



Utilização de tubos de choque para geração de cargas explosivas ampliadas em ambiente controlado

António Júnio Teixeira Lima

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Mestrado em Engenharia Militar

Orientador: Professor Auxiliar Hugo Miguel Bento Rebelo
Coorientador: TCor Eng Pedro José da Silva Gonçalves Matias

Outubro, 2023

“The way to succeed is to double your failure rate.”

Thomas J. Watson

Declaração

Eu declaro que este documento é uma obra original, da minha própria autoria, e que cumpre os requisitos do código do aluno da Academia Militar, das normas de execução permanente da Academia Militar e do código de conduta e boas práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Esta dissertação de mestrado não podia existir sem o enorme contributo de todas as pessoas que me rodeiam, quer no meu meio pessoal como profissional.

Tenho a agradecer à minha família por toda a motivação que me dão e apoio nos dias mais difíceis e sobretudo nas noites mais longas, e por me ajudarem a nunca perder o foco do objetivo final.

A todos os meus camaradas que nas horas mais difíceis lá estavam para me ajudar a ultrapassar as várias adversidades que apareceram, não só ao longo dos longos meses em que esta dissertação foi feita, mas também ao longo de todos os anos durante o curso.

Agradeço a todas as pessoas que fizeram parte da minha vida e que hoje continuam a fazer parte dela, pois ajudaram-me a continuar e a manter os ideais no sítio e a não desistir de sonhar, mas agradeço também as pessoas que por circunstâncias da própria vida hoje já não me acompanham tão proximamente, pois graças a estas fui obrigado a redescobrir-me e com isso tornar-me na pessoa que sou, e como tal, não desistir perante as adversidades.

Agradeço ao meu orientador Professor Hugo Rebelo, por toda a paciência e disponibilidade que teve comigo, e que sem o seu enorme contributo esta dissertação não tinha sido possível.

Agradeço ao 1º Sarg Eng Nobre, por toda a ajuda incondicional e todas as horas extra depositadas no meu trabalho e que sem a sua valiosa ajuda esta dissertação não podia ter sido realizada.

Agradeço ao Cap. Eng Matos, pelo auxílio prestado ao longo de todo o trabalho realizado, foi uma ajuda e participação crucial e que sem dúvida impulsionou esta dissertação num bom caminho.

Um especial obrigado a todos os engenheiros da FOXTROT, da nova e da velha, por todas as histórias e momentos partilhados, que sem elas isto não era possível.

Um muito obrigado ao meu camarada e amigo Miguel Chambino por todo o apoio ao longo desta dissertação, isto não era possível sem ti.

Um muito obrigado, e isto é dizer pouco, à pessoa que mesmo depois de ter partido me continuou a dar forças para continuar, me chamava à razão pelos valores que me ensinou e que embora, hoje não esteja cá para me poder dizer “trabalha para um dia seres alguém”, me fez lembrar todos os dias o porquê. À minha avó Maria da Glória, um obrigado por todo aquilo que me deste e que hoje resulta em mais uma obra e uma meta alcançada, estejas onde estiveres, esta dissertação foi feita contigo sempre presente.

A todas as pessoas já mencionadas, e a todas as outras que não foram mencionadas por engano, um muito obrigado por estarem presentes e permitirem que mais uma etapa fosse concluída.

Muito obrigado!

Resumo

Esta dissertação, inserida no projeto CINAMIL "SAERFA - Sistemas de Absorção de Energia com Recurso ao Fabrico Aditivo", aborda a proteção de infraestruturas contra explosões. Através de quatro campanhas experimentais, foram obtidas equivalências de TNT para o explosivo PE4-A, utilizando diferentes métodos de avaliação, como sobrepressões de pico, impulsos e velocidade de propagação da onda de choque.

A primeira campanha teve como objetivo avaliar a precisão e repetibilidade da determinação do equivalente TNT utilizando sobrepressões de pico e impulsos. A segunda explorou grandezas alternativas para a determinação da equivalência, nomeadamente sua determinação recorrendo à velocidade de propagação da onda de choque. A terceira obteve pressões amplificadas através de um tubo de choque, proporcionando novos *insights*.

A última campanha experimental avaliou os deslocamentos provocados numa viga metálica pelas forças resultantes das pressões do tubo de choque. Os resultados demonstraram consistência e confiabilidade, validando a eficácia dos métodos aplicados.

A dissertação destaca a importância de preparar infraestruturas para resistir a ataques e explosões, especialmente em locais de grande probabilidade de ameaça, como instalações governamentais e educacionais. A diversidade de casos analisados, incluindo incidentes reais em diferentes países, ressalta a necessidade urgente de medidas de prevenção e segurança.

O estudo contribui para o avanço na compreensão do comportamento das estruturas sujeitas a ondas de choque, fornecendo uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias de proteção e salvamento de vidas em situações de explosões.

Palavras-chave: Ação da Explosão; Cargas Equivalentes de TNT; Proteção de Infraestruturas; LS-Dyna; Explosivo PE4-A.

Abstract

This dissertation, part of the CINAMIL project "SAERFA - Energy Absorption Systems using Additive Manufacturing," addresses the protection of infrastructure against explosions. Through four experimental campaigns, TNT equivalences were obtained for the PE4-A explosive, using different evaluation methods such as peak overpressures, impulses, and shock wave propagation velocity.

The first campaign aimed to assess the precision and repeatability of determining the TNT equivalent using peak overpressures and impulses. The second explored alternative parameters for determining equivalence, specifically by using the shock wave propagation velocity. The third obtained amplified pressures through a shock tube, providing new insights.

The last experimental campaign evaluated the displacements induced in a metal beam by the forces resulting from the shock tube pressures. The results demonstrated consistency and reliability, validating the effectiveness of the applied methods.

The dissertation underscores the importance of preparing infrastructure to withstand attacks and explosions, especially in locations with a high likelihood of threat, such as government and educational facilities. The diversity of cases analyzed, including real incidents in different countries, highlights the urgent need for prevention and security measures.

The study contributes to advancing the understanding of the behavior of structures subjected to shock waves, providing a solid foundation for the development of strategies to protect and save lives in explosion scenarios.

Keywords: Explosion Action; Equivalent TNT Loads; Infrastructure Protection; LS-Dyna; Explosive PE4-A.

Índice

Resumo.....	ix
Abstract	xi
Índice.....	xiii
Índice de Figuras.....	xv
Índice de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Problema proposto e motivação para o tema.....	1
1.2 Objetivos e Metodologia	5
1.3 Estrutura da Dissertação	6
2 Estado da Arte	7
2.1 Definição de Explosão	7
2.2 Caracterização do explosivo PE4-A.....	7
2.3 Caracterização de uma onda de choque	8
2.4 Regras de relação escalar	11
2.5 Pressão Refletida	13
2.6 Comportamento de uma onda de choque ao longo de tubos de choque	15
2.7 Resposta estrutural	17
3 Campanha experimental	21
3.1 Ensaio experimental 1	21
3.2 Ensaio experimental 2	23
3.3 Ensaio experimental 3	29
3.4 Ensaio experimental 4	34
3.4.1 Configuração do ensaio	34
4 Análise analítica e numérica.....	39
4.1 Características físicas da viga.....	39
4.2 Método analítico	40
4.3 Modelo numérico.....	42
4.3.1 Geometria e condições de fronteira.....	43
4.3.2 Modelos de material	44
4.3.3 Carregamento.....	44
4.4 Comparação de resultados.....	46
5 Conclusão	47
Bibliografia	48

Índice de Figuras

Figura 1 - Número de acidentes com explosões nos Estados Unidos da América desde 2012 a 2021.....	1
Figura 2 - Tipos de incidentes explosivos nos Estados Unidos da América no ano de 2019.....	2
Figura 3 - Principais alvos de Ameaça de Bomba (3 mais comuns) nos Estados Unidos da América no ano de 2019.. ..	2
Figura 4 - Visão aérea do local de uma explosão numa estação da GLP em Crevedia, perto de Bucareste, Romênia, 27 de agosto de 2023.	3
Figura 5 - Envolvente do edifício alvo na cidade de Ancara.	4
Figura 6 - Cooperativa agrícola em Palotina no estado do paraná no Brasil.....	5
Figura 8 - Explosão em ambiente aberto	8
Figura 7 - Explosões Confinadas.....	9
Figura 9 - Variação da Pressão ao longo do tempo.	10
Figura 10 - Regra de escala de Hopkinson - Cranz.....	12
Figura 11 - Parâmetros da fase positiva de uma onda de choque para uma explosão esférica de TNT em meio livre ao nível da água do mar.....	12
Figura 12 - Tipos de pressão atuantes numa estrutura.....	13
Figura 13 - Pressão Refletida e Pressão incidente.....	14
Figura 14 - Desenvolvimento de uma onda de choque até à fase planar	14
Figura 15 - Representação esquemática dos eventos ocorrendo em um tubo de choque para aplicações de explosão e as correspondentes distribuições de pressão ao longo do eixo longitudinal do tubo em momentos característicos: (a) configuração inicial, (b) padrão da o imediatamente após a rutura do diafragma, (c) ondas de rarefação refletidas alcançam a superfície de contato, (d) ondas de rarefação refletidas alcançam a onda de choque e (e) reflexão da onda de choque entrante.	16
Figura 16 - Efeito de End-Jet.....	17
Figura 17 - Variação da pressão da onda com a variação da distância	18
Figura 18 - Interação da onda de choque com um Edifício	18
Figura 19 - Sistema com um grau de liberdade.....	20
Figura 20 - Sistema com um grau de liberdade.....	20
Figura 21 - Configuração do ensaio experimental nº1.	22
Figura 22 - Suporte dos sensores de pressão, impresso em 3D. Espaçamento entre orifícios é de 13 milímetros (de centro a centro).	23
Figura 23 - Gráfico do 1º Ensaio com um valor de 656,43 m/s de velocidade média. Massa de explosivo PE4-A 20,3 g.	24
Figura 24 - Gráfico do 2º Ensaio com um valor de 553,11 m/s de velocidade média. Massa de explosivo PE4-A 19,8 g.	24
Figura 25 - Gráfico do 3º Ensaio com um valor de 737,11 m/s de velocidade média. Massa de explosivo PE4-A 19,9 g.	25
Figura 26 - Configuração dos sensores em relação à posição central do explosivo (média dos 3 ensaios).	25
Figura 27 - Frames com posição da onda de choque, sendo que o movimento da onda em cada frame é da direita para a esquerda.	27
Figura 28 - Gráfico com os valores obtidos do deslocamento parcial da onda para o ensaio nº1. Valor da velocidade obtido foi de 487,07 m/s.	28
Figura 29 - Gráfico com os valores obtidos do deslocamento parcial da onda para o ensaio nº2. Valor da velocidade obtido foi de 540,90 m/s.	28

Figura 30 - Gráfico com os valores obtidos do deslocamento parcial da onda para o ensaio nº3. Valor da velocidade obtido foi de 531,39 m/s.	29
Figura 31 - Configuração do 3º ensaio experimental.	30
Figura 32 - Curva de deslocamento, com base nos tempos de chegada da onda de choque, para o Ensaio 1. A massa de explosivo usada foi de 19,9 gramas.	31
Figura 33 - Curva de deslocamento, com base nos tempos de chegada da onda de choque, para o Ensaio 2. A massa de explosivo usada foi de 20,1 gramas.	32
Figura 34 - Curva de deslocamento, com base nos tempos de chegada da onda de choque, para o Ensaio 3. A massa de explosivo usada foi de 19,9 gramas.	32
Figura 35 - Gráfico de relação entre a pressão incidente e coeficiente entre a pressão refletida e a pressão incidente.	33
Figura 36 - Perfil triangular de suporte da viga e apoio simples da viga.	35
Figura 37 - Posicionamento das câmaras em relação à viga.	36
Figura 38 - Padrão de reconhecimento para o software DIC e o acelerómetro colocado na viga.	36
Figura 39 - Valor de deslocamento obtidos pelo DIC.	37
Figura 40 - Valor dos deslocamentos obtidos através do acelerómetro em contraste com os valores obtidos pelo DIC.	37
Figura 41 - Perfil UNP	39
Figura 42 - Deformação máxima de um sistema elasto-plástico com um grau de liberdade para uma carga instantanea.	40
Figura 43 - Valor dos deslocamentos obtidos através do acelerómetro e pelo DIC em contraste com os valores pela integração numérica no tempo.	42
Figura 44 - Viga modelada com a carga aplicada no LS-Dyna	43
Figura 45 - BOUNDARY_SPC_SET apoio móvel.	43
Figura 46 - BOUNDARY_SPC_SET apoio fixo.	43
Figura 47 - Parâmetros para o aço introduzidos no LS-Dyna.	44
Figura 48 - Curva de pressão aplicada ao modelo no LS-Dyna.	45
Figura 49 - Deslocamento obtido através da modelação em LS-Dyna.	45
Figura 50 - Comparação de deslocamentos.	46

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros para uma viga simplesmente apoiada submetida a uma carga variável.	20
Tabela 2 - Valores obtidos através da distância escalar para 10g de explosivo PE4-A.	22
Tabela 3 - Valores obtidos através da distância escalar para 20g de explosivo PE4-A.	22
Tabela 4 - Rácios de pressões e impulsos, médias e desvios padrão e massas equivalentes de TNT.....	23
Tabela 5 - Tempos de chegada da onda aos sensores e posição relativa ao sensor com o 1º tempo de chegada.....	24
Tabela 6 - Valores das velocidades médias retiradas das derivadas do deslocamento e da computação pós ângulo	25
Tabela 7 - Valores da pressão refletida de Mach, pressão atmosférica sentida à data do ensaio e a velocidade do som.....	26
Tabela 8 - Valores de deslocamento parcial da onda e do respetivo tempo correlacionado.....	27
Tabela 9 - Valor das pressões de pico obtidas através dos números de Mach obtidos das velocidades retiradas dos gráficos.	29
Tabela 10 - Tempos de chegada e duração da fase positiva por sensor, para o Ensaio 1.....	30
Tabela 11 - Tempos de chegada e duração da fase positiva por sensor, para o Ensaio 2.....	31
Tabela 12 - Tempos de chegada e duração da fase positiva por sensor, para o Ensaio 3.....	31
Tabela 13 - Valor do número de Mach e das respetivas pressões.	32
Tabela 14 - Pressão refletida obtida através da pressão incidente.	33
Tabela 15 - Valores próprios da curva definida pela experiência realizada em [23].	34
Tabela 16 - Valores adaptados para o valor da pressão refletida obtida no ensaio.....	34
Tabela 17 - Valores adaptados para o valor da pressão incidente do ensaio com uma onda característica.	34
Tabela 18 - Características do perfil UNP 80.	39
Tabela 19 - Parâmetros da viga com perfil UNP 80.	39
Tabela 20 - Valores das maiores pressões obtidas no tubo de choque e forças equivalentes....	41
Tabela 21 - Valores de deslocamento máximo.....	41
Tabela 23 - Valores máximos dos deslocamentos.....	46

1 Introdução

1.1 Problema proposto e motivação para o tema

A proteção de infraestruturas é um tema de elevada importância e devido ao desenvolvimento da tecnologia e dos recursos usados nas sociedades atuais, cada vez se observam mais incidentes que culminam numa explosão [1]. Na Figura 1, podem-se analisar os dados relativos ao número de incidentes resultantes de explosões ocorridos nos Estados Unidos da América no período compreendido entre 2012 e 2021. A partir destes dados, é evidente que este tipo de incidentes é frequente, embora o número anual de incidentes tenha vindo a diminuir, registrando-se, em média ao longo dos últimos dez anos, mais de dois incidentes por dia. Com isto é notável a importância de se criar condições para se mitigar os danos que destes incidentes resultam.

