para o contentor, respetivamente.

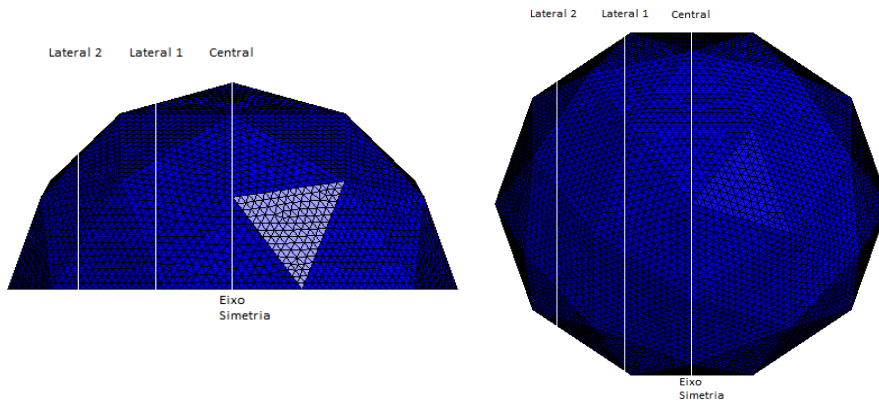


Figura 5.27: Planos de corte cúpula geodésica: central, lateral 1 e lateral 2.

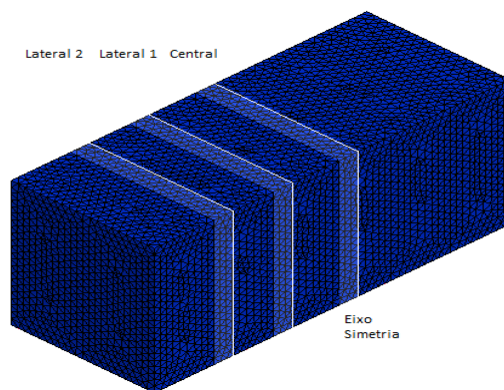


Figura 5.28: Planos de corte contentor: central, lateral 1 e lateral 2.



Em cada um dos pontos da estrutura pertencentes a estes planos está associado um deslocamento residual. Todos os resultados podem ser encontrados no apêndice A. Apenas se ilustra, através das Figuras 5.29 e 5.30, os resultados obtidos para uma carga explosiva TNT de 500kg a uma distância de 10m e para 150kg a 10m.

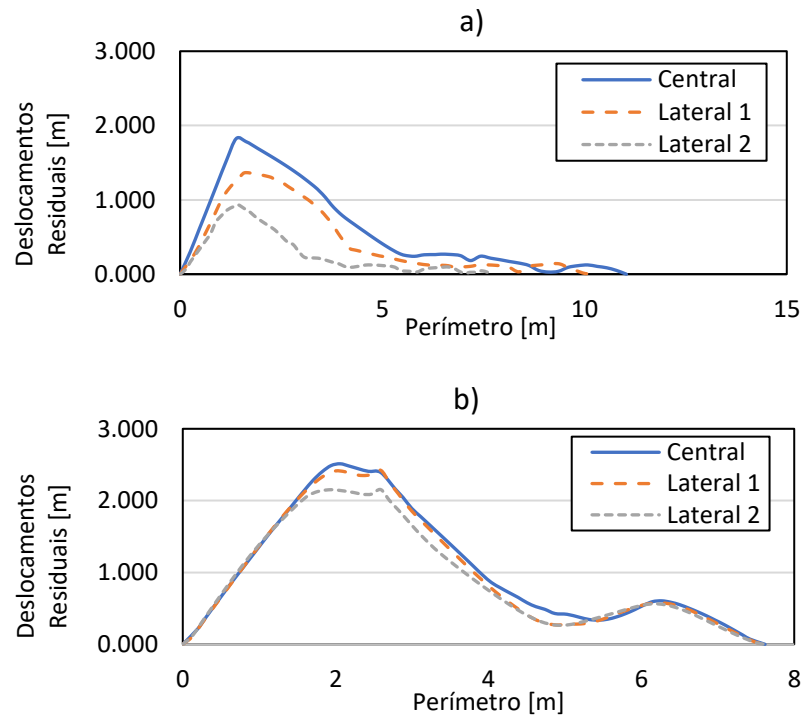


Figura 5.29: Variação dos deslocamentos residuais para TNT=500kg a 10m: Cúpula Geodésica a) e Contentor b).

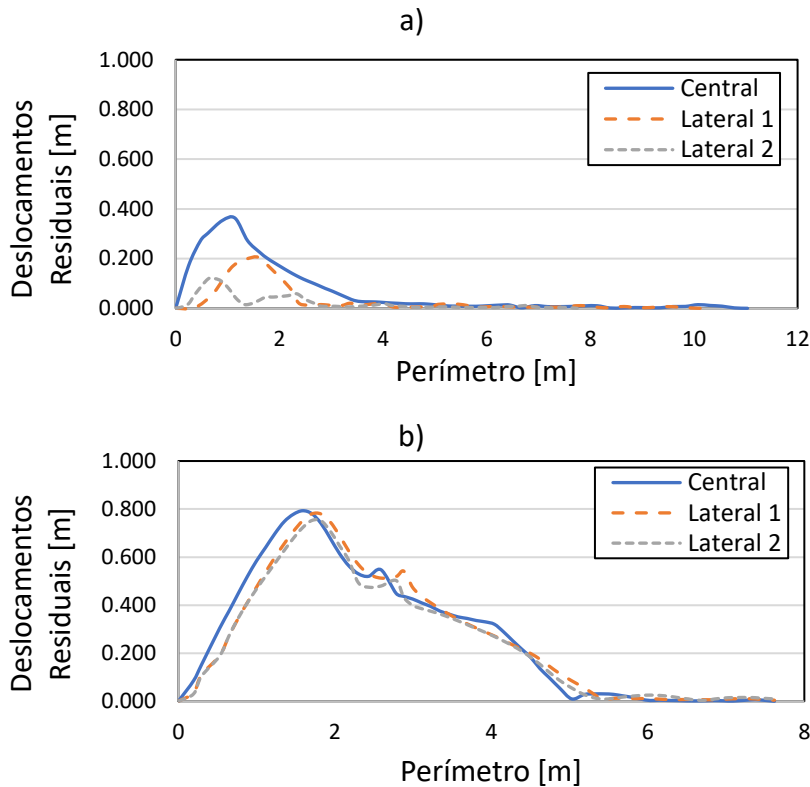


Figura 5.30: Variação dos deslocamentos residuais para TNT=150kg a 10m: Cúpula Geodésica a) e Contentor b).

Pode-se então concluir novamente que os deslocamentos são maioritariamente superiores no contentor relativamente à cúpula geodésica. Este fato, confirma cada vez mais uma melhor resposta da cúpula geodésica, às ações explosivas.

Outra forma ainda de observar estes resultados, é através da comparação entre a posição deformada e indeformada em cada um dos planos de corte definidos anteriormente. Esta comparação é feita através de figuras que ilustram uma vista lateral desses cortes, Figura 5.31 a 5.33 para a cúpula e Figura 5.34 a 5.36 para o contentor. Como simplificação apenas serão apresentadas as figuras relativas aos modelos que mostraram maior dano da estrutura.

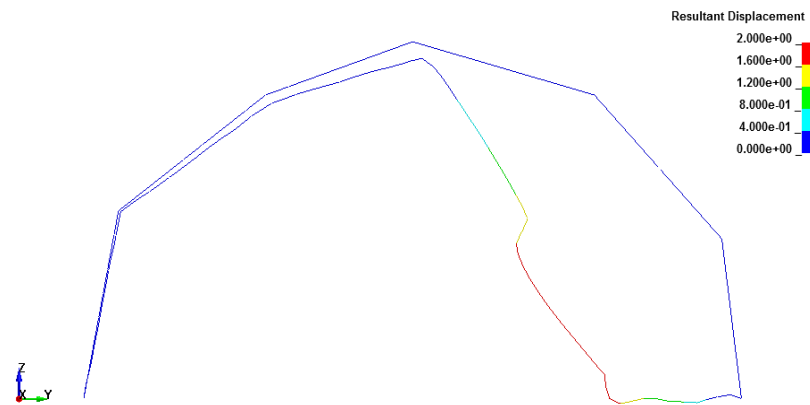


Figura 5.31: Posição deformada vs. indeformada da cúpula geodésica para TNT=500kg a 10m, plano central.

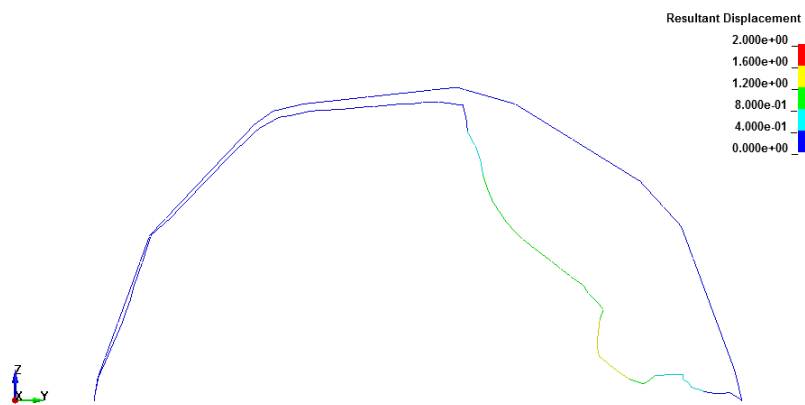


Figura 5.32: Posição deformada vs. indeformada da cúpula geodésica para TNT=500kg a 10m, plano lateral 1.

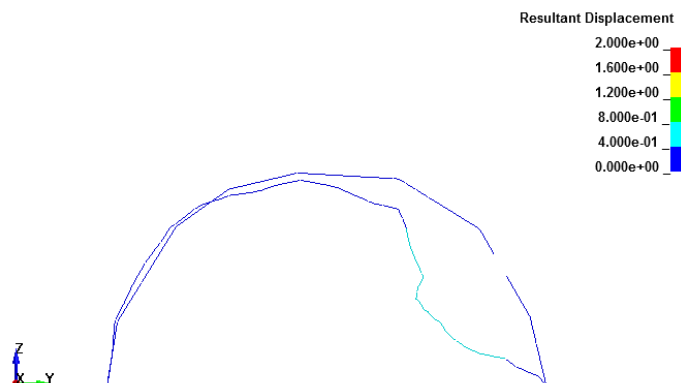


Figura 5.33: Posição deformada vs. indeformada da cúpula geodésica para TNT=500kg a 10m, plano lateral 2.

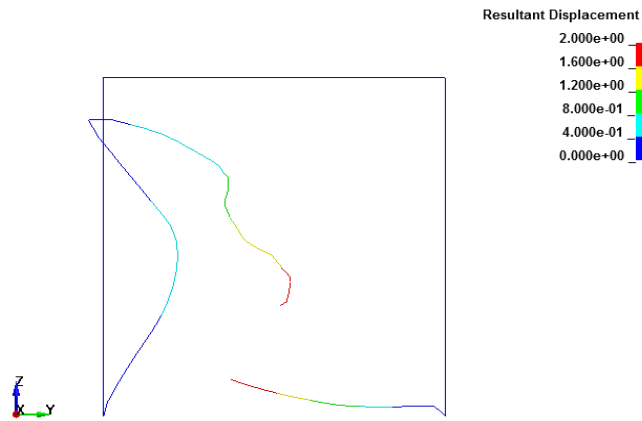


Figura 5.34: Posição deformada vs. indeformada do contentor para TNT=500kg a 10m, plano central.

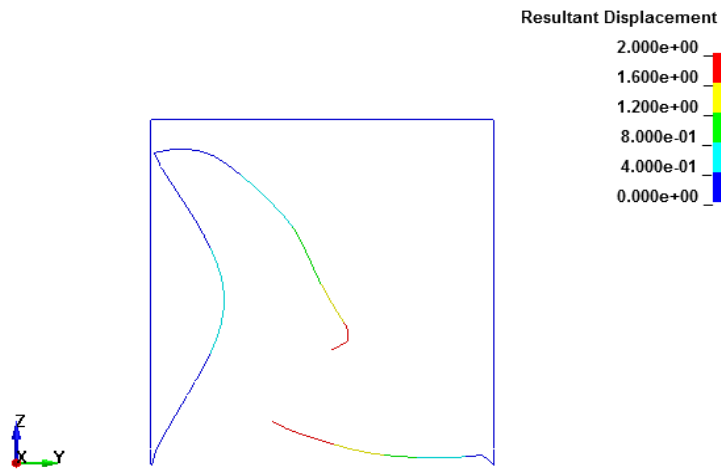


Figura 5.35: Posição deformada vs. indeformada do contentor para TNT=500kg a 10m, plano lateral 1.

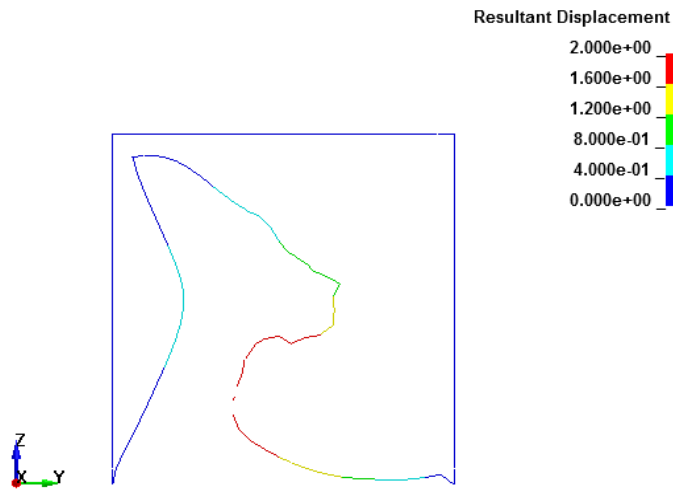


Figura 5.36: Posição deformada vs. indeformada do contentor para TNT=500kg a 10m, plano lateral 2.

Mais uma vez fica claro que, a deformação residual do contentor é superior à da cúpula geodésica visto que a área útil final é visivelmente mais pequena. Isto levou, a que se desenvolvesse uma análise por “zona de segurança”, que indicasse para um limite de deslocamento, definido à priori, qual a percentagem de área útil que não sofre danos superiores a esse mesmo limite.

### Zona de Segurança

A análise da zona de segurança consiste em mostrar a percentagem de área da estrutura que se encontra com um deslocamento inferior a um limite pré-estabelecido. Neste caso, tendo em consideração os máximos deslocamentos residuais, foram escolhidos três modelos, um para cada nível de carga de TNT e distância (50kg a 5m, 150kg a 10m e 500kg a 10m) em que os limites de deslocamentos foram fixados em 0.4m, 0.3m e 0.5m, respetivamente.

A percentagem de área que tem deslocamentos abaixo do limite, é medida com o auxílio dos gráficos de cores, apresentados nas Figura 5.37, 5.38 e 5.39. É calculada a área da zona a vermelho, correspondente à zona de perigo, e compara-se com a área total da estrutura em planta.

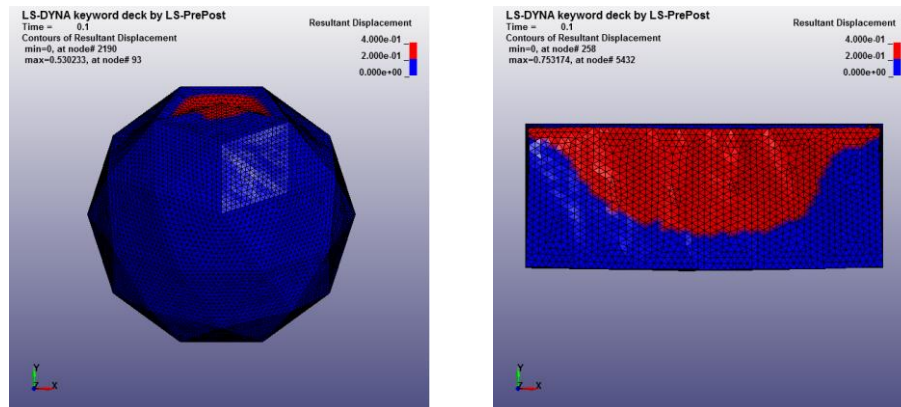


Figura 5.37: Zona de Segurança para um deslocamento limite de 0.4m para TNT=50kg a 5m.

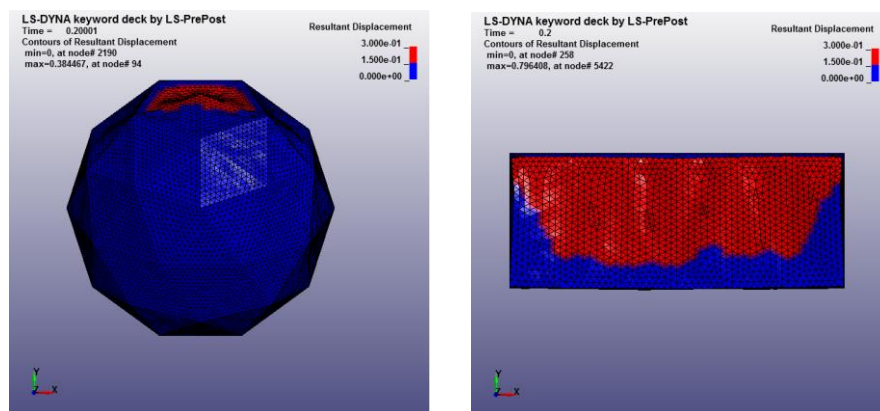


Figura 5.38: Zona de Segurança para um deslocamento limite de 0.3m para TNT=150kg a 10m.