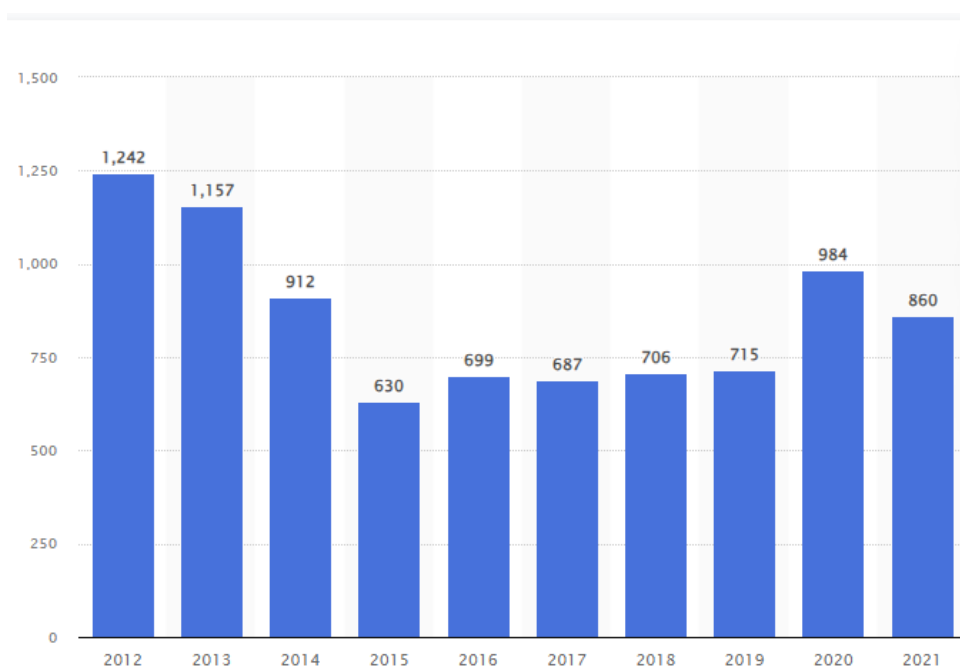


Figura 1 - Número de acidentes com explosões nos Estados Unidos da América desde 2012 a 2021. (Fonte [1]).

Observando esta temática de uma perspetiva diferente e olhando a nível da defesa nacional, em específico para as ameaças terroristas que se observam por todo o mundo, considera-se essencial a preparação de uma infraestrutura para que esta consiga permanecer após um ataque e salvguarde as vidas das pessoas em utilização quando determinadas infraestruturas são alvos de ataques.

Em relação aos valores de 2019, o número de incidentes anual foi de 715 e, tal como se pode observar na Figura 2, a percentagem de explosões intencionais com recurso a explosivos (improvisados ou ordinários) é ligeiramente superior a um terço dos incidentes totais, tendo sido registados 251 incidentes.

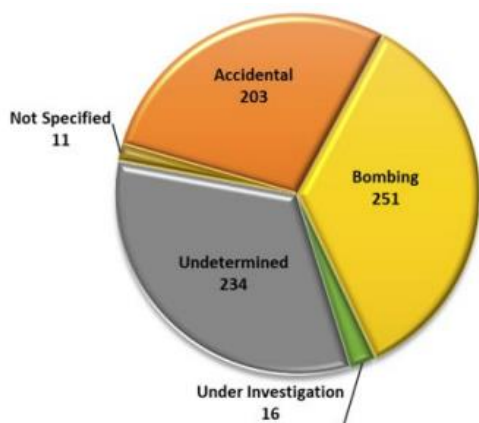


Figura 2 - Tipos de incidentes explosivos nos Estados Unidos da América no ano de 2019 (Fonte [1]).

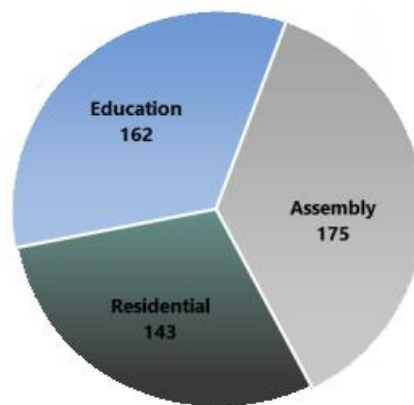


Figura 3 - Principais alvos de Ameaça de Bomba (3 mais comuns) nos Estados Unidos da América no ano de 2019. (Fonte [1]).

Com base na Figura 3, é evidente que os incidentes resultantes de ataques utilizando engenhos explosivos mostram três tipologias de locais com a mais alta probabilidade de ameaça. Nota-se que, ao analisarmos os valores que representam o número de casos efetivamente ocorridos, destacam-se como locais alvo, estabelecimentos de ensino, áreas residenciais e instalações de serviço público, institucionais e governamentais. Os dados ilustrados realçam a importância de salvaguardar as nossas infraestruturas para esta tipologia de ameaça, pois são locais que tradicionalmente não são dimensionados para estas ameaças e, como tal, melhorar o seu comportamento e métodos de fortificação demonstra-se um tópico importante e urgente como alvo de estudo.

Considerando os valores mencionados anteriormente e examinando incidentes em outros países, como o caso de uma explosão ocorrida na Roménia em 23 de agosto de 2023, num depósito de combustível. De acordo com as autoridades, o incêndio teve início num dos tanques, resultando numa explosão que propiciou a propagação do fogo, culminando numa segunda explosão. Os efeitos das explosões nas estruturas circundantes são visíveis na Figura 4 [2]. Na figura referida, destaca-se um notório contraste entre as estruturas de betão e as estruturas metálicas. As estruturas de betão mantêm a sua configuração original e, embora possam exibir danos, não colapsaram. Por outro lado, as estruturas metálicas, além de deformadas, testemunham múltiplos casos de colapso. Por exemplo, todos os pequenos complexos presentes no local, todos compostos por uma estrutura metálica, foram severamente danificados, sendo possível observar perfis metálicos completamente deformados e as estruturas parcial ou totalmente colapsadas.

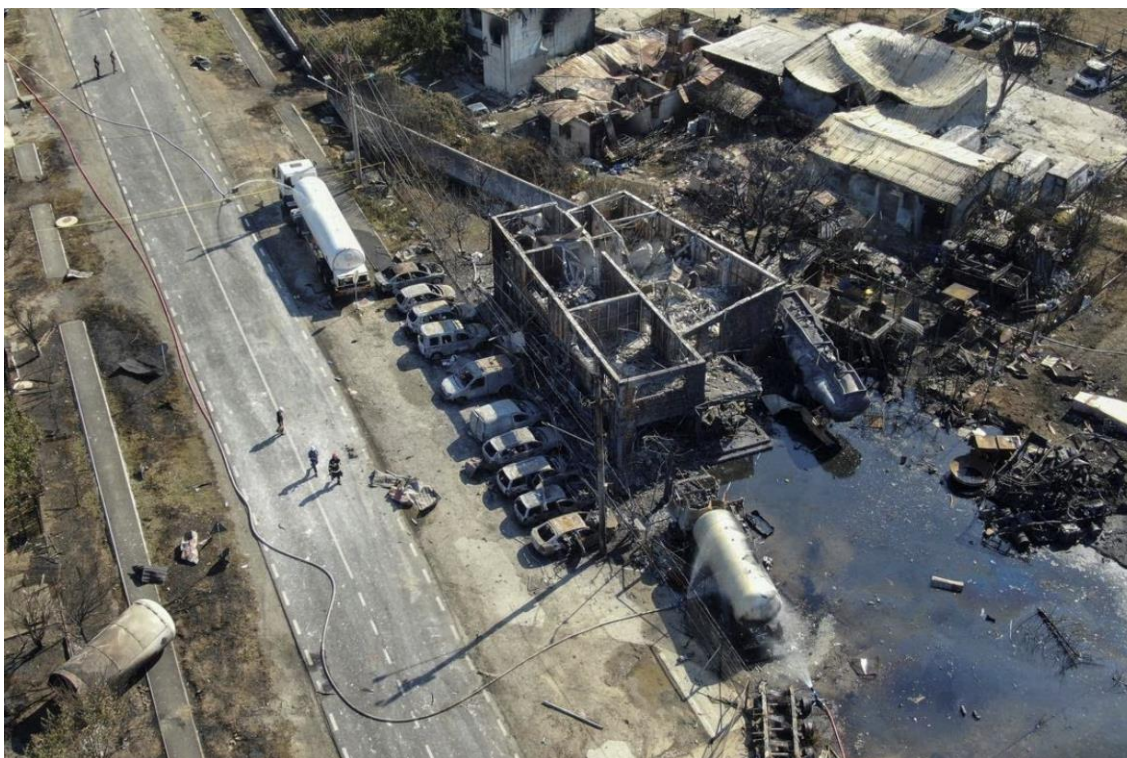


Figura 4 - Visão aérea do local de uma explosão numa estação da GLP em Crevedia, perto de Bucareste, Romênia, 27 de agosto de 2023. (Fonte [2])

Na referência [3], temos um ataque que ocorreu no passado dia 1 de outubro de 2023, na capital da Turquia, à sua sede do governo. O ataque foi realizado por dois indivíduos, sendo que um deles vestia um colete com um explosivo acoplado. Conforme relatado pelas autoridades, nenhum dos agressores sobreviveu ao ataque, com um deles optando por cometer suicídio mediante a detonação do próprio colete.

Na Figura 5, é possível constatar que o ataque ocorreu numa área central da cidade de Ancara. Caso a quantidade de explosivos utilizada fosse maior, os danos teriam sido consideravelmente mais extensos. Além dos dois perpetradores que perderam a vida no ataque, dois policiais ficaram feridos devido às consequências da explosão. Os danos às estruturas, conforme apurado, foram mínimos, em grande parte devido à pronta intervenção de dois membros das forças de segurança.



Figura 5 - Envolvente do edifício alvo na cidade de Ancara.

Este evento demonstra a vulnerabilidade da nossa sociedade face a este tipo de ataques e vem realçar a importância de se dimensionar e reforçar as infraestruturas, que tendo em conta os eventos anteriores, representam órgãos de poder assim como todas as outras também já referidas, pois a capacidade de um ataque destes ser bem-sucedido devido aos meios que emprega é elevada. Como tal, estudar o comportamento de estruturas às ondas de choque provocadas por explosões torna-se relevante para se poder criar medidas de prevenção e segurança para prevenir os colapsos parciais ou totais dessas mesmas estruturas e com isto se conseguir proteger e salvar vidas.

Uma outra referência do Brasil, relata que no passado dia 27 de julho de 2023, um silo de grão explodiu e fez com que mais duas explosões se seguissem em dois silos adjacentes. Como resultado deste incidente com causas por determinar, para além dos três silos parcialmente colapsados, existiram ainda danos em duas estruturas que estavam próximas do local das explosões [4]. Como se pode verificar através da Figura 6, para além das estruturas próximas do local, verifica-se um pórtico metálico que terá sofrido danos devido a este incidente.



Figura 6 - Cooperativa agrícola em Palotina no estado do paraná no Brasil

Com base nos incidentes aqui expostos, é importante ressaltar a diversidade de casos e a magnitude do risco ao qual qualquer tipo de estrutura, seja ela de caráter institucional, residencial ou de outra natureza, está sujeita em caso de explosão. Devido às múltiplas fontes que uma explosão pode ter, é possível que estas ocorram com mais frequência do que aquilo que se esperaria, como evidenciado na primeira análise de situação. As notícias apresentadas têm a finalidade de ilustrar exemplos das diversas causas que podem provocar uma explosão e dos potenciais danos que estas podem induzir. Considerando o elevado risco envolvido, ressalta-se a pertinência e importância de um estudo aprofundado sobre esta temática, que é a prevenção.

1.2 Objetivos e Metodologia

Esta dissertação de mestrado está inserida no projeto CINAMIL "SAERFA - Sistemas de Absorção de Energia com Recurso ao Fabrico Aditivo", encontrando-se enquadrada na tarefa cujo objetivo é consolidar as capacidades do CCPI (Centro de Competências para a Proteção de Infraestruturas), nomeadamente através de métodos alternativos para a obtenção do equivalente TNT do explosivo utilizado (PE4-A) e posterior uso de um tubo de choque para analisar a resposta estrutural de uma viga metálica quando esta é sujeita a uma carga explosiva.

A metodologia proposta para esta dissertação é a seguinte:

- 1) Obtenção da equivalência de TNT para o explosivo utilizado (PE4-A) através de ensaios experimentais, a partir das relações escalares da pressão incidente;

- 2) Obtenção da equivalência de TNT a partir de um método alternativo que consiste na avaliação da velocidade;
- 3) Ampliação das ondas de choque com recurso a um tubo de choque e obtenção das respectivas equivalências para o TNT;
- 4) Verificar qual o efeito dessas ondas ampliadas numa viga metálica e qual o comportamento da mesma, com recurso a métodos analíticos, numéricos e experimentais;
- 5) Por fim, comparação e discussão de resultados obtidos das campanhas experimentais e dos métodos aplicados.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação de mestrado tem quatro capítulos, em que no primeiro se apresenta e explica as motivações da realização desta dissertação assim como a sua organização.

O segundo capítulo apresenta uma revisão da literatura, nomeadamente o conceito de onda de choque e quais os parâmetros que ajudam a caracterizar a mesma, assim como o seu comportamento em meio livre e semi-confinado, e a utilização de tubos de choque para a obtenção de ondas de choque amplificadas em ambiente laboratorial.

No próximo capítulo reporta a campanha experimental conduzida durante a realização do presente estudo e os resultados obtidos de cada um dos cenários criados. É possível encontrar aqui ensaios em ambiente livre, para a equivalência de TNT com duas configurações distintas, ensaios para a obtenção de pressões ampliadas com recurso a um tubo de choque e o ensaio de uma viga metálica sujeita a uma carga explosiva obtida com recurso a um tubo de choque.

No quarto capítulo são apresentadas as propriedades do perfil da viga metálica utilizado e apresentados os métodos de análise analítico e numérico para avaliação do comportamento da viga, e uma comparação entre resultados obtidos.

No último capítulo são apresentadas as conclusões de toda esta dissertação de Mestrado, assim como propostas para se desenvolver em trabalhos futuros.

2 Estado da Arte

2.1 Definição de Explosão

Uma explosão ocorre quando existe uma reação química ou física na matéria, acompanhada pela libertação impulsiva de uma grande quantidade de energia e calor, propiciando a geração de uma onda de choque capaz de provocar danos substanciais em edifícios e no ambiente circundante, incluindo pessoas e bens [5].

Atualmente, existe uma enorme variedade de materiais que podem gerar ou provocar uma explosão, mas os mais comuns são produtos químicos e materiais nucleares devido à sua capacidade para criar reações muito intensas que maximizam os danos, quando misturados corretamente [5].

A libertação súbita de uma grande quantidade de energia, num período muito curto de tempo, é o que caracteriza uma explosão. Após o primeiro momento de uma explosão, o efeito respetivo move-se através do ar, mais rápido que o som, e as partículas respetivas são aceleradas e desaceleradas pela passagem da frente de choque na sua direção, criando pressões relativas positivas e negativas [5].

2.2 Caracterização do explosivo PE4-A

Um dos explosivos mais usados no meio militar é o C4, sendo também um dos mais estudados, assim como o TNT (trinitrotolueno), que são explosivos que contam com uma vasta literatura pois o seu fabrico data há mais de um século, e como tal, já foram bastante estudados em vários ambientes quanto ao nível de comportamento quer ao nível de resultado esperado [6].

No caso do estudo em questão o explosivo usado foi o PETN (PE4A na denominação portuguesa), explosivo cuja composição foi muito usada durante a 1ª e 2ª guerras mundiais. O Pentaeritritol Tetranitrato, conhecido como PETN ou Nitropenta, é um composto cristalino incolor com fórmula empírica $C_5H_8N_4O_{12}$ e peso molecular de 316.1. Destaca-se pela sua estabilidade e potência como explosivo [7].

O PETN possui uma energia de formação de -385.0 kcal/kg (-1610.7 kJ/kg) e uma entalpia de formação de -407.4 kcal/kg (-1704.7 kJ/kg). Com equilíbrio de oxigênio de -10.1% e teor de nitrogênio de 17.72%, gera 780 litros de gases de detonação por quilograma. Além disso, a sua temperatura de fusão é de 141.3 °C (286.3 °F) com entalpia de fusão de 36.4 kcal/kg (152 kJ/kg). Possui uma densidade de 1.76 g/cm³ [7].

O PETN é insolúvel em água, pouco solúvel em álcool, éter e benzeno, mas solúvel em acetona e acetato de metilo. Para a sua produção, pentaeritritol é introduzido em ácido nítrico concentrado com agitação e arrefecimento eficientes. A maior parte do tetranitrato formado cristaliza fora do ácido. Posteriormente, a solução é diluída para cerca de 70% de HNO₃, precipitando o restante do produto. O produto bruto lavado é purificado por uma nova precipitação a partir da acetona [7].