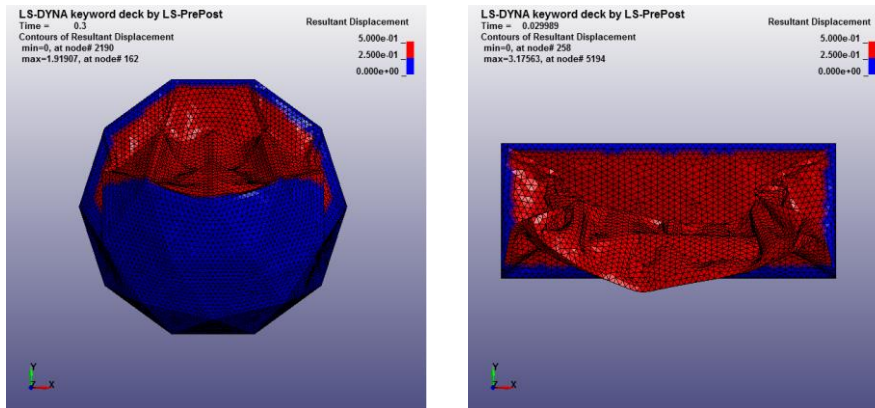


Figura 5.39: Zona de Segurança para um deslocamento limite de 0.5m para TNT=500kg a 10m.

É visível que, mesmo ao limitarmos os deslocamentos admissíveis que queremos na nossa estrutura, as cúpulas geodésicas permitem sempre salvaguardar uma área maior de segurança do que os contentores. A mesma análise pode ser feita para qualquer outro modelo.

Em forma de resumo, e para quantificar exatamente qual a percentagem da zona de segurança, foi elaborado uma tabela, Tabela 5-10, com os resultados obtidos para as figuras anteriormente apresentadas.

TNT [kg]	Distância [m]	Deslocamento Limite [m]	Cúpula Geodésica	Contentor
			Área Segurança [%]	Área de Segurança [%]
50	5	0.4	81.2	50.3
150	10	0.3	72.1	37.2
500	10	0.5	47.8	23.0

Tabela 5-10: Área de segurança em percentagem.

Em termos numéricos está também provado que a cúpula geodésica oferece, olhando para os números, maior segurança, quer em níveis estruturais quer a nível da sua utilização.

#### 5.4.6 Análise limite

Para além dos resultados demonstrados até então, foi também desenvolvida uma análise limite que diz respeito a limitações estruturais, do ponto de vista do dimensionamento de estruturas contra os ataques terroristas como as explosões.

Assim, de acordo com o *Protetive Design Center* (PDC) foram elaborados vários documentos técnicos sobre os valores limite de dimensionamento aplicados a elementos estruturais [33].

O documento PDC-TR 06-08, define vários níveis de proteção gerais e apresenta vários níveis de dano em curvas de carga explosiva versus distância. Estas curvas permitem verificar qual

o nível de dano associado a valores específicos de carga explosiva e distancia. Os níveis de dano fornecidos pelo documento, variam desde o dano superficial até a destruição total dos elementos estruturais [33].

Os parâmetros utilizados para caracterizar o nível de dano são a ductilidade e a rotação. Através do PDC [33] podemos observar os valores que limitam estes parâmetros associado a elementos estruturais de aço laminado a quente.

Identificando o tipo de esforços, a que os elementos estruturais das estruturas em estudo estão sujeitos, podemos ver quais os valores limite para vários tipos de dano. Tendo em conta que, nos modelos numéricos, os elementos estruturais estão sujeitos a flexão composta, o PDC-TR 06-08 define que para qualquer tipo de dano, a ductilidade e a rotação estão limitadas a um valor de 3, sendo a rotação utilizada em graus (°).

### Ductilidade

A ductilidade da estrutura tem a ver com a maior ou menor capacidade que a estrutura tem de suportar a deformação até atingir a rotura. A ductilidade é calculada com base nos gráficos de tensão-deformação utilizando a equação (5.2).

$$\mu = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_{ced}} \quad (5.2)$$

Onde, a  $\varepsilon_u$  é a deformação última e a  $\varepsilon_{ced}$  é deformação que corresponde à cedência do material. Para o tipo de aço utilizado a deformação de cedência tem o valor de 0.2%.

Com o auxílio da malha de pontos ilustrada na Figura 5.10, foi calculada a ductilidade para cada elemento "B" da estrutura geodésica. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5-11, para todos os modelos numéricos analisados.

TNT [kg]	Distância [m]	Cúpula Geodésica	Contentor
		Ductilidade média	Ductilidade média
50	5	3.8	19.5
	10	<1	13.1
	15	<1	11.1
150	10	4.3	17.5
	20	<1	15.7
	30	<1	9.9
500	10	15.2	37.7
	30	<1	9.4
	50	<1	7

Tabela 5-11: Valores de ductilidade média.

Comparando os valores obtidos para ambas as estruturas, vemos que o contentor apresenta sempre valores mais altos de ductilidade afastando-se muito do valor limite de 3. Por outro lado, a cúpula geodésica apresenta valores mais baixos e próximos do limite o que mostra que é mais fácil de controlar a ductilidade com a utilização deste tipo de estruturas.

O fato de existirem valores de ductilidade iguais ou inferiores a 1, significa que a estrutura está a ter um comportamento simplesmente elástico.

### Rotação

A rotação de um elemento, permite perceber se o seu movimento da posição indeformada para a posição deformada tem uma maior ou menor variação.

O cálculo da rotação foi elaborado para os elementos “B” da malha de pontos, utilizando os nós iniciais e finais de cada elemento, e o deslocamento associado a cada nó. Os valores foram obtidos através de regras matemáticas e podem ser analisados através da Tabela 5-12.

TNT [kg]	Distância [m]	Cúpula Geodésica	Contentor
		Rotação média [°]	Rotação média [°]
50	5	3.8	14.3
	10	0.9	3.6
	15	0.8	2.9
150	10	3.1	15.8
	20	0.9	2.2
	30	0.6	2.1
500	10	23.4	46.1
	30	0.8	5.1
	50	0.6	1.6

Tabela 5-12: Valores de rotação média.

Em relação às rotações, os resultados mostram, que a cúpula geodésica consegue aproximar-se mais facilmente do valor limite. Para o contentor, os valores obtidos mostram, que apesar de serem superiores aos obtidos para a cúpula, a estrutura consegue atingir valores válidos, e em alguns casos, abaixo do limite.



### Conclusões

Uma outra abordagem que foi realizada como comparação, entre o comportamento da cúpula geodésica e do contentor, tem como base os resultados que foram apresentados pela análise das rotações.

Na tentativa de se descobrir qual o valor da combinação carga de explosivo-distância, para cada modelo, que conduz a uma situação limite, de acordo com a rotação máxima de  $3^\circ$ , foram elaboradas curvas de rotação em função da distância.

Para cada nível de carga explosiva estudada, 50kg, 150kg e 500kg conseguiu-se, através de uma linha de tendência de potência, traçar a curva que traduz os valores de rotação para diferentes distâncias do explosivo. Essas curvas são ilustradas na Figura 5.40, 5.41 e 5.42.

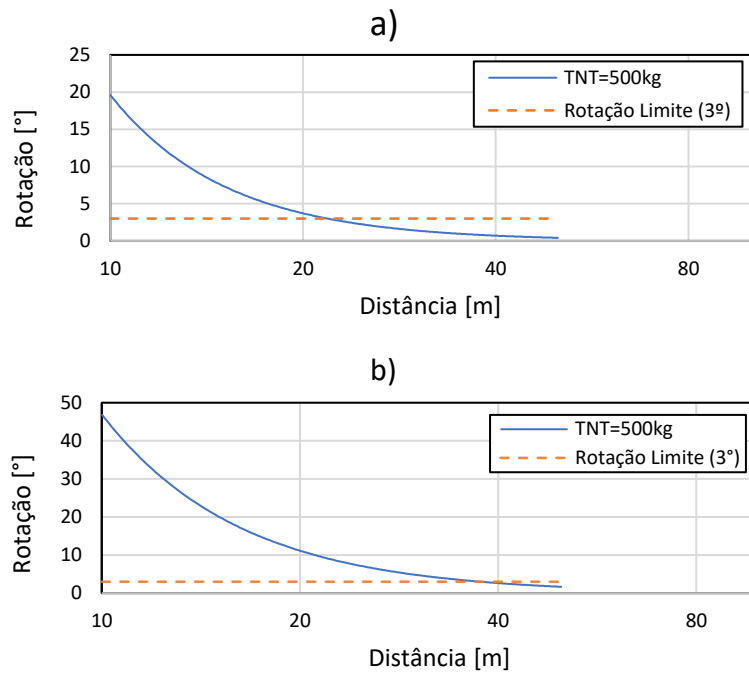


Figura 5.40: Curvas rotação-distância para cúpula geodésica a) e contentor b) com TNT=500kg.

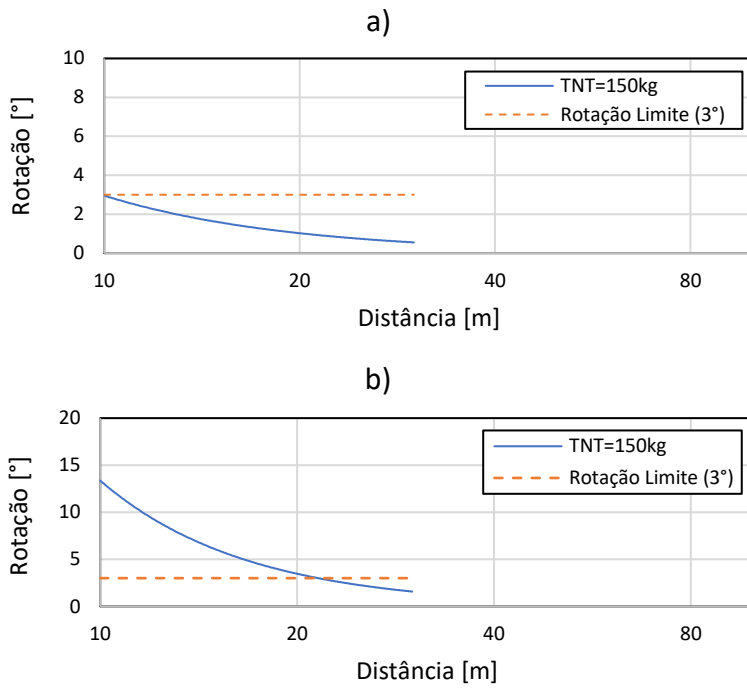


Figura 5.41: Curvas rotação-distância para cúpula geodésica a) e contentor b) com TNT=150kg.

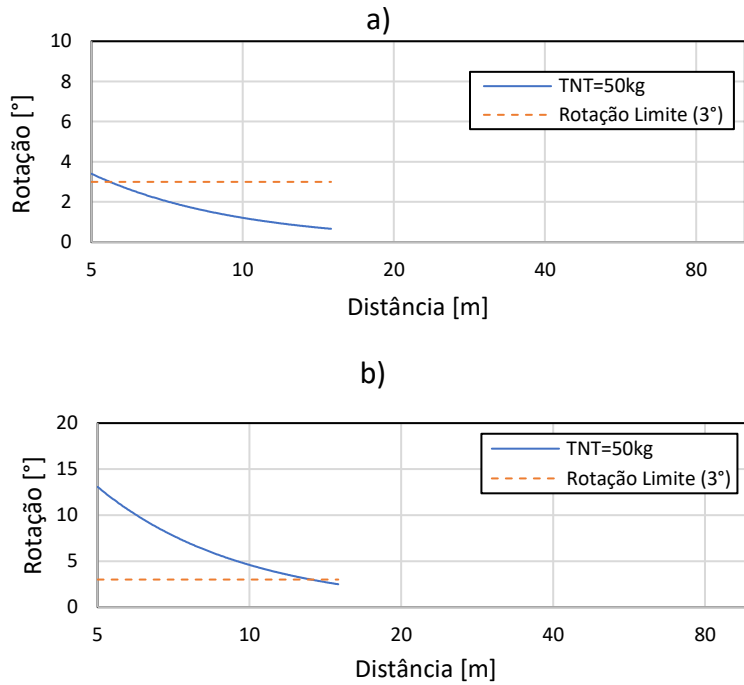


Figura 5.42: Curvas rotação-distância para cúpula geodésica a) e contentor b) com TNT=50kg.

Aproximadamente, observando as curvas de rotação-distância, foram registados os valores de distância que correspondem a uma situação limite. Este valor é o que se encontra na interseção das duas linhas dos gráficos anteriores. A Tabela 5-13 mostra os valores de distância que estão associados a uma rotação limite de 3°.

TNT [kg]	Distância [m]	
	Cúpula Geodésica	Contentor
50	13	22
150	20	10
500	35	6

Tabela 5-13: Situações associados a uma rotação limite de 3°.

Elaborando o gráfico de carga explosiva-distância [4,16,30] podemos observar que para cada uma das estruturas a resposta para a situação limite é distinta, como mostra a Figura 5.43.

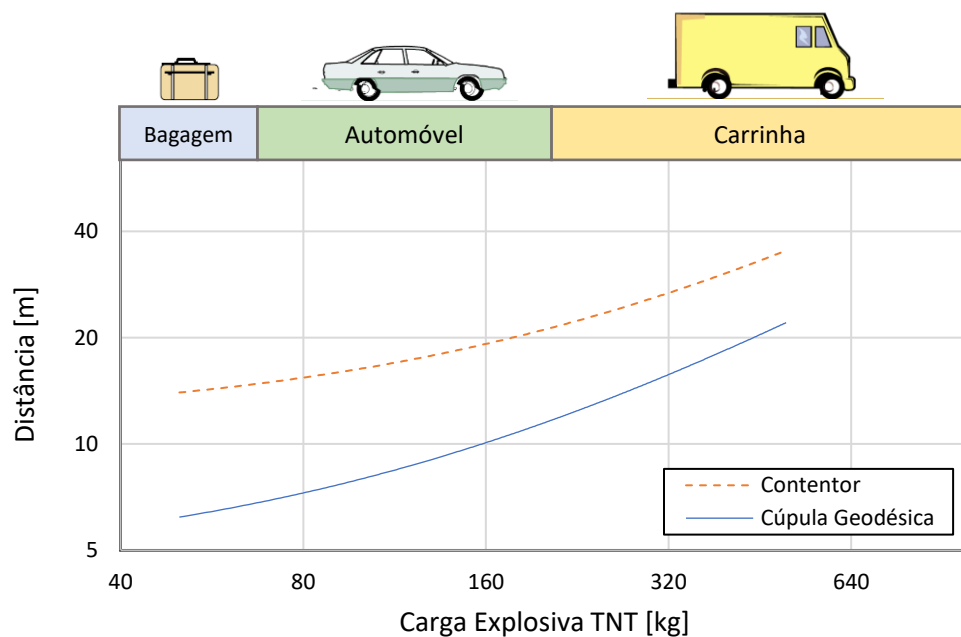


Figura 5.43: Curva distância-carga explosiva TNT.

Após todas as análises feitas, e como era esperado, a curva de distância-carga explosiva TNT [4,16,30] para a cúpula geodésica, situa-se abaixo da curva do contentor. Isto significa que para o mesmo nível de dano estrutural, o contentor precisa de maior distância de segurança. Por outras palavras, podemos dizer, que se ambas as estruturas estiveram à mesma distância da explosão, aquela que irá ter um dano maior é o contentor.



## Capítulo 6

# Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Este capítulo apresenta as conclusões sobre o estudo desenvolvido e alguns trabalhos que possam ser feitos, abordando a temática das cúpulas geodésicas sujeitas a explosões.

### 6.1 Conclusões

Desde que o registo de ataques terroristas tem aumentado na sociedade, existe uma preocupação crescente, em contabilizar no dimensionamento estrutural, os efeitos dinâmicos causados pelas explosões. Em situações militares, este aspeto tem ainda maior importância, pela maior probabilidade de ocorrência destes ataques. Por essa razão, as organizações militares têm vindo a ampliar o conhecimento sobre os efeitos provocados por ações explosivas, embora muitos dos resultados obtidos não sejam publicamente divulgados.

Esta dissertação, vem fornecer informações complementares no que diz respeito à resposta das estruturas quando sujeitas a ações explosivas, nomeadamente sobre as cúpulas geodésicas. A sua geometria e forma, proporcionam um funcionamento muito próprio e que foi explorado ao longo deste estudo.

Foi também de grande importância poder comparar o comportamento das cúpulas geodésicas com uma estrutura que fosse tradicionalmente mais utilizada. Este estudo comparativo deu um grande contributo quanto à validação das cúpulas geodésicas em detrimento dos contentores.

Hoje em dia, com o avanço dos programas de cálculo automáticos de análises numéricas, foi possível a modelação das duas estruturas, assim como da ação explosiva com base nas teorias apresentadas pelo UFC. O programa LS-DYNA, baseado no método dos elementos finitos, mostrou ser uma importante ferramenta na análise dinâmica das ações explosivas, considerando a análise não-linear das características dos materiais.