Em termos de especificações, o PETN deve ter um ponto de fusão não inferior a 140 °C (284 °F) e teor de nitrogênio não menor que 17.5%. O teste Bergmann-Junk a 132 °C (267 °F)

deve libertar no máximo 2 ml de NO por grama de explosivo. O ponto de deflagração não deve ser inferior a 190 °C (374 °F). A substância deve conter não mais que 0.1% de matéria insolúvel em acetona, e a acidez, medida como a quantidade de HNO₃, não deve exceder 0.003%. Da mesma forma, a alcalinidade, expressa como Na₂CO₃, não deve ultrapassar 0.003% [7].

O PETN é um dos explosivos mais potentes e brisantes disponíveis. A sua estabilidade é satisfatória e a sua sensibilidade é moderada. É amplamente empregue em cordões de detonação e, quando fleumatizado com uma pequena quantidade de cera e comprimido, pode ser usado para produzir propulsores e enchimentos para projéteis de menor calibre. Além disso, o PETN pode ser incorporado em explosivos industriais gelatinosos, por exemplo, para aplicações em prospeção sísmica [7].

2.3 Caracterização de uma onda de choque

Para caracterizar uma onda de choque, temos de primeiro de definir o que é uma onda de choque. Segundo a literatura, uma onda de choque é definida por um aumento súbito e pronunciado na pressão, temperatura e densidade propagando-se através de um meio a velocidades superiores à velocidade local do som, criando uma descontinuidade de pressão conhecida como "frente de choque". As ondas de choque surgem a partir da libertação rápida de energia num espaço confinado, semi-confinado ou ventilado, este fenómeno pode ser observado em eventos como explosões e aeronaves supersónicas [5], [8]. A Figura 7 ilustra o comportamento das ondas de choque nas várias tipologias de espaço mencionadas.

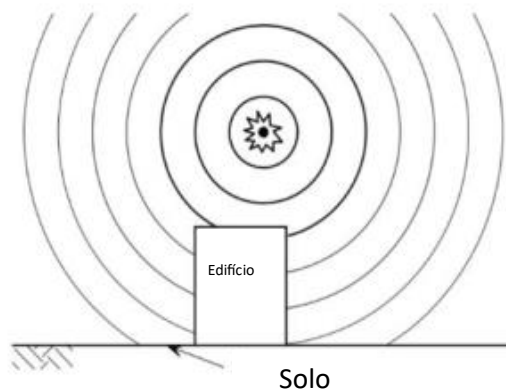


Figura 7 - Explosão em ambiente aberto (Adaptado de [14])

As ondas de choque em ambiente aberto, como se pode verificar na Figura 8, irradiam-se em todas as direções a partir da fonte formando um padrão esférico [9]. Por outro lado, quando encontram um obstáculo, elas podem sofrer reflexões, refração ou difração, influenciando seu comportamento. Para além de obstáculos, as ondas ainda se comportam de maneira diferente consoante o meio em que se encontram, exibindo assim características distintas de propagação no ar, água ou materiais sólidos [5], [8].



Figura 8 - Explosões Confinadas (Adaptado de [14])

Conforme a onda de choque se expande a partir do centro de detonação, a sua sobrepressão de pico decresce gradualmente com o aumento da distância. Paralelamente, a detonação da carga explosiva provoca uma expansão excessiva, resultando num pico de pressão seguido de uma queda exponencial de pressão. Este declínio desencadeia um efeito de sucção, conhecido como fase negativa, que força as moléculas de ar a deslocarem-se em direção ao epicentro da explosão até que a pressão atmosférica seja novamente restabelecida, este fenómeno pode ser observado na Figura 9 [5], [8].

Na Figura 9, podemos observar que antes da onda de choque chegar ao ponto de interesse, a pressão está no seu nível normal, ou seja, à pressão ambiente do meio em que nos encontramos (P_0). Verifica-se que, no momento de chegada da onda de choque, a pressão sofre um aumento consoante a energia que a onda transporta, esta variação é representada por, P_{s+} , e este aumento fica assinalado como o tempo inicial (t_a), ou tempo de chegada da onda, de seguida verifica-se um decaimento de pressão com a duração de, T_+ , tempo conhecido, como já referido, como a duração da fase positiva. Depois desta fase, dá-se início à fase negativa, com duração de, T_- . A integração da função $P(t)$, entre t_a e T_+ , determina o valor do impulso da fase positiva [5], [8] [10].

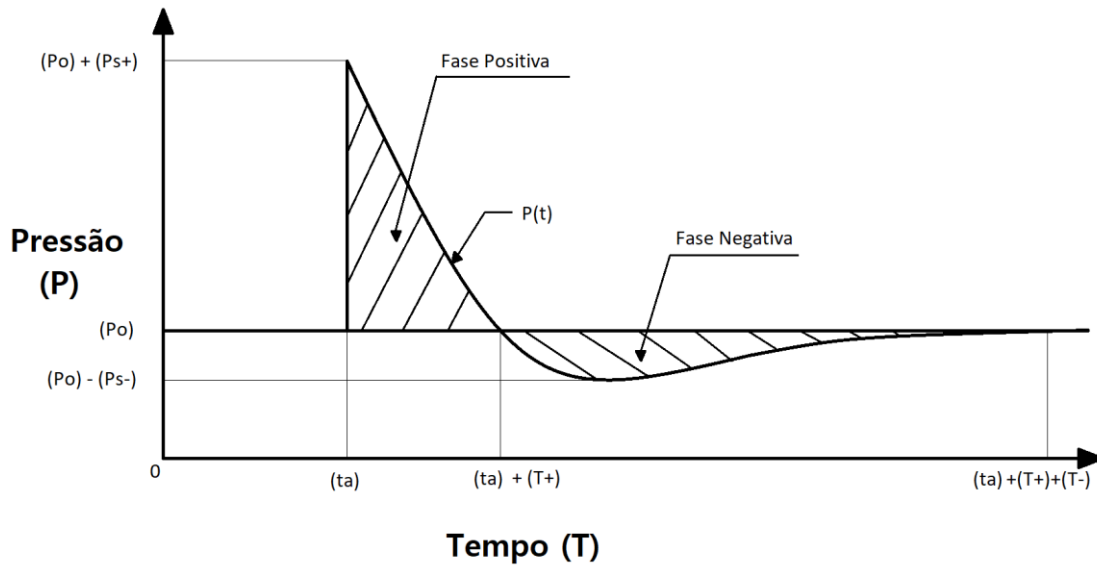


Figura 9 - Variação da Pressão ao longo do tempo.

A função que melhor descreve o comportamento da pressão ao longo da fase positiva é a equação modificada de Friedlander [5]:

$$P(t) = P_0 + P_{s0} * \left(1 - \frac{t}{t_0^+}\right) * e^{-\frac{b*t}{t_0^+}} \quad (2.1)$$

Esta equação fornece um modelo dinâmico que abrange a complexa evolução da pressão após uma explosão. Vamos analisar os elementos que a compõem em detalhe [5], [8], [9]:

- $P(t)$ denota a pressão em um momento específico “t” após o início da detonação da carga explosiva. Reflete a pressão exercida pela onda de choque no ambiente circundante;
- P_0 significa a pressão inicial, muitas vezes representando as condições atmosféricas antes da explosão. Estabelece a linha de base contra a qual as variações posteriores de pressão são medidas;
- P_{s0} representa a sobrepressão de pico, definindo a pressão mais alta alcançada durante a fase positiva. Este parâmetro serve como um indicador crítico do impacto imediato da força explosiva;
- t_0^+ caracteriza a duração da fase positiva;
- b é uma constante que influencia a taxa com que a pressão diminui durante a fase positiva. Um valor maior de b indica uma queda de pressão mais rápida, enquanto um valor menor indica uma queda mais gradual [8], [9].

Uma vez que P_0 representa a pressão atmosférica, se modificarmos a nossa referência no sentido em que passamos a contabilizar este parâmetro como zero, ou seja, considerarmos

pressões relativas, e todos os valores de $P(t)$ como um acréscimo à pressão já existente, podemos simplificar a equação [5]:

$$P(t) = P_{s0} * \left(1 - \frac{t}{t_{0+}}\right) * e^{-\frac{b*t}{t_{0+}}} \quad (2.2)$$

Para efeitos práticos de acessão ao dano causado nas estruturas, o cálculo dos impulsos é efetuado apenas para a fase positiva, que como já referido, é obtido através do cálculo da área da equação modificada de Friedlander para o intervalo de tempo correspondente, através da seguinte expressão [5], [8]:

$$i_s = \int_0^{t_{0+}} P_s(t) dt = \frac{P_{s0} * t_{0+}}{b} * \left[1 - \left(\frac{1 - e^{-b}}{b}\right)\right] \quad (2.3)$$

2.4 Regras de relação escalar

A possibilidade de aplicar vários estudos experimentais, de modo a colmatar a necessidade de realizar extensivas campanhas experimentais devido ao seu elevado custo e trabalho demorado da correlação dos vários ensaios, assim como da caracterização da onda de choque de cada cenário, vários investigadores têm definido regras para relacionar os parâmetros da onda de choque resultantes de diversos cenários de explosão [5], [8], [10].

A regra mais conhecida para esta relação de escala, foi formulada por Hopkinson [11] e por Cranz [12], sendo referida como a regra de escala de Hopkinson-Cranz, ou “*cube root*”. Esta regra faz a relação entre dois explosivos diferentes, detonados no mesmo ambiente, com geometria semelhante e tamanho diferente, de modo a que a onda de choque seja similar, mas produzida a uma distância escalada. Ou seja, um determinado explosivo de massa W , produz uma certa onda de choque com intensidade P_{s0} , a uma distância R e, para um explosivo de massa k^3W , a uma distância kR , a sobrepressão de pico será igual. Na Figura 10 encontra-se representado um esquema desta regra para se perceber melhor a relação. Esta regra traduz-se na equação 2.4, que é fundada numa análise dimensional e tem como referência as condições atmosféricas ao nível médio das águas do mar [8], [10].

$$Z = \frac{R}{W_E^{1/3}} \quad (2.4)$$

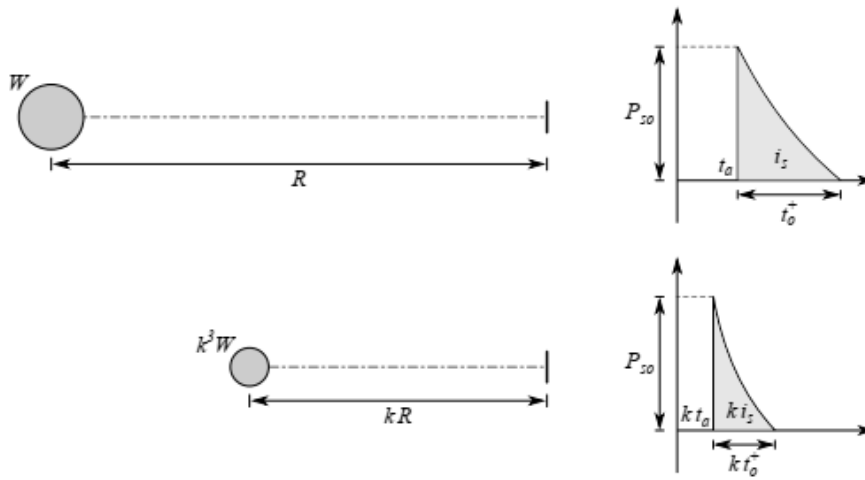


Figura 10 - Regra de escala de Hopkinson - Cranz (Adaptado de [10])

Sendo, neste contexto, Z a distância reduzida, R a distância onde se pretende medir a intensidade da onda de choque e W a massa de explosivo utilizado. Verifica-se assim que todos os parâmetros, à exceção da sobrepressão de pico, são tipicamente apresentados escalados pelo raiz cúbica da massa de explosivo utilizada.

Todos os parâmetros apresentados no ponto anterior podem ser obtidos através da utilização do gráfico presente na Tabela 4, sendo que o único valor necessário para a obtenção de todos os parâmetros é a distância reduzida (Z) [13].

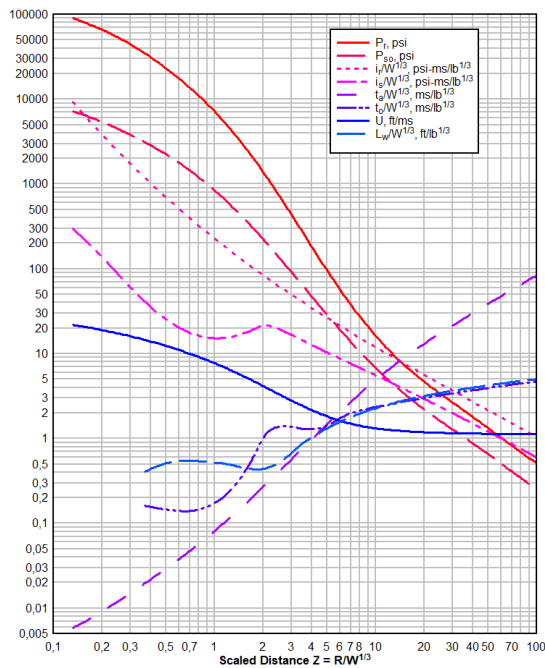


Figura 11 - Parâmetros da fase positiva de uma onda de choque para uma explosão esférica de TNT em meio livre ao nível da água do mar (Adaptado de [13])

2.5 Pressão Refletida

Após uma explosão, a onda de choque poderá interagir com objetos ou superfícies sólidas de densidade superior, resultando na sua reflexão e, em alguns casos, difração, dependendo da geometria e tamanho da superfície. Este processo, em torno de obstáculos de várias origens e características, pode criar condições de carga complexas e, por vezes, amplificar as ondas de choque, gerando efeitos de maior magnitude. A reflexão pode ocorrer de três maneiras distintas [5], [8], [10], [14]:

- Reflexão Normal: Onde a onda de choque encontra uma superfície frontal de forma direta, sendo refletida de volta na mesma direção;
- Reflexão Regular: Onde a onda de choque encontra uma superfície plana ou com geometria regular e é refletida de acordo com as leis de reflexão;
- Reflexão de Mach: Ocorre em situações de alta velocidade, gerando uma reflexão mais complexa devido às características supersônicas do evento;

Quando a onda de choque incidente atinge uma estrutura ou o solo, como por exemplo uma interação ilustrada na Figura 12, comumente modelados como superfícies rígidas e infinitas, ela sofre uma reflexão e conseqüente amplificação dos seus parâmetros. A sobrepressão da onda de choque resultante, "Pr", é mais intensa do que sua contraparte incidente, "Pso", resultando num impulso refletido "ir" superior. Contudo, é importante realçar que as durações das fases positiva e negativa permanecem inalteradas [8], [10].



Figura 12 - Tipos de pressão atuantes numa estrutura

A Figura 13 ilustra essa relação entre picos de pressão refletido e incidente, assim como as durações das fases positivas e negativas. A área mais escura do gráfico na Figura 13 é a representação do tipo de pressões incidentes enquanto a área mais clara representa um tipo de pressão refletida, uma vez que este gráfico não representa nenhuma interessam em particular, mas sim a relação típica que existe entre estas ondas de pressão.

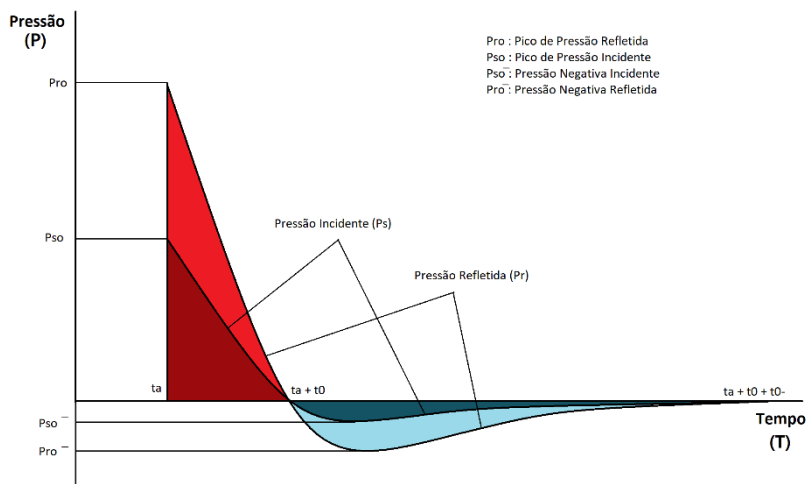


Figura 13 - Pressão Refletida e Pressão incidente

Para ângulos de incidência da onda de choque entre 0° e 40° , há a possibilidade de a pressão incidente e a refletida se intercetarem no plano refletor, num ponto chamado de ângulo crítico (denominado $\alpha_{i,crit}$). Este encontro resulta num incremento superior da pressão, conhecido como onda de Mach ou onda ressonante. A formação desta onda é fundamentada na premissa de que a onda refletida não pode ultrapassar a onda incidente, levando à sobreposição das duas frentes e, conseqüentemente, à geração da onda de Mach. A altura desta onda planar aumenta com a propagação, como se pode perceber pelo esquema apresentado na Figura 14, onde estão esquematizados os ângulos, as pressões que atuam e em que fase tendo em conta as reflexões da onda [5], [8], [14], [15].