A resposta da estrutura foi registada e analisada em diversos parâmetros como as tensões, pressões, esforços axiais e deslocamentos e permitiram retirar algumas conclusões, como as seguintes:

- Em relação às tensões, foi possível verificar a importância que a estrutura geodésica tem no conjunto global da estrutura, fazendo diminuir essas tensões, e mesmo mais baixas quando comparadas com as tensões obtidos no contentor;
- Sobre as pressões, que são aplicadas à estrutura, resultantes da onda de choque, apesar de não serem significativamente diferentes das pressões registradas no contentor, estas aparecem com valor mais baixo;
- Como era de esperar pelo funcionamento estrutural das cúpulas geodésicas, os seus esforços axiais são superiores aos obtidos pelo contentor, devido também à sua geometria e disposição dos seus elementos mais rígidos.
- Em termos de deslocamentos, através das várias abordagens feitas, todas elas convergiam no sentido de que, a deformação era sempre maior no contentor do que na cúpula geodésica. Percebeu-se até, que nas cúpulas geodésicas havia maiores zonas de segurança, em que, apesar do dano causado na estrutura, tudo o que se encontra no interior dessa zona de segurança ficava de certa forma salvaguardado.
- Por último, a análise limite que foi permitida fazer, através de informações fornecidas pelo Protective Design Center (PDC), deu uma visão das duas estruturas quando se está num cenário de dimensionamento estrutural em que existe limitações sobre a ductilidade e rotação dos elementos estruturais. Através desta análise, ficou claro que, para o mesmo cenário limite das rotações, a distância de segurança que o contentor tem de manter relativamente à fonte da explosão, é em todos os casos superior, relativamente à cúpula geodésica. Este fato abona a favor da cúpula no que diz respeito à capacidade de suportar uma onda de choque.

Com isto, pode-se concluir que a utilização das cúpulas geodésicas num cenário de ataque explosivo é uma opção válida e que demonstra uma superior capacidade de resposta estrutural, face aos contentores utilizados pelos militares.

## 6.2 Trabalhos futuros

Nesta dissertação, os objetivos propostos foram alcançados. Ficam aqui algumas sugestões de trabalhos futuros com vista a aumentar o campo de conhecimentos sobre a temática apresentada.

- Necessidade de confirmar os resultados obtidos com resultados experimentais;
- Estudo para diferentes configurações de cúpulas geodésicas com outras frequências.
- Estudo de outro tipo de materiais para os painéis que sejam mais práticos de transportar e que tenham bom comportamento perante as ondas de choque.
- Análise do comportamento das cúpulas geodésicas para ações explosivas confinadas e estudar a influência de aberturas na estrutura.

## Referências Bibliográficas

- [1] Baker, W. E., Cox, P. A., Westine, P. S., Kulesz, J. J., e Strehlow, R. A., «Explosion hazards and evaluation», *Fundam. Stud. Eng.* 5, vol. 5, p. 103, 1983.
- [2] Bangash, M. Y. H. e Bangash, T., *Explosion-Resistant Buildings*. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [3] Bulson, P. S., *Explosive Loading of Engineering Structures*, 1.<sup>a</sup> ed. London: E & FN Spon, 1997.
- [4] Chipley, M., Kaminskas, M., Lyon, W., Beshlin, D., e Hester, M., «Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings», *FEMA 426*, p. 395, 2003.
- [5] Davim, J. P. e Maranhão, C., «A study of plastic strain and plastic strain rate in machining of steel AISI 1045 using FEM analysis», *Mater. Des.*, vol. 30, n. 1, pp. 160–165, 2009.
- [6] Dept of Army, U. S., *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. Technical Manual TM5-1300*. 1990.
- [7] Dept of Defense, U. S., *Unified Facilities Criteria Structures To Resist the Effects of Accidental*. 2008.
- [8] Diniz, J. A. V., «Estruturas geodésicas: estudos retrospectivos e proposta para um espaço de educação ambiental.», *Diss. para obtenção do grau Mestre em Eng. Civil, Univ. Fed. Ouro Preto*, p. 143, 2006.
- [9] Do, I. e Day, J., «Overview of Ale Method in Ls - Dyna», *Livermore Softw. Technol. Corp*, pp. 1–48, 2005.
- [10] Dusenberry, D. O., *Handbook for blast-resistant design of buildings*. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [11] Fuller, R. B. e Applewhite, E. J., *Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking*, vol. 17. Macmillan Publishing, 1976.
- [12] GmbH, Z., «Background Geodesic Domes», 2006. [Em linha]. Disponível em: [www.zendome.com](http://www.zendome.com). [Acedido: 06-Ago-2017].
- [13] Goel, M. D. e Matsagar, V. A., «Blast-Resistant Design of Structures», vol. 19, n. 2, pp. 1–9, 2014.
- [14] Hilding, D., «Methods for modelling air blast in LS-DYNA», em *14th German LS-DYNA Forum*, 2016.
- [15] Karlos, V. e Solomos, G., «Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components», *Eur. Lab. Struct. Assess.*, pp. 1–58, 2013.
- [16] Kennett, M., Letvin, E., Chipley, M., e Ryan, T., «Risk Assessment: A how-to guide to mitigate potential terrorist attacks against buildings», *FEMA 452*, pp. 1–248, 2005.
- [17] Kinney, G. F. e Graham, K. J., *Explosive Shocks in Air*, 2.<sup>a</sup> ed. Springer Berlin Heidelberg, 1985.
- [18] Krauthammer, T., «Modern Protective Structures», *Civ. Environ. Eng.*, 2008.

- [19] Kubik, M., «Structural Analysis of Geodesic Domes», *Final Year Proj. Sch. Eng. Durham Univ.*, p. 241, 2009.
- [20] LSTC, *LS-DYNA: Keyword User's Manual*, vol. I. 2016.
- [21] LSTC, *LS-DYNA: Keyword User's Manual: Material Models*, vol. II. 2016.
- [22] Magnusson, J., «Structural Concrete Elements Subjected to Air Blast Loading», *Licenciate Thesis, Stocholm*, p. 96, 2007.
- [23] Needham, C. E., *Blast Wave: Shock Wave and High Pressure Phenomenas*. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [24] Parke, G. A. R. e Disney, P., *Space structures 5*, vol. 2. Thomas Telford, 2002.
- [25] Pereira, J. M., «Security Evaluation and Design of Structures Subjected to Blast Loading», *Diss. para obtenção do grau Doutor em Eng. Civil, Esc. Eng. da Univ. do Minho*, n. April, p. 227, 2014.
- [26] Ramaswamy, G. S., Eekhout, M., e Suresh, G. R., *Analysis, Design and Construction of Steel Space Frames*. Thomas Telford Ltd, 2002.
- [27] Richter, D. ., «Space structures development from early concept to geodesic domes», em *2nd Internacional Space Structures Conference*, 1975, pp. 534–549.
- [28] Sahu, R. R. e Gupta, P. K., «Blast diffusion by different shapes of vehicle hull», *Int. J. Automot. Eng. Technol.*, vol. 2, n. 4, pp. 130–139, 2013.
- [29] Slavik, T. P., «Blast Loading in LS-DYNA», 2012. Disponível em: <http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/slavik/UCSD/>. [Acedido: 21-Jun-2017].
- [30] Smilowitz, R., Arnold, C., Ettouney, M., e Kaminskas, M., «Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings», *FEMA 426*, p. 510, 2011.
- [31] Stelzmann, U., *Die große Elementbibliothek in LS-DYNA*. Germany, 2010.
- [32] Tobias Erhart, «Review of Solid Element Formulations in LS-DYNA», *LS-Dyna Forum*, n. October, p. 36, 2011.
- [33] U.S. Army Corps of Engineers, «Single Degree of Freedom Structural Response Limits for Antiterrorism Design», *PDC-TR 06-08*, n. January, 2008.
- [34] Vedantam, K., Bajaj, D., Brar, N. S., e Hill, S., «Johnson - Cook strength models for mild and DP 590 steels», *AIP Conf. Proc.*, n. July, pp. 775–778, 2006.
- [35] Weisstein, E. W., «Platonic Solid», *MathWorld-A Wolfram*. [Em linha]. Disponível em: <http://mathworld.wolfram.com/PlatonicSolid.html>. [Acedido: 06-Ago-2017].
- [36] Yandzio, E. and M. G., «Protection of buildings against explosions», em *Steel Construction Institute UK*, 1999.
- [37] Zhai, X., Wang, Y., e Huang, M., «Performance and protection approach of single-layer reticulated dome subjected to blast loading», *Thin-Walled Struct.*, pp. 57–67, 2013.
- [38] Zhang, Y., Outeiro, J. C., e Mabrouki, T., «On the selection of Johnson-Cook constitutive model parameters for Ti-6Al-4V using three types of numerical models of orthogonal cutting», *Procedia CIRP*, vol. 31, pp. 112–117, 2015.
- [39] Zukas, J., «Introduction to Hydrocodes», vol. 49, p. 326, 2004.
- [40] Zung, T. T. K., *Buckminster Fuller: Antropology for the New Millenium*, 2001.
- [41] «Domerama Calculators». [Em linha]. Disponível em: <http://www.domerama.com/calculators/>. [Acedido: 10-Ago-2017].
- [42] «Só contentores». [Em linha]. Disponível em: <http://socontentores.pt/2017/07/20/contentor-de-20-pes/>. [Acedido: 15-Ago-2017].



## Apêndice A

### Resultados - Tensões

#### A.1 Tensões

Elemento	Tensões Cúpula Geodésica [GPa]			Tensões Contentor [GPa]		
	S/ Barras	C/ Barras	Diferença [%]	S/ Barras	C/ Barras	Diferença [%]
S1	1.53	1.42	7.1	2.10	2.23	-6.2
S2	1.74	1.66	4.7	2.49	2.34	5.8
S3	1.53	1.55	-1.2	2.43	2.05	15.6
S4	1.81	1.65	9.0	2.46	2.06	16.4
S5	1.76	1.79	-1.9	2.30	2.07	10.0
S6	1.88	1.68	10.4	2.17	2.28	-5.1
S7	1.78	1.80	-1.2	1.84	1.78	3.7
S8	1.75	1.26	28.1	2.17	1.97	9.5
S9	1.56	1.58	-1.2	1.97	1.66	15.6
S10	1.69	1.66	1.3	1.85	1.80	2.4
S11	1.44	1.53	-5.8	1.82	1.92	-5.6
S12	1.40	1.40	0.1	1.76	1.68	4.9
S13	1.65	1.46	11.1	-	-	-

Tabela A. 1: Análise das tensões para TNT=50kg a 5m.

Elemento	Tensões Cúpula Geodésica [GPa]			Tensões Contentor [GPa]		
	S/ Barras	C/ Barras	Diferença [%]	S/ Barras	C/ Barras	Diferença [%]
S1	1.40	1.39	0.4	2.10	1.50	29.0
S2	1.50	1.20	20.0	1.97	1.66	15.9
S3	1.01	1.38	-36.7	2.17	2.03	6.5
S4	1.03	1.08	-5.4	2.03	1.72	15.2
S5	1.21	1.47	-21.9	1.82	1.72	5.7
S6	1.28	1.60	-25.0	1.51	1.22	19.0
S7	1.56	1.24	20.5	1.75	1.55	11.7
S8	1.57	1.48	5.8	1.76	1.71	2.5
S9	1.06	1.47	-38.2	1.41	1.36	3.2
S10	1.25	1.15	7.9	1.89	1.02	45.9
S11	1.54	1.29	16.6	1.57	1.12	28.8
S12	1.25	1.19	4.8	1.32	1.17	11.4
S13	1.28	1.06	17.4	-	-	-

Tabela A. 2: Análise das tensões para TNT=50kg a 10m.

Elemento	Tensões Cúpula Geodésica [GPa]			Tensões Contentor [GPa]		
	S/ Barras	C/ Barras	Diferença [%]	S/ Barras	C/ Barras	Diferença [%]
S1	0.96	0.81	15.1	2.17	0.92	57.7
S2	1.14	1.04	8.1	1.67	0.83	50.3
S3	0.87	0.87	-0.8	2.23	0.96	57.0
S4	8.56	0.79	90.8	2.10	0.73	65.0
S5	1.23	0.87	29.1	1.48	0.97	34.6
S6	1.28	1.04	18.9	1.26	1.01	20.4
S7	1.28	1.10	13.7	1.23	0.81	34.5
S8	0.92	0.82	11.5	1.34	0.92	31.2
S9	1.03	0.98	4.8	1.13	0.68	40.0
S10	0.98	0.80	18.4	1.14	0.74	34.4
S11	1.08	0.91	15.4	1.03	0.59	42.7
S12	0.75	0.72	4.3	1.22	0.85	30.8
S13	1.08	0.67	38.1	-	-	-

Tabela A. 3: Análise das tensões para TNT=50kg a 15m.

Apêndice A. Resultados - Tensões

Elemento	Tensões Cúpula Geodésica [GPa]			Tensões Contentor [GPa]		
	S/ Barras	C/ Barras	Diferença [%]	S/ Barras	C/ Barras	Diferença [%]
S1	1.77	1.65	6.6	2.39	1.64	31.4
S2	1.78	1.70	4.2	2.44	2.24	8.2
S3	1.68	1.29	23.4	2.33	1.65	29.2
S4	1.48	1.55	-4.5	2.40	1.99	16.9
S5	1.65	1.71	-3.6	2.47	2.15	13.1
S6	1.75	1.65	5.6	2.07	1.65	20.4
S7	1.84	1.76	4.0	2.10	1.75	16.7
S8	1.72	1.47	14.5	2.43	2.17	10.5
S9	1.71	1.62	5.4	2.16	1.64	23.9
S10	1.70	1.73	-1.7	2.24	1.94	13.6
S11	1.69	1.65	2.3	1.71	1.50	12.3
S12	1.56	1.52	2.6	1.64	1.96	-19.5
S13	1.69	1.65	2.6	-	-	-

Tabela A. 4: Análise das tensões para TNT=150kg a 10m.

Elemento	Tensões Cúpula Geodésica [GPa]			Tensões Contentor [GPa]		
	S/ Barras	C/ Barras	Diferença [%]	S/ Barras	C/ Barras	Diferença [%]
S1	1.37	1.26	8.0	2.21	1.47	33.5
S2	1.33	1.09	18.1	2.22	1.31	40.9
S3	0.91	0.94	-3.9	1.98	1.22	38.6
S4	1.25	0.74	41.0	1.89	1.31	30.9
S5	1.20	1.08	10.0	1.98	1.30	34.2
S6	1.54	1.23	20.0	1.36	1.22	10.4
S7	1.31	1.52	-15.9	1.78	1.17	33.9
S8	1.28	1.08	15.2	1.56	1.40	9.7
S9	1.14	1.06	7.7	1.41	0.95	33.0
S10	1.11	1.47	-32.1	1.50	0.99	33.9
S11	1.25	1.17	6.7	1.53	1.33	13.3
S12	1.27	0.98	23.1	1.59	1.15	27.8
S13	1.47	1.03	29.5	-	-	-

Tabela A. 5: Análise das tensões para TNT=150kg a 20m.

Elemento	Tensões Cúpula Geodésica [GPa]			Tensões Contentor [GPa]		
	S/ Barras	C/ Barras	Diferença [%]	S/ Barras	C/ Barras	Diferença [%]
S1	0.90	0.63	29.8	1.92	1.47	33.5
S2	1.09	0.57	47.5	1.52	1.31	40.9
S3	0.70	0.50	27.5	2.03	1.22	38.6
S4	0.63	0.52	16.2	2.44	1.31	30.9
S5	0.91	0.68	25.2	1.80	1.30	34.2
S6	0.93	0.69	26.1	1.53	1.22	10.4
S7	0.87	0.79	9.1	1.68	1.17	33.9
S8	1.08	0.87	18.8	1.71	1.40	9.7
S9	1.00	0.68	32.1	1.39	0.95	33.0
S10	1.00	0.62	38.1	1.50	0.99	33.9
S11	0.90	0.69	23.8	1.40	1.33	13.3
S12	0.81	0.62	24.0	1.53	1.15	27.8
S13	0.93	0.64	31.1	-	-	-

Tabela A. 6: Análise das tensões para TNT=150kg a 30m.

Elemento	Tensões Cúpula Geodésica [GPa]			Tensões Contentor [GPa]		
	S/ Barras	C/ Barras	Diferença [%]	S/ Barras	C/ Barras	Diferença [%]
S1	1.70	1.90	-12.0	2.50	2.51	-0.4
S2	1.77	1.79	-1.1	2.56	2.54	0.8
S3	1.73	1.64	5.2	2.45	2.41	1.6
S4	1.81	1.88	-3.9	2.49	2.38	4.4
S5	1.78	1.82	-2.2	2.35	2.30	2.1
S6	1.80	1.82	-1.2	2.35	2.41	-2.2
S7	1.82	1.90	-4.4	2.21	2.16	2.2
S8	1.98	1.86	6.1	2.20	2.38	-7.9
S9	1.94	1.89	2.6	2.33	2.35	-0.9
S10	1.97	1.85	6.1	2.22	2.39	-7.6
S11	1.99	1.75	11.8	2.25	2.40	-6.9
S12	1.87	1.55	17.1	2.18	2.34	-7.3
S13	1.97	1.72	12.7	-	-	-

Tabela A. 7: Análise das tensões para TNT=500kg a 10m.