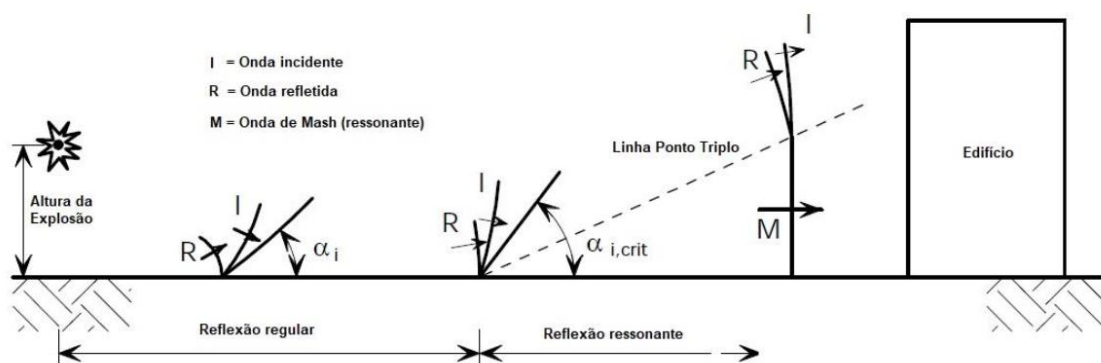


Figura 14 - Desenvolvimento de uma onda de choque até à fase planar (Adaptado de [15])

O local onde as ondas incidentes, refletida e ressonante se encontram é denominado ponto triplo. A altura deste ponto de interseção é crucial, pois abaixo dele a onda de propagação assume um caráter planar, o que facilita o cálculo simplificado das pressões exercidas em uma estrutura, como se pode verificar na Figura 14 [5], [8], [14], [15].

2.6 Comportamento de uma onda de choque ao longo de tubos de choque

Com base na pesquisa de Vegard Aune e colaboradores [16], o comportamento das ondas dentro de um tubo de choque pode ser entendido através de um sistema impulsionado por gás comprimido com uma configuração de extremidade fechada. Quando o diafragma é rompido, inicia-se uma onda de choque que se desloca para a região de baixa pressão (denominada região 1, na Figura 15). Essa onda de choque induz um aumento repentino na pressão, temperatura e densidade do gás impulsionado. O gás de alta pressão age como um pistão, expandindo-se na câmara de baixa pressão, resultando numa onda de choque que se move a uma velocidade maior do que a velocidade do som do gás impulsionado não perturbado, resultando numa aceleração quase instantânea do gás impulsionado.[16]

Conforme a onda de choque se propaga, um conjunto de ondas rarefativas desenvolve-se no gás de alta pressão em expansão. Estas ondas rarefativas, denominadas 'E' no estudo [16], sofrem uma reflexão no final da secção de ativação e, dependendo do comprimento desta secção, essas ondas rarefativas refletidas podem alcançar a onda de choque inicial antes de atingir o objeto de teste. Essa interação leva a uma diminuição na força, um aumento na duração e uma redução na velocidade da onda de choque. Esse comportamento das ondas dentro do tubo de choque permite a geração controlada de condições de carga de explosão em ambiente de laboratório [16], [17].

No caso do trabalho de Nicholas Noel Kleinschmit e colaboradores [18], o foco desloca-se para um tubo de choque impulsionado por explosivos. Aqui, o comportamento da onda é iniciado pela rápida libertação de energia da carga explosiva. Isso leva à geração de uma onda de choque que se desloca para a região de baixa pressão de forma semelhante ao sistema impulsionado por gás comprimido. No entanto, a libertação de energia da carga explosiva confere um carácter mais dinâmico e vigoroso às ondas geradas. Esta abordagem oferece um meio controlado para simular os efeitos da carga de explosão de uma forma mais realista quando comparado com cenários explosivos reais. O comportamento da onda dentro do tubo de choque, como observado na investigação de Kleinschmit [18], é crucial para estudar as interações entre a onda de choque e as estruturas, fornecendo conhecimentos essenciais para a proteção contra explosões e a resistência estrutural.

O emprego de tubos de choque no estudo de ondas de choque é uma prática comum na investigação de aerodinâmica em altas velocidades. É importante destacar que uma onda de choque apresenta características ligeiramente distintas quando gerada num ambiente controlado, como o interior de um tubo de choque, em comparação com a ocorrida em um teste com explosivo ao ar livre. Neste caso, a dinâmica da onda não é descrita pela equação de Friedlander, uma vez que o comportamento da onda é influenciado pela reflexão de Mach em um meio livre [18], [19].

O estudo conduzido por Ousji e colaboradores [20], focado na utilização de um tubo de choque para gerar cargas explosivas, realça a capacidade do dispositivo em replicar condições controladas de explosão em ambiente laboratorial. No entanto, é imperativo notar que, apesar dos conhecimentos valiosos proporcionados pelos tubos de choque, eles podem introduzir

amplificações artificiais nos efeitos das ondas de choque sobre as estruturas. Esse fenômeno está intrinsicamente ligado ao *end-jet* dos gases, uma característica inerente aos tubos de choque, que pode influenciar a morfologia e a intensidade das ondas de choque produzidas. Esta consideração sublinha a importância de interpretar os resultados com uma compreensão abrangente das limitações do método [19]. O fenômeno do *end-jet* é claramente demonstrado na Figura 16, em que demonstra o comportamento dos gases à saída do tubo de choque.

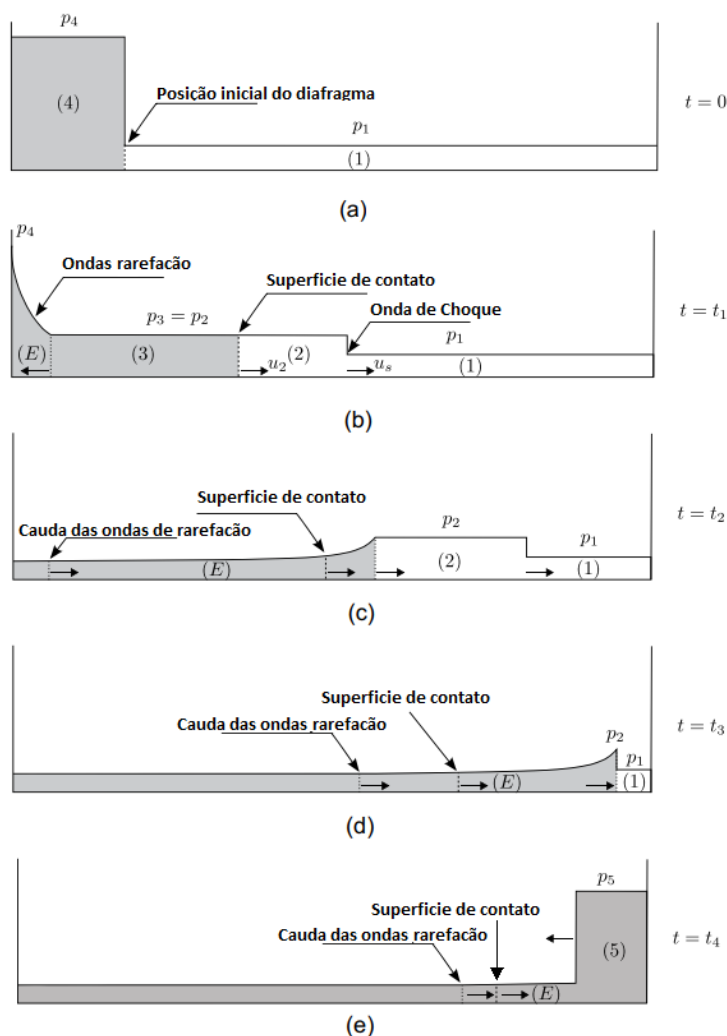


Figura 15 - Representação esquemática dos eventos ocorrendo em um tubo de choque para aplicações de explosão e as correspondentes distribuições de pressão ao longo do eixo longitudinal do tubo em momentos característicos: (a) configuração inicial, (b) padrão da o imediatamente após a ruptura do diafragma, (c) ondas de rarefação refletidas alcançam a superfície de contato, (d) ondas de rarefação refletidas alcançam a onda de choque e (e) reflexão da onda de choque entrante. (Adaptado de [16])

Ademais, o estudo realizado por Kleinschmit [18] e outro estudo realizado por Needham e colaboradores [19] também exploram a aplicação de um tubo de choque para avaliar os efeitos das ondas de choque em estruturas. Eles evidenciam a utilidade do dispositivo na simulação de cargas explosivas, proporcionando uma plataforma controlada e replicável. Entretanto, é crucial reconhecer que os resultados obtidos em um tubo de choque podem ser afetados pelo fenômeno do *end-jet*. Isto implica que os efeitos observados podem ser amplificados em comparação com

condições de explosão reais, e essa variável deve ser levada em consideração na interpretação dos dados.

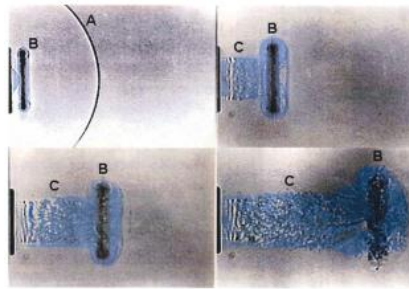


Figura 16 - Efeito de End-Jet (Adaptado de [19])

O estudo de Courtney e colaboradores [21] oferece uma análise adicional sobre o uso de tubos de choque para gerar cargas de explosão. Os autores enfatizam a importância de compreender as interações entre as ondas de choque e as estruturas afetadas. Ao empregar técnicas avançadas de medição, como a velocimetria por imagem de partículas (PIV), os autores estudaram de forma detalhada as respostas dinâmicas das estruturas submetidas a ondas de choque. Isso proporciona uma compreensão valiosa do comportamento dos materiais e objetos sob condições extremas.

2.7 Resposta estrutural

A chegada de uma onda aérea à superfície de um edifício desencadeia uma série de interações complexas, influenciadas pelos diferentes tipos de pressão (incidente, refletida e dinâmica), pelas características dimensionais, orientação e formato dos elementos estruturais expostos à onda de choque, assim como pela proximidade e posicionamento de outros obstáculos que podem provocar fenômenos de reflexão. Na Figura 17 está esquematizado o comportamento da onda e da grandeza das pressões à medida que nos afastamos do epicentro da explosão. Essas interações dão origem a dois cenários distintos de resposta. Um deles ocorre em situações de detonação de cargas de grande magnitude a distâncias relativamente distantes da estrutura sob análise, o que é característico de incidentes industriais. O segundo cenário, envolve a detonação de cargas de menor magnitude a curtas distâncias, sendo esta a situação predominante em ataques terroristas, como explosões de carros-bomba e outros dispositivos explosivos improvisados (DEIs) [5], [8], [15], [22].

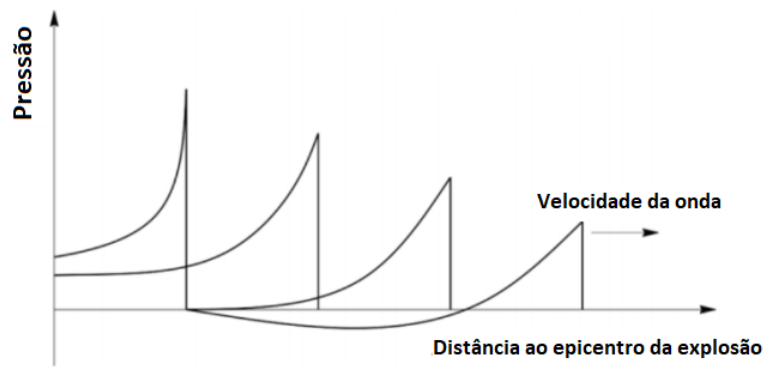


Figura 17 - Variação da pressão da onda com a variação da distância (Adaptado de [8])

Quando uma estrutura retangular é exposta a uma explosão, ela é sujeita a pressões em todas as suas superfícies. Devido ao tamanho finito do edifício, ele está sujeito a um sistema complexo de pressões ao longo do tempo. O efeito da onda de choque num edifício está intimamente relacionado a fatores como a magnitude da explosão e a sua localização. Além disso, a configuração geométrica do ambiente circundante desempenha um papel significativo na formação do impacto da onda de choque. A distância da explosão ao nível do solo, seja acima, ao nível do solo ou até mesmo subterrânea, é também um determinante crítico do comportamento da onda de choque e de suas consequências para a estrutura [5], [8], [14], [22].

Conforme mencionado, observa-se que a onda de choque experimenta uma redução, tanto na sobrepressão como na velocidade à medida que se afasta do centro da detonação. Ao considerar um edifício de formato retangular com dimensões finitas e apenas um lado exposto à frente de choque, o fenômeno das sobrepressões em todas as quatro faces do edifício torna-se muito mais complexo do que os procedimentos descritos anteriormente. Os valores de sobrepressão sentidos por cada face do edifício estão intrinsecamente ligados a fatores como a sobrepressão de pico refletida, a sobrepressão de pico incidente, a pressão dinâmica, bem como as dimensões (tanto comprimento como a altura) do edifício, na Figura 18 encontra-se este cenário ilustrado para facilitar a percepção do comportamento da onda de choque [8], [14], [22].

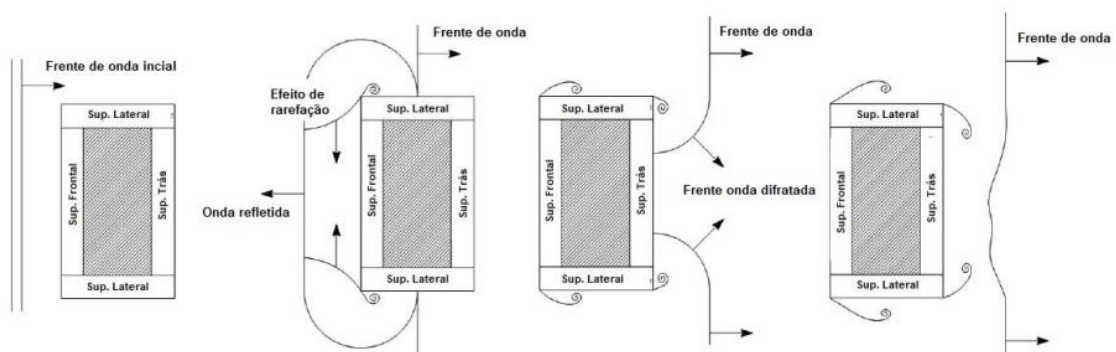


Figura 18 - Interação da onda de choque com um Edifício (Adaptado de [14])

A resposta de um elemento estrutural à carga explosiva é influenciada por diversos fatores, mas um fator de extrema importância é o seu período natural de vibração, representado por T_n , e a sua relação com a duração da fase positiva da sobrepressão, t_0 . Quando o valor de “ t_0 ” é substancialmente superior a “ T_n ”, estamos perante uma carga quasi-estática. Nesse contexto, a deformação dos elementos estruturais ocorre à medida que a carga é aplicada. Por outro lado, se o valor de “ t_0 ” é significativamente menor que “ T_n ”, entramos no regime impulsivo, onde a pressão é aplicada num intervalo de tempo muito curto e a estrutura não tem tempo para se deformar durante a aplicação da mesma. Por fim, quando os valores de “ t_0 ” e “ T_n ” são semelhantes, observamos uma resposta dinâmica da estrutura. Nesse caso, verifica-se uma interação entre as deformações e a carga aplicada. Um exemplo é a reação de um edifício diante de uma carga sísmica [22].

Como a carga que será aplicada na viga, não é uma carga estática, mas sim um impulso, ou seja, o tempo que a carga estará a atuar na viga não será superior a 5 ms [23], uma vez que este é um tempo de referência para a duração da fase positiva. O cálculo da resistência à carga produzida por uma explosão foi abordado por Biggs [24], e a abordagem para a análise da viga consiste em considerar uma análise com um grau de liberdade (GDL).

O método analítico SDOF tem por base o conceito de que uma estrutura pode ser representada de forma simplificada por um único grau de liberdade, focando a dinâmica predominante que governa o seu comportamento. Essa abordagem considera os principais elementos inerciais e elásticos da estrutura, nomeadamente a massa e a rigidez, respetivamente. A massa está associada à capacidade da estrutura de resistir a mudanças na sua condição de movimento, enquanto a rigidez reflete a sua capacidade de suportar deformações. Estes parâmetros, quando devidamente quantificados, proporcionam uma descrição precisa das características dinâmicas da estrutura [24].

Adicionalmente, a análise SDOF incorpora a consideração da resposta da estrutura a uma força aplicada em função do tempo. Esta função, que descreve a variação da força ao longo do tempo, é crucial para a análise dinâmica, pois influencia diretamente a resposta da estrutura à carga. A interação entre a força aplicada e a resposta da estrutura é avaliada através do deslocamento em resposta à força exercida em função do tempo. Esta variável desempenha um papel crucial na determinação do comportamento da estrutura em condições dinâmicas [24].

Para avaliar um SDOF precisamos recorrer à segunda lei de Newton como a base do conceito e relação entre massas, forças e acelerações. Esta lei da física pode ser revista de seguida:

$$\sum \vec{F} = m * \vec{a} \quad (2.6)$$

Quando confrontamos a segunda lei de Newton com um sistema composto por um corpo de massa indeformável, com uma mola e um amortecedor acoplados em que nesse mesmo corpo se faz atuar uma força ao longo do tempo, ficamos com o sistema apresentado na Figura 19 [24].

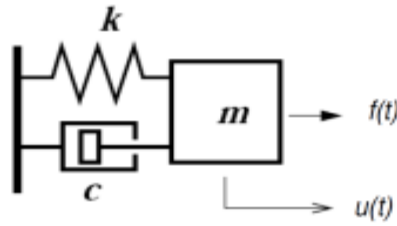


Figura 19 - Sistema com um grau de liberdade.

Deste sistema resulta a seguinte equação do movimento [24]:

$$m * \ddot{u}(t) + c * \dot{u}(t) + k * u(t) = f(t) \quad (2.7)$$

Com isto, a Figura 20 apresenta um sistema com um grau-de-liberdade, com uma simplificação, que se traduz num sistema sem amortecimento e como tal apenas tem presente uma mola, ou seja, as variações da velocidade não são influenciadas.

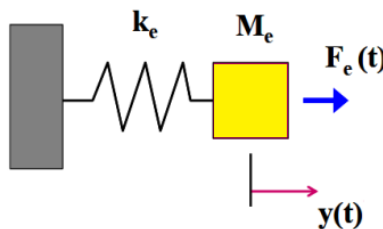


Figura 20 - Sistema com um grau de liberdade (Adaptado de [24]).

As variáveis presentes na Figura 20 representam [24]:

- k_e , a rigidez da mola;
- M_e , a massa do corpo que sofre o deslocamento;
- $F_e(t)$, a força exercida em função do tempo;
- $y(t)$, o deslocamento em resposta à força exercida em função do tempo.

Segundo Biggs [24], as adaptações deste método a uma viga simplesmente apoiada com uma carga aplicada a meio vão da viga, resulta que com a avaliação dos termos apresentados na Tabela 1 conseguimos obter os valores máximos do deslocamento a meio vão e o valor das cargas aplicadas. Os fatores apresentados na tabela são utilizados, em conjunto com a rigidez e massa do elemento estrutural e a resistência máxima do elemento de apoio (R_m), para determinar as propriedades do sistema de um grau de liberdade equivalente e obter o deslocamento do elemento estrutural recorrendo ao sistema equivalente.

Tabela 1 - Parâmetros para uma viga simplesmente apoiada submetida a uma carga variável. (Adaptado de [24])

Diagrama de carga	Grau de bloqueio	Fator de carga, K_L	Fator de Massa Uniforme, k_M	Resistência Máxima, R_m	Rigidez da mola, k
	Elástico	1.0	0.49	$\frac{4 * M_{Rd,El}}{L}$	$\frac{48 * E * IZ}{L^3}$

3 Campanha experimental

Para a concretização da metodologia proposta e para a obtenção dos valores necessários à sua conclusão foram realizadas quatro campanhas experimentais. Na primeira campanha o objetivo foi obter as equivalências de TNT para o explosivo usado, que nestas campanhas foi o PE4-A. Estas equivalências foram obtidas através das sobrepressões de pico incidentes e dos impulsos, e com isto verificar qual a precisão obtida e se a repetibilidade dos ensaios se traduz em resultados coerentes.

Na segunda campanha experimental, o objetivo foi encontrar as equivalências de TNT para o mesmo explosivo, mas observando e estudando grandezas diferentes, que neste caso foi através da avaliação da velocidade de propagação da onda.

Na terceira campanha experimental, o objetivo foi de obter a velocidade da onda de choque e, posteriormente, determinar a pressão refletida recorrendo às velocidades obtidas experimentalmente.

Para a quarta, e última, campanha experimental, o objetivo foi de avaliar os deslocamentos provocados numa viga metálica pelas forças resultantes das pressões obtidas através do tubo de choque.

3.1 Ensaio experimental 1

Este primeiro estudo de caso, tem como objetivo verificar a repetibilidade/precisão na determinação do equivalente TNT com recurso à sobrepressão de pico e impulso. Para a realização deste ensaio foram colocados dois suportes, nos quais foram fixos sensores de pressão [25] a 0,8 m do solo. A massa de explosivo usado foi de 10 e 20 g, uma vez que o objetivo destes estudos de caso realizados é de conseguir realizar ensaios experimentais em ambiente controlado. Foram realizados 4 ensaios recorrendo a cada carga de explosivo considerada, resultando num total de 16 curvas pressão-tempo.

Como cada explosivo tem características próprias quanto à sua detonação, quer seja de densidade ou velocidade de detonação relacionadas diretamente com a energia libertada, e como referido nos capítulos anteriores, um dos explosivos em que a literatura é mais abrangente em relação a casos de estudo é o TNT. Consequentemente, foi inicialmente considerada uma equivalência entre o PE4A e o TNT, que de acordo com a literatura toma um valor de 1.28, ou seja, 1kg de PE4A seria equivalente a 1.28 kg de TNT [26].

Para proceder à montagem da configuração demonstrada na Figura 21, foi necessário avaliar a intensidade das pressões que segundo a regra escalar, ou seja, pela relação da massa e da distância, seria expectável obter. Os valores obtidos segundo a distância reduzida (Z), podem ser consultados nas Tabela 2 e Tabela 3.



Figura 21 - Configuração do ensaio experimental n°1.

Tabela 2 - Valores obtidos através da distância escalar para 10g de explosivo PE4-A.

PE4A (g)	TNT	Distancia (m)	TNT(lbs)	Dist(ft)	Z	Pso[kPa]	Is (kPa.s)
10	12.8	0.2	0.028219	0.656168	2.155263	1318.869	0.044901
		0.4		1.312336	4.310526	276.9302	0.024883
		0.6		1.968504	6.465789	113.1295	0.017272
		0.8		2.624672	8.621053	62.77501	0.013402
		1		3.28084	10.77632	41.20777	0.010967
		1.5		4.92126	16.16447	20.91989	0.007536
		1.4		4.593176	15.08684	23.29907	0.008039
		1.6		5.249344	17.24211	18.96322	0.007091
		1.8		5.905512	19.39737	15.94666	0.006344
		2		6.56168	21.55263	13.7358	0.00574
		2.2		7.217848	23.70789	12.04881	0.005242
		2.4		7.874016	25.86316	10.71798	0.004823
		2.6		8.530184	28.01842	9.639824	0.004466

Tabela 3 - Valores obtidos através da distância escalar para 20g de explosivo PE4-A.

PE4A (g)	TNT	Distancia (m)	TNT(lbs)	Dist(ft)	Z	Pso[kPa]	Is (kPa.s)
20	25.6	0.2	0.056438	0.656168	1.710633	2145.916	0.050095
		0.4		1.312336	3.421267	468.7518	0.039049
		0.6		1.968504	5.1319	187.1404	0.026719
		0.8		2.624672	6.842534	100.3744	0.020704
		1		3.28084	8.553167	63.75484	0.017004
		1.5		4.92126	12.82975	30.37145	0.011777
		1.75		5.74147	14.96804	23.59148	0.010204
		1.6		5.249344	13.68507	27.27171	0.011093
		1.8		5.905512	15.3957	22.56615	0.009938
		2		6.56168	17.10633	19.1891	0.009002
		2.2		7.217848	18.81697	16.66354	0.008227
		2.4		7.874016	20.5276	14.70879	0.007575
		2.6		8.530184	22.23824	13.15207	0.00702
		2.8		9.186352	23.94887	11.88447	0.006541

Analisando os valores apresentados na Tabela 3, verifica-se que, por forma a obter corretamente a sobrepressão de pico, é necessário colocar o sensor de pressão a uma distância superior a 0.2 m devido ao intervalo de medição do mesmo [25]. Assim sendo, os sensores foram colocados a uma distância de aproximadamente 0.5 e 0.6 m do centro de detonação.

Para a obtenção destes valores foram determinados os raios entre pressões e impulsos, entre o explosivo PE4-A e o TNT, foi possível obter as massas equivalentes de TNT para as respectivas pressões e impulsos, na Tabela 4 pode se verificar o desvio padrão dos fatores de equivalência em percentagem da média.

Tabela 4 - Rádios de pressões e impulsos, médias e desvios padrão e massas equivalentes de TNT.

	Ratio Pso	Ratio is
% Média	14.48%	7.09%

3.2 Ensaio experimental 2

O objetivo do segundo ensaio experimental é determinar o equivalente TNT do explosivo utilizado com base na velocidade de propagação da onda de choque. Para o efeito, foi usado um conjunto de sensores de pressão [26], [27], [28], sendo que estes foram colocados num suporte impresso numa impressora 3D, como se pode verificar na Figura 22. Adicionalmente, foi usada uma câmara de alta velocidade como meio alternativo de medição da velocidade da onda de choque e se conseguiu, comparar a velocidade obtida através de ambos os métodos de medição. Foram realizados três ensaios experimentais recorrendo a uma massa de explosivo de 20 g (PE4-A).



Figura 22 - Suporte dos sensores de pressão, impresso em 3D. Espaçamento entre orifícios é de 13 milímetros (de centro a centro).

Para a manipulação dos dados obtidos através dos sensores foi usado o software TMMatLab, sendo relevante determinar o tempo de chegada da onda de choque observado em cada sensor do conjunto. Com o design do suporte para os sensores [27] e [28] elaborado numa impressora 3D sabe-se que a distância entre sensores é de 13 mm e, como tal, com os tempos de chegada, é possível realizar uma equação em função do tempo da distância entre os sensores e com a derivada dessa função temos a velocidade média da onda ao longo dos sensores, para este efeito foi considerado que a onda não sofre qualquer tipo de desaceleração neste curto espaço de tempo e espaço. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos em termos de tempo de chegada da onda a cada uns sensores sendo que o 0 representa o momento em que se deu a explosão, e da distância acumulada entre o ponto médio dos sensores.

Tabela 5 - Tempos de chegada da onda aos sensores e posição relativa ao sensor com o 1º tempo de chegada.

Tempo(m)	Ensaio1	Ensaio2	Ensaio3	Posição(mm)
sensor1	0.003775	0.00239	0.002443	0
sensor2	0.003799	0.002414	0.002468	13
sensor3	0.003824	0.002438	0.002493	26
sensor4	0.003849	0.002463	0.002517	39

Na Tabela 5, pode se verificar que existem apenas valores para quatro sensores, isto deve se a erros que ocorreram com a leitura do sensor nos respectivos ensaios, como tal esses valores foram desprezados para o estudo em questão. Nos gráficos seguintes podem-se consultar as retas produzidas pelos valores da Tabela 5, que como já referido representam a equação de deslocamento da onda ao longo dos sensores.

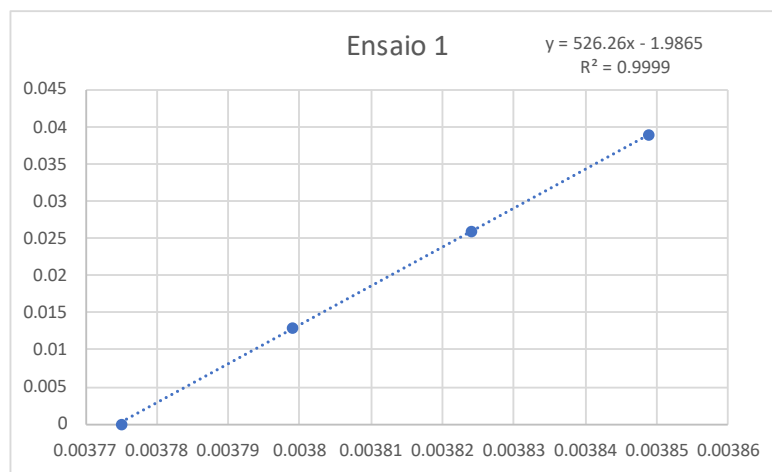


Figura 23 - Gráfico do 1º Ensaio com um valor de 656,43 m/s de velocidade média. Massa de explosivo PE4-A 20,3 g.

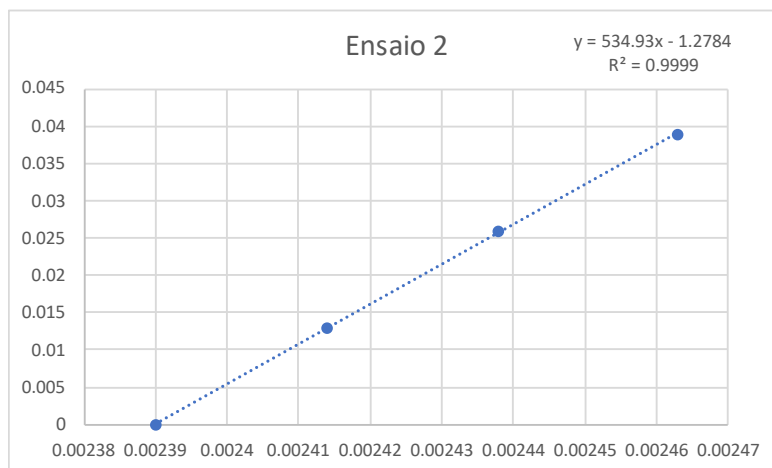


Figura 24 - Gráfico do 2º Ensaio com um valor de 553,11 m/s de velocidade média. Massa de explosivo PE4-A 19,8 g.

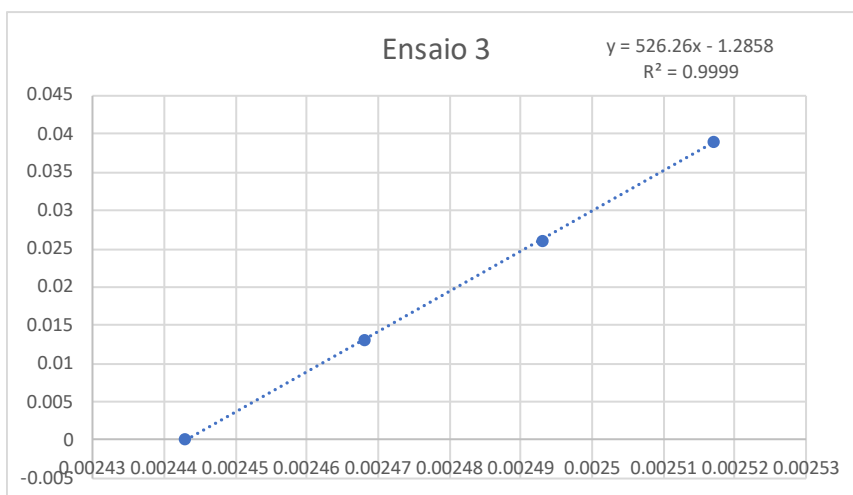


Figura 25 - Gráfico do 3º Ensaio com um valor de 737,11 m/s de velocidade média. Massa de explosivo PE4-A 19,9 g.

A disposição dos sensores é importante ser referida pois devido à posição dos sensores em relação ao explosivo fez com que existisse um ângulo entre a propagação da onda de choque e o conjunto de sensores. A Figura 26 ilustra a configuração dos sensores e a distância média que resultou dos três ensaios realizados neste estudo.