Apêndice A. Resultados - Tensões

Elemento	Tensões Cúpula Geodésica [GPa]			Tensões Contentor [GPa]		
	S/ Barras	C/ Barras	Diferença [%]	S/ Barras	C/ Barras	Diferença [%]
S1	1.40	1.29	8.2	1.86	1.30	30.1
S2	1.53	1.16	24.1	2.12	2.36	-11.2
S3	1.31	1.04	20.2	2.07	1.87	9.5
S4	1.23	0.93	24.6	2.13	1.20	43.7
S5	1.45	1.46	-0.4	1.72	1.68	2.3
S6	1.53	1.24	19.2	2.14	1.21	43.4
S7	1.72	1.58	7.9	1.80	1.20	33.3
S8	1.71	1.58	7.6	1.80	1.52	15.8
S9	1.29	1.48	-14.2	1.74	1.06	38.9
S10	1.43	1.54	-7.8	1.96	1.19	39.3
S11	1.73	1.50	13.5	1.92	1.04	45.7
S12	1.39	1.23	11.2	1.71	1.15	32.7
S13	1.70	1.28	24.4	-	-	-

Tabela A. 8: Análise das tensões para TNT=500kg a 30m.

Elemento	Tensões Cúpula Geodésica [GPa]			Tensões Contentor [GPa]		
	S/ Barras	C/ Barras	Diferença [%]	S/ Barras	C/ Barras	Diferença [%]
S1	0.59	0.57	4.0	2.16	0.65	70.1
S2	0.82	0.68	17.3	2.18	0.73	66.4
S3	0.76	0.61	19.7	2.40	0.78	67.2
S4	0.63	0.45	29.0	2.29	0.66	71.0
S5	0.78	0.54	30.8	1.68	0.75	55.0
S6	0.66	0.59	11.3	1.58	0.57	63.6
S7	0.65	0.69	-5.1	1.59	0.56	64.8
S8	0.80	0.64	20.3	1.64	0.77	53.1
S9	0.79	0.59	25.0	1.44	0.60	58.4
S10	1.00	0.53	47.3	1.55	0.71	54.1
S11	0.80	0.57	28.6	1.48	0.54	63.6
S12	0.63	0.49	22.0	1.66	0.60	63.7
S13	0.89	0.65	26.6	-	-	-

Tabela A. 9: Análise das tensões para TNT=500kg a 50m.



## Apêndice B

### Resultados - Deslocamentos

#### B.1 Deslocamentos Residuais

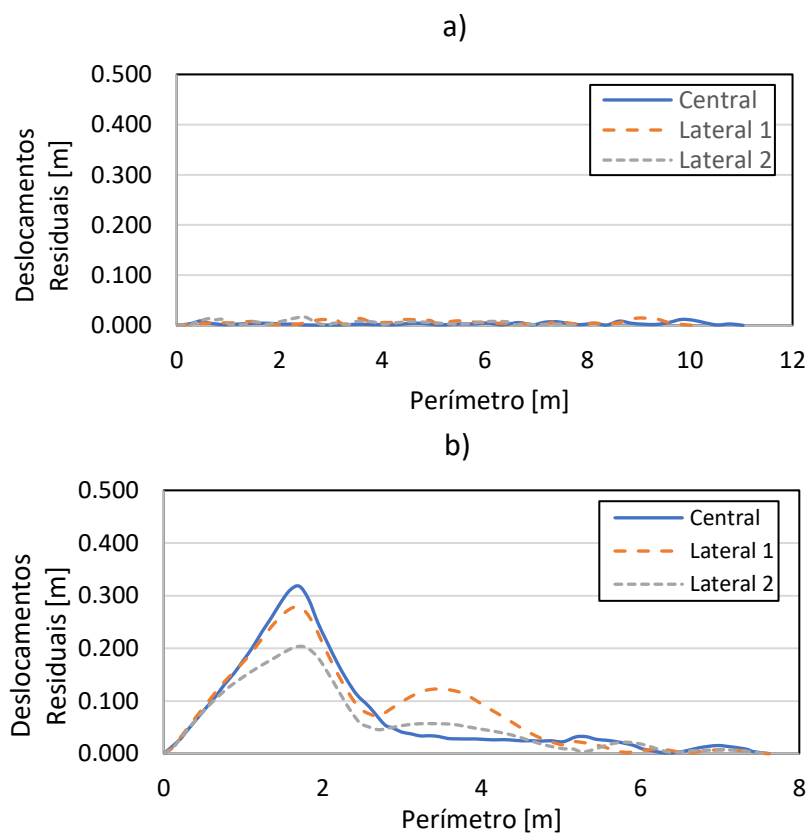


Figura B. 1: Variação dos deslocamentos residuais para TNT=500kg a 30m: Cúpula Geodésica a) e Contentor b).

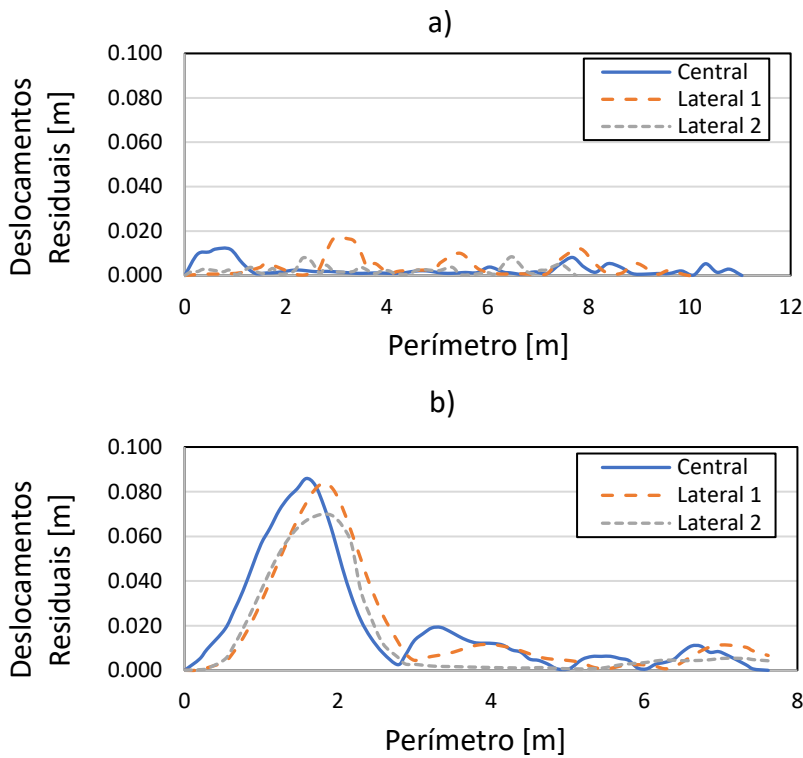


Figura B. 2: Variação dos deslocamentos residuais para TNT=500kg a 50m: Cúpula Geodésica a) e Contentor b).

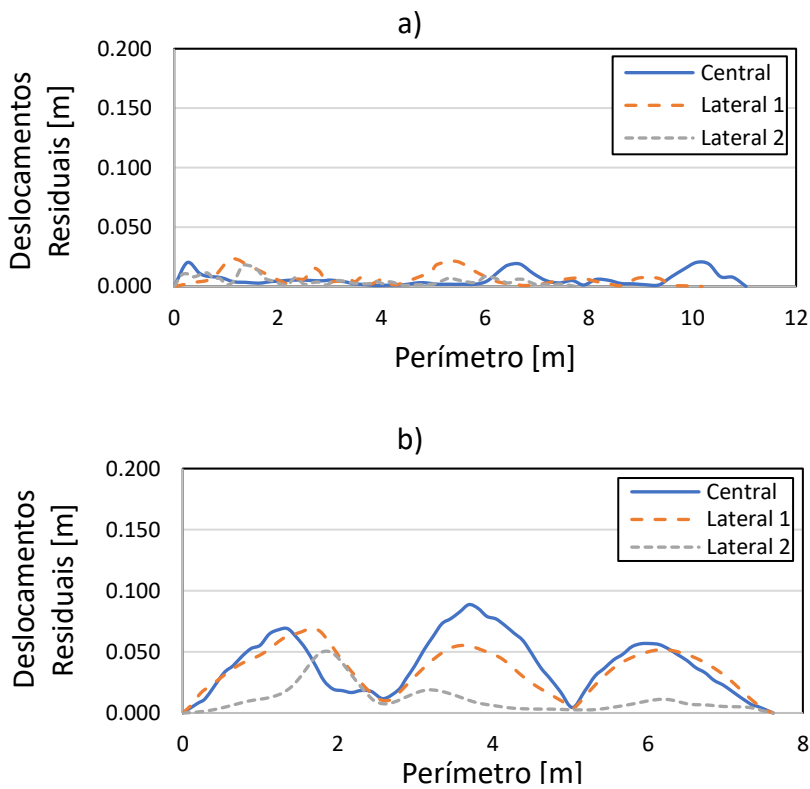


Figura B. 3: Variação dos deslocamentos residuais para TNT=150kg a 20m: Cúpula Geodésica a) e Contentor b).