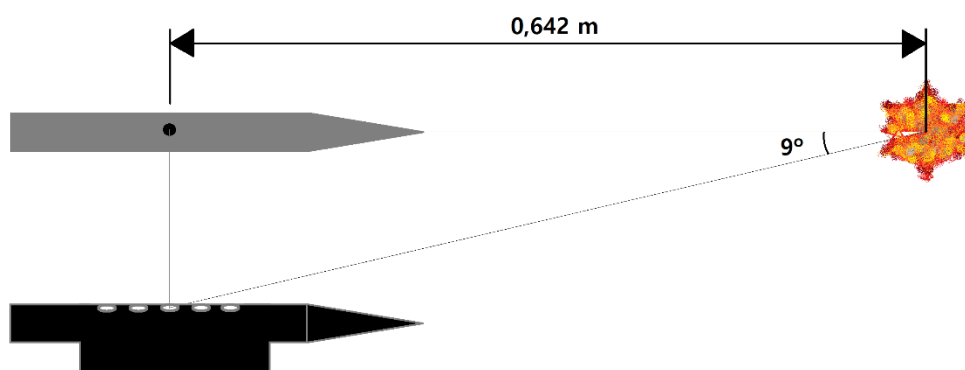


Figura 26 - Configuração dos sensores em relação à posição central do explosivo (média dos 3 ensaios).

O ângulo que se forma entre o conjunto de sensores e a direção de propagação da onda de choque faz com que a velocidade que se retira dos gráficos presentes nas Figura 23, Figura 24 e Figura 25 tenham que ser alteradas. As velocidades na direção de propagação da onda de choque encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores das velocidades médias retiradas das derivadas do deslocamento e da computação pós ângulo

	Ensaio1	Ensaio2	Ensaio3
Velocidade pré ângulo			
velocidade	656.43	553.11	737.11
Velocidade pos angulo			
velocidade	664.61	560.00	746.30

Depois de obtidas as velocidades a partir do tempo de chegada da onda aos sensores, por forma a determinar o equivalente de TNT, a sobrepressão de pico incidente foi determinada recorrendo às condições de Rankine-Hugoniot [8], [5]. Estas condições estabelecem uma relação entre a sobrepressão de pico e a velocidade da onda de choque de acordo com a seguinte expressão:

$$P_{so} = \frac{7}{6} * (M_s^2 - 1) * P_o \quad (3.1)$$

Os termos desta fórmula representam as seguintes variáveis [5]:

- P_{so} , representa a pressão refletida de Mach;
- P_o , representa a pressão atmosférica do meio;
- M_s , representa o número de mach.

Este número de mach é calculado a partir da seguinte expressão [5]:

$$M_s = \frac{u}{u_{som}} \quad (3.2)$$

Em que estes parâmetros representam,

- \vec{u} , a velocidade da onda do caso em estudo;
- \vec{u}_{som} , a velocidade do som (343 m/s (S.I.) à atmosfera padrão).

A correlação destes valores pode ser vista na tabela seguinte:

Tabela 7 - Valores da pressão refletida de Mach, pressão atmosférica sentida à data do ensaio e a velocidade do som.

PressAtm	1008.5	hPa	100.85	kPa
vel. Som	343	m/s		
				Pressao
Ms1	1.93765		P1	324.09
Ms2	1.63267		P2	195.97
Ms3	2.17580		P3	439.35

Recorrendo aos valores obtidos, obteve-se um fator de equivalência de 1.4 kg de TNT por 1 kg de PE4-A.

No caso da avaliação dos frames retirados da câmara, foi utilizado o software *Photron FASTCAM Viewer 4* para se obter as distâncias entre frames do deslocamento parcial da onda. Para este estudo foi importante perceber a escala dos frames para se poder medir valores reais de deslocamento, valores esses que foram medidos a partir da calibração realizada anteriormente aos ensaios efetuados. Ou seja, em primeiro lugar, depois da configuração do ensaio estar terminada, usa-se uma placa de calibração com uma grelha de pontos impressa, em que a posição relativa entre pontos é conhecida, de seguida, e com recurso ao software, realiza-se a calibração entre a grelha e o tamanho da imagem obtido pela câmara para que qualquer distância obtida a partir desse momento seja retirada já com essa escala introduzida. É importante referir que a partir desse momento é imperativo que a câmara não sofra qualquer tipo de deslocamento.

Com a questão da distância resolvida, resta compreender como determinar o tempo em que cada frame ocorre. Para isso, na configuração da câmara, temos conhecimento do número de frames por segundo (fps) com a qual a câmara opera. A partir desse valor, podemos calcular o inverso, o que nos fornece o intervalo de tempo entre cada frame. O momento em que o tempo começa a ser contabilizado é o instante em que o primeiro frame é capturado em que a onda se torna visível.

Depois de estipuladas as escalas, a avaliação das imagens ocorreu em relação à margem da mesma, sendo que, a margem em que a onda inicialmente chegava tinha o valor de 0 e a margem oposta tinha o valor que correspondia à distância real observada pela câmara. Com isto os valores obtidos para se poder, à semelhança do que foi feito anteriormente com os sensores, obter a curva de deslocamento, para de seguida se poder retirar a velocidade, encontra-se resumidos na Figura 27. A Tabela 8 ilustra a posição da onda de choque em função do tempo.

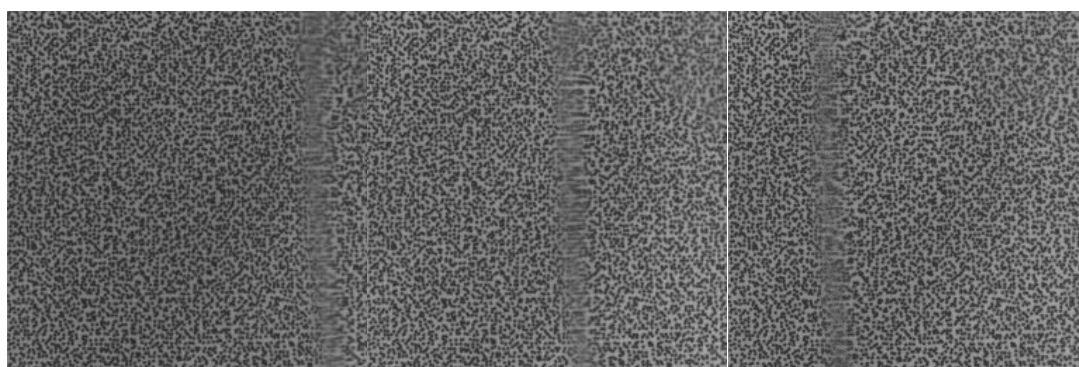


Figura 27 - Frames com posição da onda de choque, sendo que o movimento da onda em cada frame é da direita para a esquerda.

Tabela 8 - Valores de deslocamento parcial da onda e do respetivo tempo correlacionado.

Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3	
mm	ms	mm	ms	mm	ms
5.849	0	9.9433	0	7.6037	0
18.716801	0.026667	22.8111	0.026667	21.0564	0.026666667
28.660101	0.053333	37.433601	0.053333	34.509102	0.053333333
43.2826	0.08	51.471199	0.08	46.792	0.08
56.735298	0.106667	65.508797	0.106667	61.999401	0.106666667
65.508797	0.133333	80.131302	0.133333	75.452103	0.133333333
78.376602	0.16	95.338699	0.16	90.0746	0.16
90.6595	0.186667	108.791397	0.186667	104.112198	0.186666667
106.451797	0.213333	123.998802	0.213333	119.319603	0.213333333
122.244102	0.24	139.791107	0.24	134.526993	0.24
135.696793	0.266667			149.149506	0.266666667
149.149506	0.293333				

As Figura 28, Figura 29 e Figura 30 ilustram a evolução da posição da onda de choque ao longo de cada ensaio e a respectiva velocidade obtida através do ajuste de uma reta aos pontos obtidos, assim como a equação dessa mesma reta.

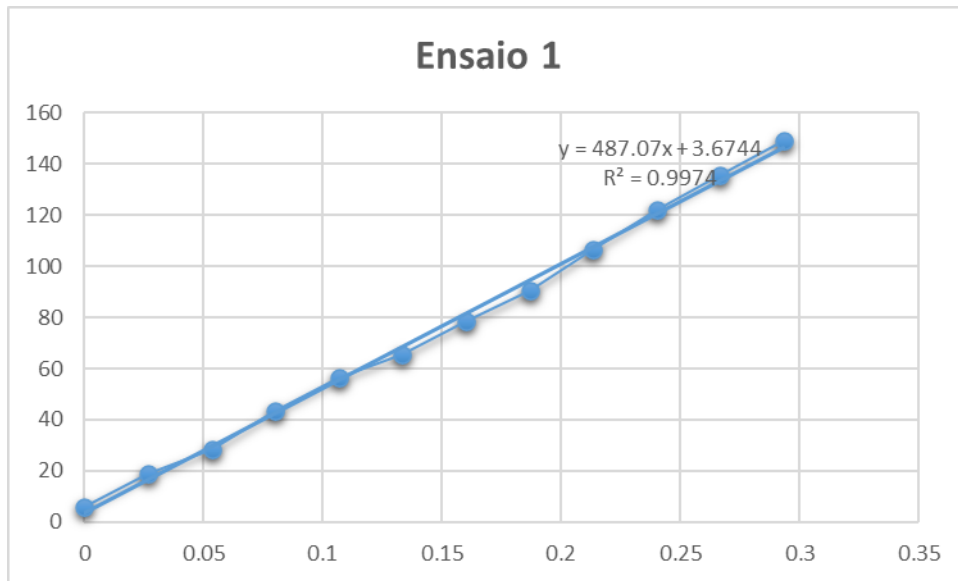


Figura 28 - Gráfico com os valores obtidos do deslocamento parcial da onda para o ensaio nº1. Valor da velocidade obtido foi de 487,07 m/s.

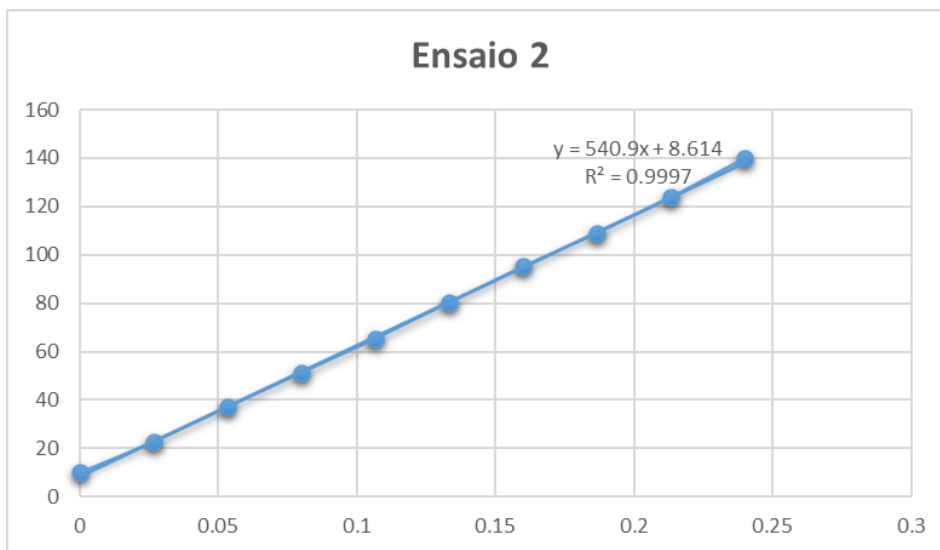


Figura 29 - Gráfico com os valores obtidos do deslocamento parcial da onda para o ensaio nº2. Valor da velocidade obtido foi de 540,90 m/s.

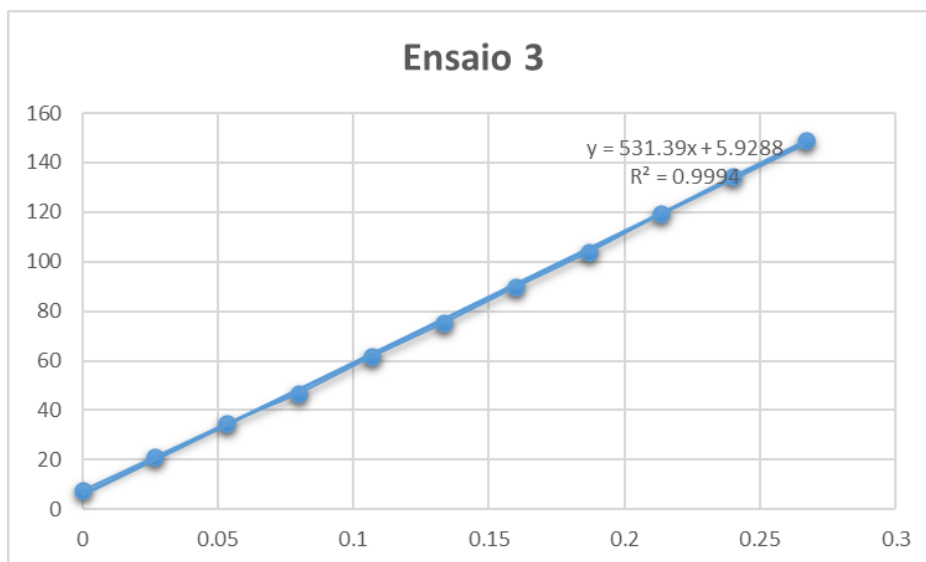


Figura 30 - Gráfico com os valores obtidos do deslocamento parcial da onda para o ensaio nº3. Valor da velocidade obtido foi de 531,39 m/s.

Na Tabela 9 podem-se ver os valores das sobrepressões de pico obtidas para cada um dos ensaios realizados, estes valores foram calculados usando as equações (3.1) e (3.2).

Tabela 9 - Valor das pressões de pico obtidas através dos números de Mach obtidos das velocidades retiradas dos gráficos.

PressAtm	1008.5	hPa	100.85	kPa
vel. Som	343	m/s		
				Pressao
Ms1	1.420029		P1	119.5977
Ms2	1.576968		P2	174.9377
Ms3	1.549242		P3	164.7394

Recorrendo aos valores obtidos, obteve-se um fator de equivalência de 1.4 kg de TNT por 1 kg de PE4-A.

3.3 Ensaio experimental 3

O objetivo do terceiro ensaio experimental foi a determinação da onda de choque obtida quando que recorre a um tubo de choque, neste caso o tubo de choque tem 1 m de comprimento e uma secção quadrada interior de 75x75 mm. Como já abordado, verifica-se que a utilização de tubos choque amplifica as pressões obtidas quando comparadas com um ensaio em ambiente livre, e, através da realização do presente ensaio, determina-se a curva pressão-tempo a que uma estrutura irá ser submetida utilizando as condições deste ensaio experimental.

A carga explosiva utilizada durante este conjunto de ensaios experimentais foi 20 g de explosivo PE4-A, colocados a 10 cm da boca do tubo, tendo sido realizados três ensaios. A configuração deste estudo de caso encontra-se ilustrada na Figura 31.

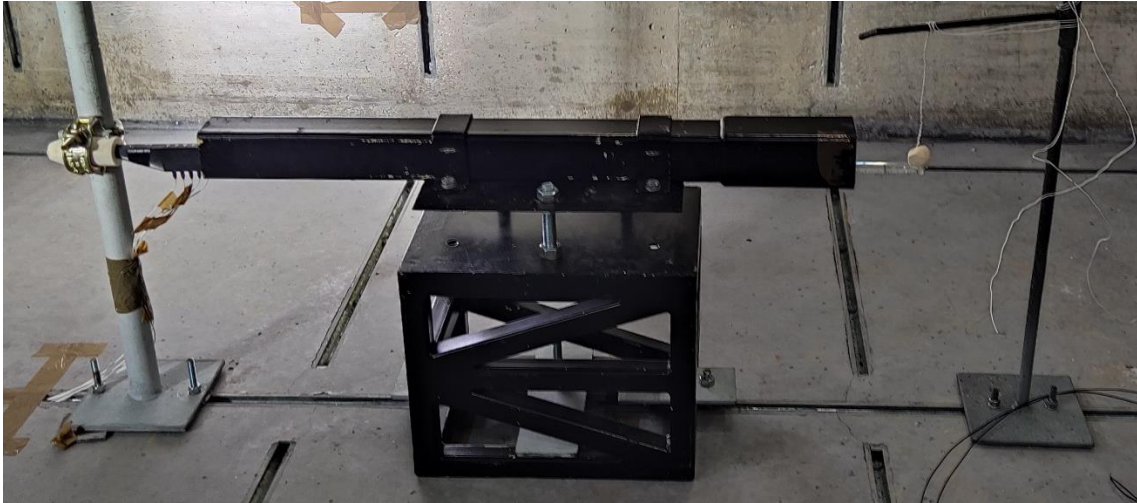


Figura 31 - Configuração do 3º ensaio experimental.

Neste conjunto de ensaios experimentais, foram igualmente utilizados cinco sensores de pressão [27], [28], aplicados ao suporte impresso em 3D, e o tubo de choque. Como nos estudos anteriores, os dados foram analisados com recurso ao software TMMatLab.

Os sensores encontram-se numerados de 1 a 5, sendo que o número 1, é o sensor mais próximo e o número 5 o mais afastado da carga explosiva. A posição do suporte é tal que o sensor número 3, está colocado exatamente na interseção com o plano criado pela secção de saída do tubo de choque.

Na Tabela 10 podemos verificar os tempos de chegada da onda e a duração da fase positiva para o primeiro ensaio.

Tabela 10 - Tempos de chegada e duração da fase positiva por sensor, para o Ensaio 1.

t1	t0	t0+ta	ta
s1	0.0015910	0.0023780	0.0007870
s2	0.0015970	0.0021170	0.0005200
s3	0.0015790	0.0018860	0.0003070
s4	0.0015910	0.0018230	0.0002320
s5	0.0016050	0.0016940	0.0000890

Como se pode verificar, os tempos de chegada dos sensores, estão com valores não coerentes, como tal para o cálculo da pressão refletida de Mach, os dois primeiros valores tiveram de ser desprezados, o motivo para tal acontecimento pode ter sido relacionado com o choque a que os cabos dos sensores se encontram sujeitos. Na Figura 32 pode-se verificar que apenas três pontos foram usados para traçar a reta.

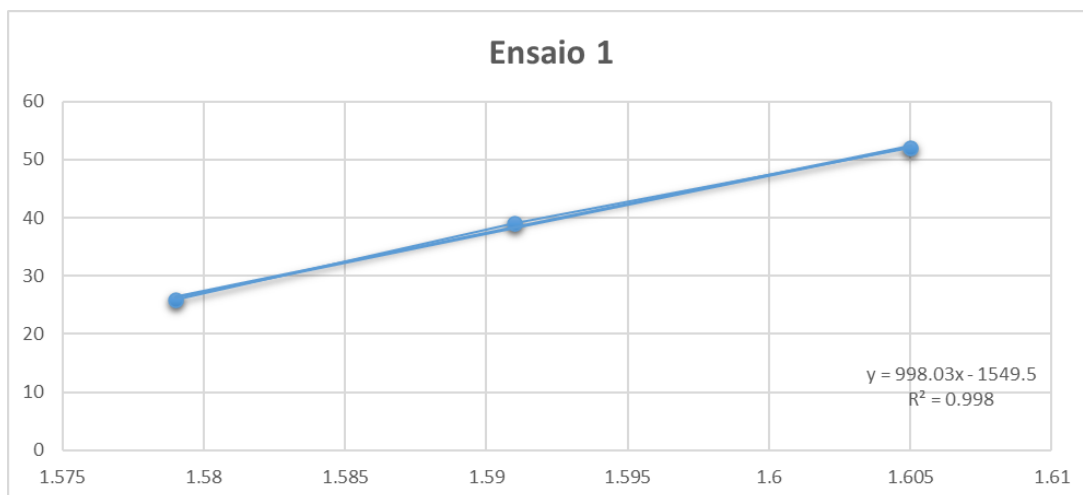


Figura 32 - Curva de deslocamento, com base nos tempos de chegada da onda de choque, para o Ensaio 1. A massa de explosivo usada foi de 19,9 gramas.

Os valores dos tempos de chegada e da duração da fase positiva dos segundo e terceiro ensaios estão expostos na Tabela 11 e na Tabela 12 respectivamente.

Tabela 11 - Tempos de chegada e duração da fase positiva por sensor, para o Ensaio 2.

t2	t0	t0+ta	ta
s1	0.0015640	0.0022310	0.0006670
s2	0.0015640	0.0019800	0.0004160
s3	0.0015760	0.0019700	0.0003940
s4	0.0015900	0.0018000	0.0002100
s5	0.0016010	0.0016940	0.0000930

Tabela 12 - Tempos de chegada e duração da fase positiva por sensor, para o Ensaio 3.

t3	t0	t0+ta	ta
s1	0.0018160	0.0024900	0.0006740
s2	0.0018290	0.0022270	0.0003980
s3	0.0018410	0.0021070	0.0002660
s4	0.0018550	0.0020220	0.0001670
s5	0.0018720	0.0019570	0.0000850

Para o caso do segundo ensaio, e pelo motivo já apresentado, foi desprezado o valor do sensor número 1, como se pode verificar na Figura 33.

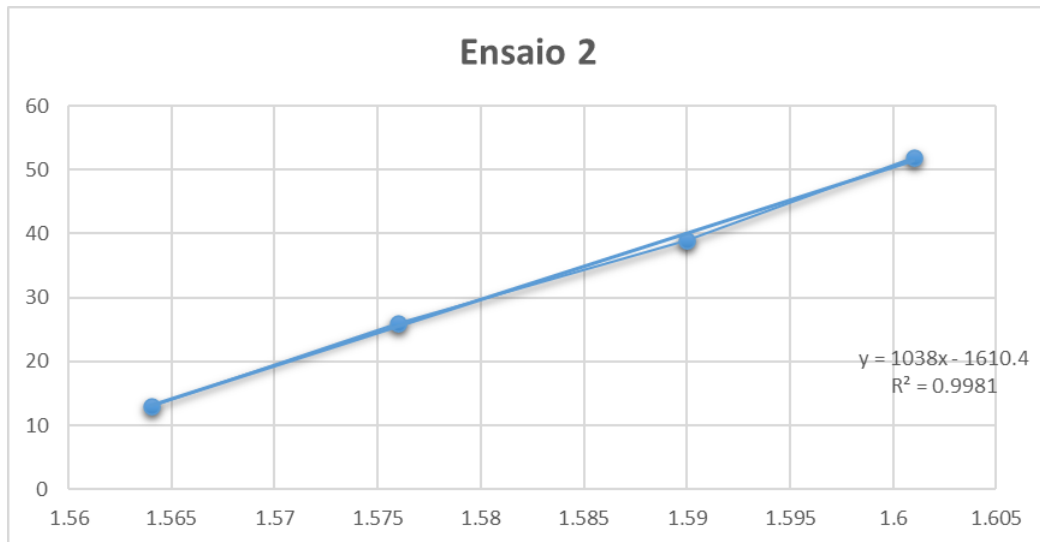


Figura 33 - Curva de deslocamento, com base nos tempos de chegada da onda de choque, para o Ensaio 2. A massa de explosivo usada foi de 20,1 gramas.

No caso do terceiro ensaio foi conseguida uma leitura correta com todos os sensores, como se pode confirmar na Figura 34 todos os cinco pontos referentes aos sensores estão expostos.

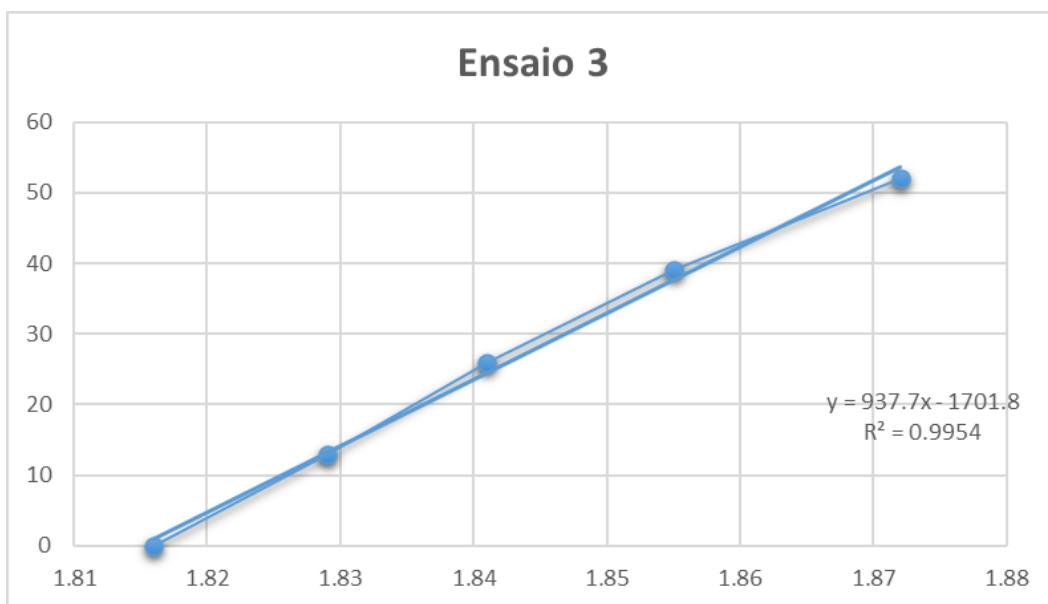


Figura 34 - Curva de deslocamento, com base nos tempos de chegada da onda de choque, para o Ensaio 3. A massa de explosivo usada foi de 19,9 gramas.

Para o cálculo da pressão refletida de Mach, foram usados os parâmetros já apresentados na Secção 3.2 e as equações (3.1) e (3.2).

Na Tabela 13 estão apresentados todos os valores determinados e com as respetivas velocidades retiradas da Figura 32, Figura 33 e Figura 34.

Tabela 13 - Valor do número de Mach e das respetivas pressões.

	Pressão Atm.	1017	hPa	101.7	kPa
	vel. Som	343	m/s		
	Vel.p/Ens				
998.03	Ms1	2.909708		P1	885.8888
1038	Ms2	3.026239		P2	967.9613
937.7	Ms3	2.733819		P3	768.1125

Tendo em conta que o objetivo do presente ensaio era a determinação da sobrepressão de pico através da velocidade da onda de choque, foi necessário utilizar uma curva de pressão-tempo de uma onda refletida previamente obtida e disponível na literatura [23]. Esta solução tornou-se viável devido ao facto de os ensaios previamente realizados terem sido efetuados no mesmo espaço sob as mesmas condições e com o mesmo equipamento. Assim sendo, poderá ser utilizada a curva de pressão refletida destes ensaios realizados.

Para tal foi efetuada uma média das pressões obtidas e, através da Figura 35 [13], foi obtida a pressão refletida para a pressão incidente previamente determinada. O valor destas pressões pode ser consultado na Tabela 14.

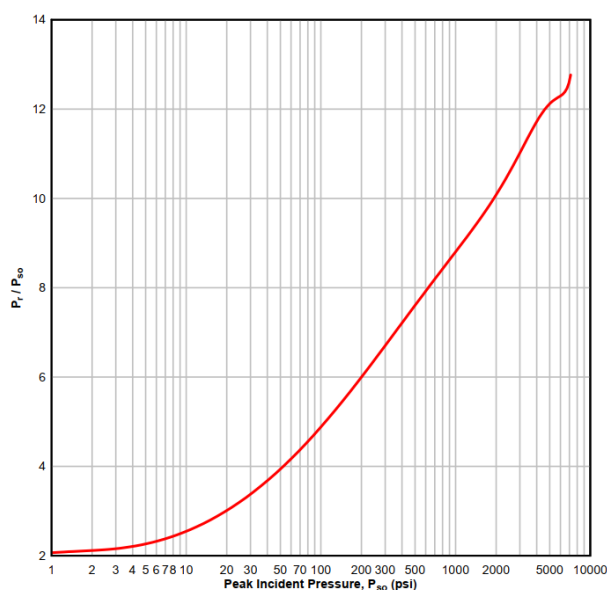


Figura 35 - Gráfico de relação entre a pressão incidente e coeficiente entre a pressão refletida e a pressão incidente.

Tabela 14 - Pressão refletida obtida através da pressão incidente.

Pressão	kPa	Psi	Relação Pr/Ps
Incidente	873.9875	126.7567	5.247179
Refletida	4585.969	665.1152	

A Tabela 15 mostra pressão refletida do ensaio da Ten. Eng. Martins e os restantes valores necessários para caracterizar a curva onda de choque.

Tabela 15 - Valores próprios da curva definida pela experiência realizada em [23].

lr	0.011547
Pr	4765.507
ta+t0	0.003616
ta	0.001881
t0	0.001735

Fazendo a relação desta curva para o valor da pressão refletida obtida na Tabela 14, obtemos os parâmetros adaptados a uma curva com esse máximo, que podem ser consultados na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores adaptados para o valor da pressão refletida obtida no ensaio.

lr	0.011112
Pr	4585.969
ta+t0	0.003616
ta	0.001881
t0	0.001735
b	715.0437

Fazendo passagem da pressão refletida para a pressão incidente, obtemos os parâmetros presentes na Tabela 17 para uma onda de choque característica de uma pressão incidente.

Tabela 17 - Valores adaptados para o valor da pressão incidente do ensaio com uma onda característica.

Ps	873.9875
Is	0.002118
ta+t0	0.003616
ta	0.001881
t0	0.001735
b	715.0439

3.4 Ensaio experimental 4

3.4.1 Configuração do ensaio

O caso de estudo é uma viga simplesmente apoiada de 2,10 m de comprimento, com um perfil UPN80 S275. A viga foi posicionada em dois suportes de modo que as suas rotações sejam livres, mas que os deslocamentos transversais estejam travados. Estes suportes têm uma forma triangular, de modo que não exista deformação dos mesmos durante o ensaio experimental. A colocação da viga nestes suportes foi elaborada de modo a garantir que a premissa de apoio simples seja obtida, para tal, foram trabalhados dois blocos de madeira de modo a perfazer uma superfície curva, ou seja, cada bloco de madeira tinha uma parte do seu

perfil a corresponder a metade da secção de um cilindro e, posteriormente, a fixação da viga aos blocos de madeira foi efetuada com duas chapas de aço com um perfil de 30x8 mm. Esta configuração pode ser observada na Figura 36.

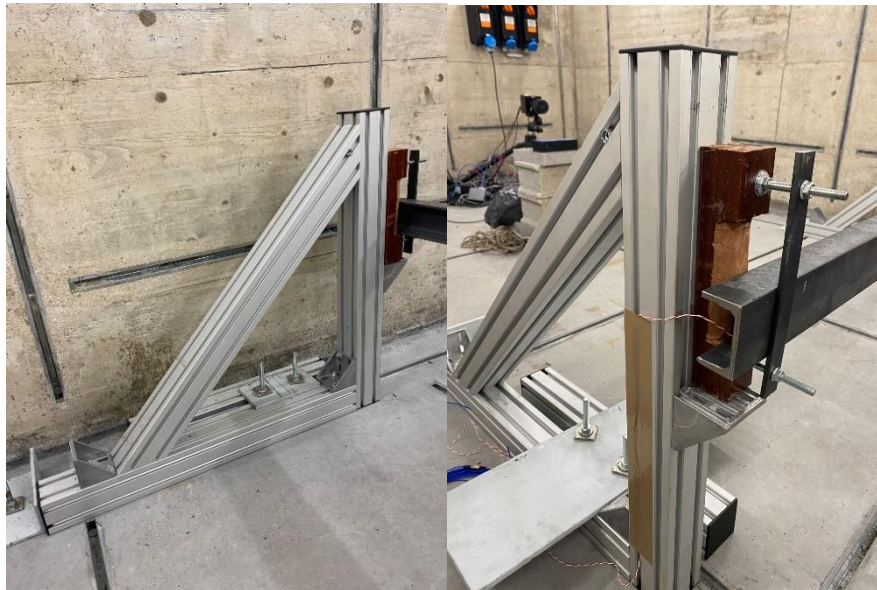


Figura 36 - Perfil triangular de suporte da viga e apoio simples da viga.

Depois da obtenção destes valores, a viga foi submetida ao ensaio com recurso ao tubo de choque, e para a obtenção do deslocamento obtido na viga, foi montada a seguinte configuração, duas câmaras de alta velocidade para a obtenção do deslocamento através do software de correlação digital de imagem Vic3D e um acelerómetro [29]. Para a utilização da correlação digital de imagem, foi necessário aplicar o padrão estocástico ilustrado na Figura 38 à viga. A configuração do ensaio pode ser verificada na Figura 37.