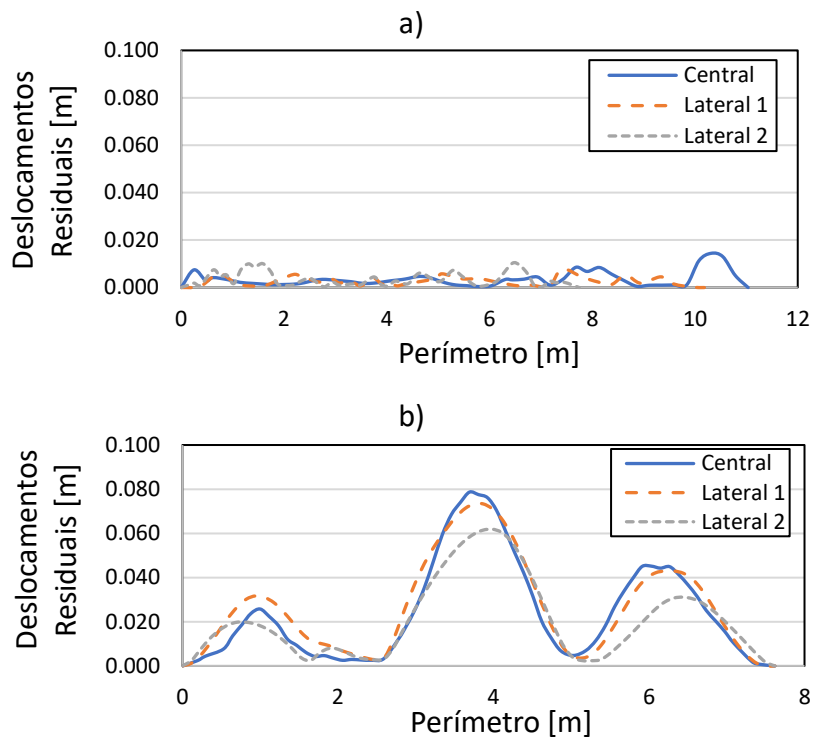


Figura B. 4: Variação dos deslocamentos residuais para TNT=150kg a 30m: Cúpula Geodésica a) e Contentor b).

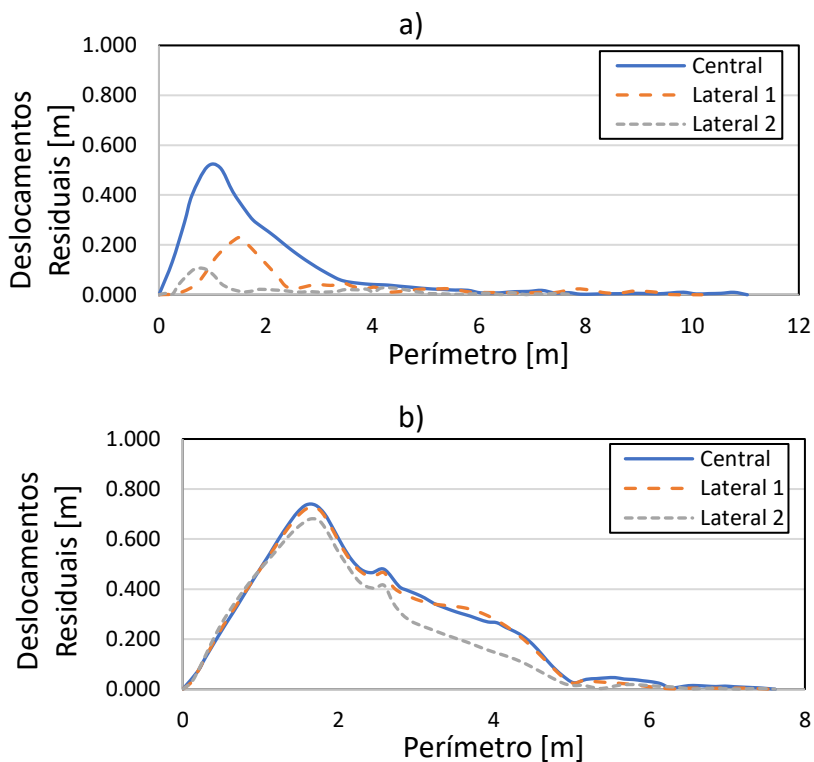


Figura B. 5: Variação dos deslocamentos residuais para TNT=50kg a 5m: Cúpula Geodésica a) e Contentor b).

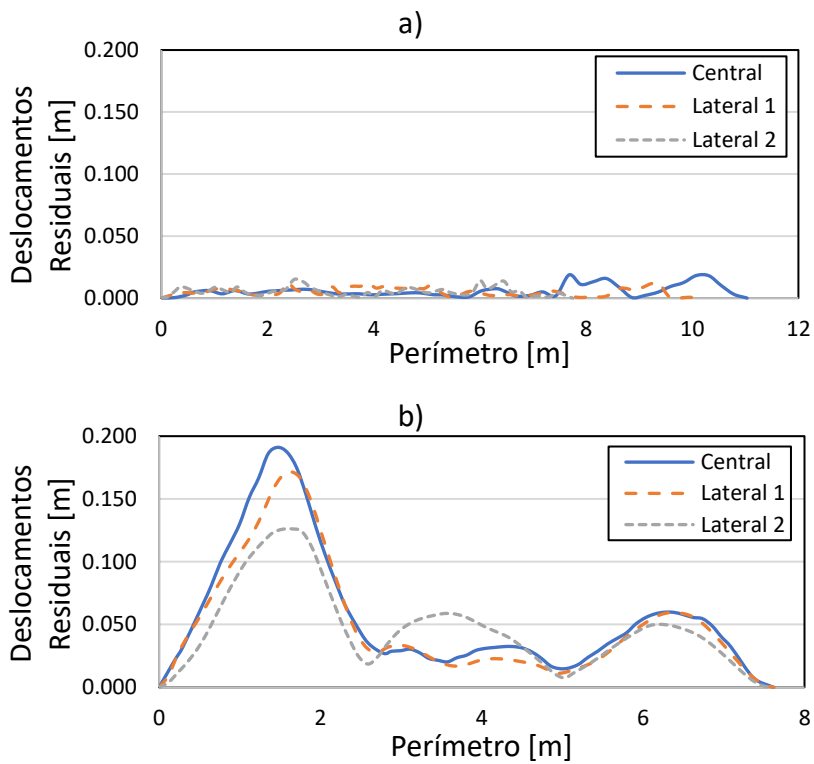


Figura B. 6: Variação dos deslocamentos residuais para TNT=50kg a 10m: Cúpula Geodésica a) e Contentor b).

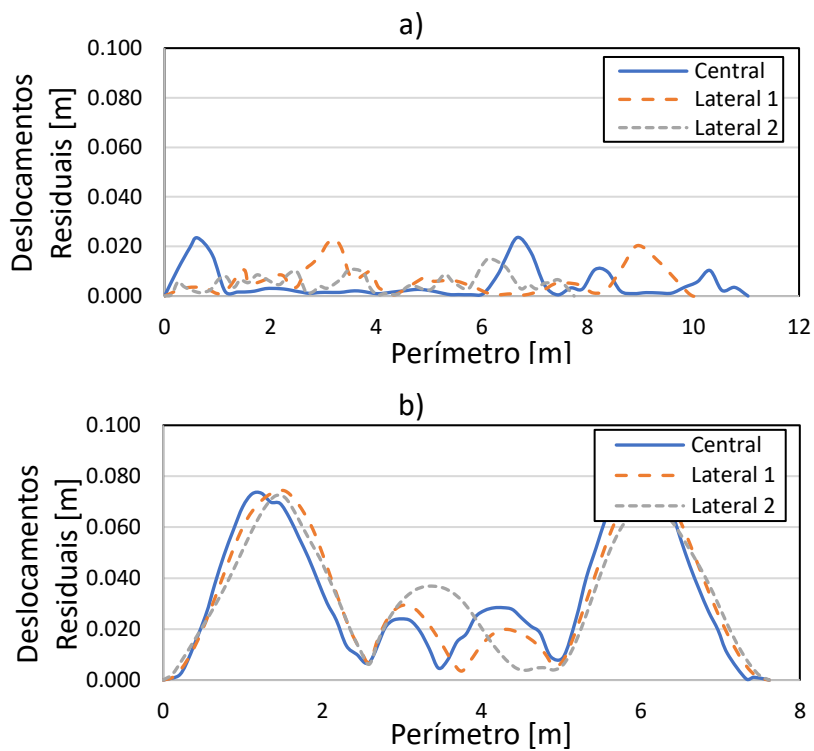


Figura B. 7: Variação dos deslocamentos residuais para TNT=50kg a 15m: Cúpula Geodésica a) e Contentor b).