Figura 37 - Posicionamento das câmaras em relação à viga.

Para que o software reconhecesse a viga como a área a analisar e conseguisse notar variações de modo a conseguir calcular os deslocamentos, foi introduzido na viga um padrão de pontos aleatórios tendo em conta a área de observação das câmaras, como se pode observar na Figura 38.



Figura 38 - Padrão de reconhecimento para o software DIC e o acelerómetro colocado na viga.

Observando a Figura 39, verifica-se que a viga tem um comportamento elástico, pois tem deslocamentos nos dois sentidos, ou seja, um deslocamento no sentido em que a carga foi aplicada, outro deslocamento no sentido contrário como restituição de energia e pela elasticidade que a viga oferece, até voltar à posição inicial. Os deslocamento máximos observados através deste método rondam os 3.1 mm.

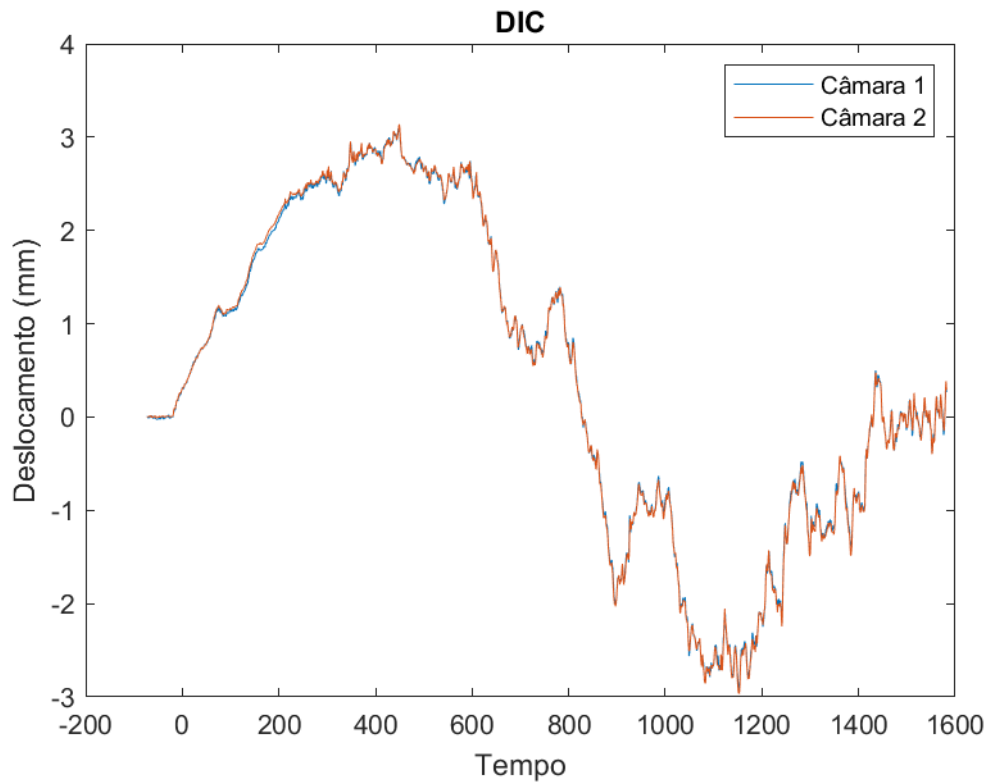


Figura 39 - Valor de deslocamento obtidos pelo DIC.

Devido às vibrações presentes na viga durante o ensaio, tal como a propagação de ondas elásticas no interior do perfil, os valores do acelerómetro apresentaram ruído com elevadas frequências, tendo-se obtido uma curva de deslocamento recorrendo a um filtro passa-baixo. Este resultado está em contraste com o gráfico obtido pelo DIC na Figura 40, sendo que o valor máximo que se obteve foi de 3.8 mm.

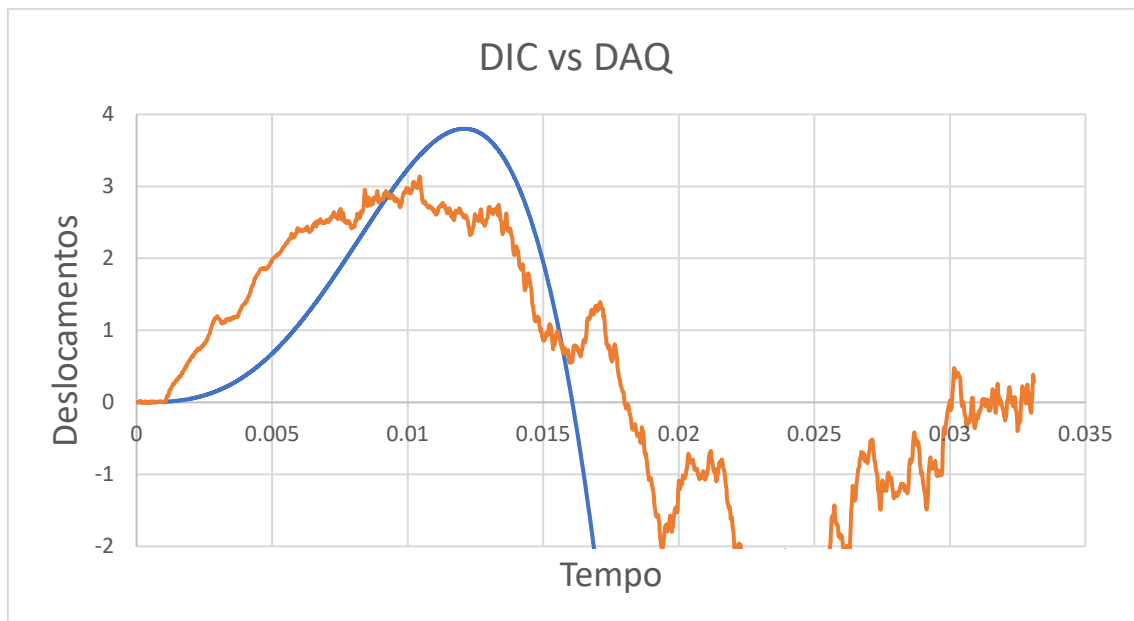


Figura 40 - Valor dos deslocamentos obtidos através do acelerómetro em contraste com os valores obtidos pelo DIC.

4 Análise analítica e numérica

4.1 Características físicas da viga

Como já referido o perfil da viga escolhido foi um UPN 80 S275 (ver Figura 41), e as características da secção estão presentes na Tabela 18:

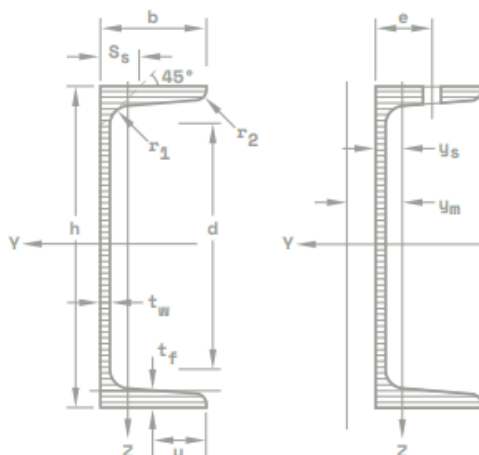


Figura 41 - Perfil UNP

Tabela 18 - Características do perfil UNP 80.

Designação	Dimensões							Dimensões para estruturas					Superfície		
	G (kg/m)	h (mm)	b (mm)	t _w (mm)	t _f (mm)	r ₁ (mm)	r ₂ (mm)	A (cm ²)	d (mm)	∅	e _{min} (mm)	e _{max} (mm)	A _L (m ² /m)	A _G (m ² /t)	
UPN80	8,64	80	45	6	8	8	4	11	47	—	—	—	0,312	37,1	
Designação	Eixo de maior inércia							Eixo de menor inércia							
	G (kg/m)	I _y (cm ⁴)	W _{el,y} (cm ³)	W _{pl,y} (cm ³)	i _y (cm)	A _{vz} (cm ²)	I _z (cm ⁴)	W _{el,z} (cm ³)	W _{pl,z} (cm ³)	i _z (cm)	s _s (mm)	I _t (cm ⁴)	I _w × 10 ⁻³ (cm ⁶)	y _s (cm)	y _m (cm)
UPN 80	8.64	106	26.5	32.3	3.1	4.9	19.4	6.36	11.9	1.33	19.4	2.2	0.18	1.45	2.67

Tendo em conta que para a utilização dos suportes para o apoio da viga, parte desta, fica fora do espaço compreendido entre estes apoios, o comprimento da viga efetivo a ser utilizado é de 1,95 m. Todos os outros valores que são necessários para a completa caracterização da viga estão presentes na Tabela 11.

Tabela 19 - Parâmetros da viga com perfil UNP 80.

Variável	Valor
Módulo de Young, E	210 GPa
Comprimento da viga efetivo, Le	1,95 m
Massa da viga	16,85 kg

4.2 Método analítico

Para o cálculo do momento fletor elástico resistente, e tendo em conta colocação da viga e a direção a que esta será submetida à carga, temos de considerar o momento de inércia elástico na direção z. Para o cálculo deste momento é dado pelo Eurocódigo 3 parte 1-1.[30]

$$M_{Rd,El} = W_{el,z} * f_y = 6,36 * 10^3 * 0.275 = 1.749 \text{ kNm} \quad (4.1)$$

A resistência máxima R_m , e rigidez da mola k , como efeito equivalente de absorção por parte da estrutura são de:

$$R_m = \frac{4 * 1.749}{1.95} = 3.588 \text{ kN} \quad (4.2)$$

$$k = \frac{48 * 210 * 10^6 * 19.4 * 10^{-8}}{1.95^3} = 263.73 \text{ kN/m} \quad (4.3)$$

A frequência da viga na análise com um grau de liberdade é definida da seguinte maneira, sendo que o período é o seu inverso: [24]

$$f = \frac{1}{2 * \pi} * \sqrt{\frac{k * k_L}{M * k_M}} = 28.4 \text{ Hz} \quad (4.4)$$

$$T = \frac{1}{f} = 0.035 \text{ s} \quad (4.5)$$

Depois de obtidos estes valores é possível usar um gráfico de UFC [13]:

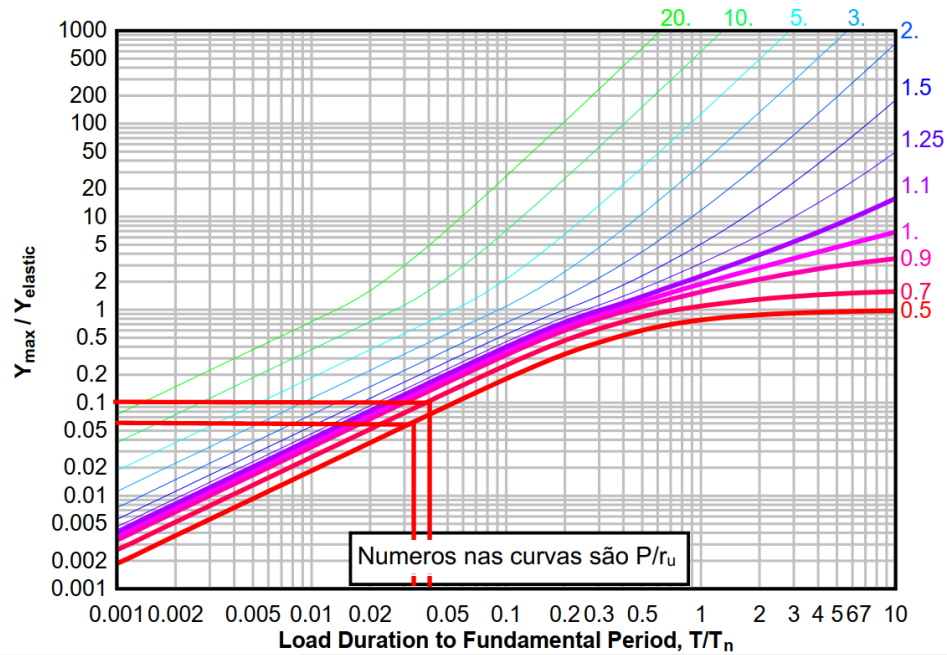


Figura 42 - Deformação máxima de um sistema elasto-plástico com um grau de liberdade para uma carga instantanea. (Adaptado de [13])

$$t_d = 0.001735 \text{ s}$$

Fazendo o cálculo da força equivalente derivada da pressão incidente obtida através das velocidades, resulta em:

Área de aplicação da carga		64 cm ²	
Pressão	873.9875 kPa	Força	5.59 kN

Abordando os valores medidos diretamente pelos sensores e fazendo os cálculos para poder definir o deslocamento através destes, resulta em:

$$t_d = 0.001617 \text{ s}$$

Tabela 20 - Valores das maiores pressões obtidas no tubo de choque e forças equivalentes.

Área de aplicação da carga		64 cm ²	
Pressão 1	1640.488 kPa	Força 1	10.50 kN

Para estes valores de carga, as relações entre R_m e F_1 alteram, tendo em conta que para a força derivada das velocidades a relação é de 0,64, para a força derivada dos sensores de pressão é de 0.34. Fazendo os cálculos para o deslocamento elástico:

$$y_{el} = \frac{R_m}{k} = \frac{3.588}{263.73} = 0.0136 \text{ m}$$

Com isto podemos obter os deslocamento máximos que estão presentes na Tabela 21.

Tabela 21 - Valores de deslocamento máximo.

y _{el}		0.0136 m	
y _{m1} /y _{el}	0.1	y _{m1}	0.00136 m
y _{m2} /y _{el}	0.04	y _{m2}	0.00054 m

Tendo em conta as características físicas dos apoios presente na viga, e devido aos valores obtidos na Tabela 21, podemos concluir que os apoios, pelo método analítico, não se trata de apoios simples nem encastrados, logo será um valor intermedio desses valores. Na Figura 43 podemos verificar os valores para o deslocamento a meio vão da viga obtidos através das câmaras de alta velocidade e do acelerómetro em contraste com os valores teóricos para as condições de apoio simplesmente apoiada e encastrada calculados através da integração numérica no tempo, recorrendo ao programa desenvolvido por Rebelo [10].

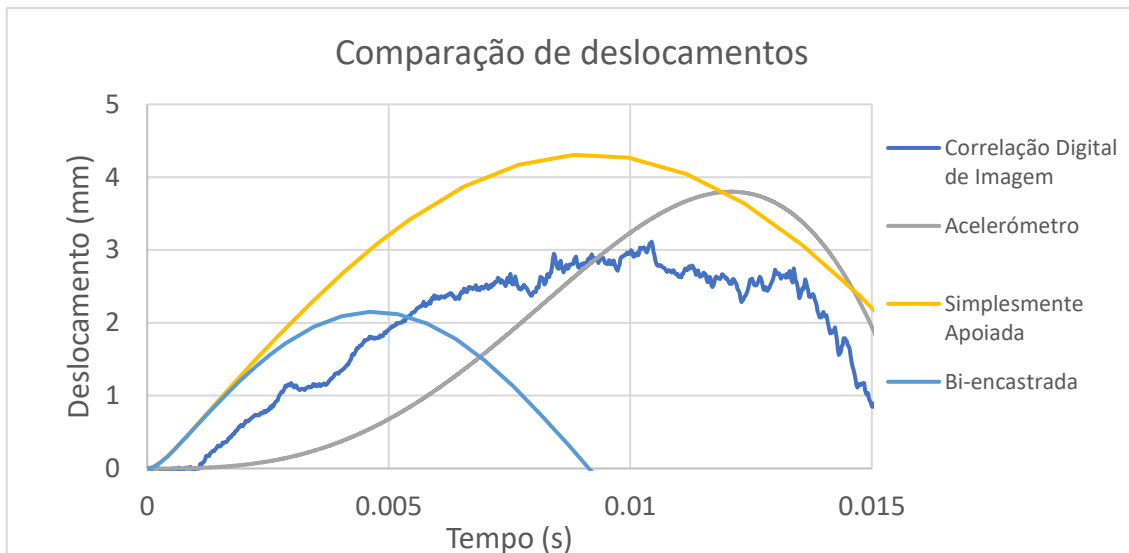


Figura 43 - Valor dos deslocamentos obtidos através do acelerômetro e pelo DIC em contraste com os valores pela integração numérica no tempo.

4.3 Modelo numérico

LS-Dyna é um software desenvolvido pela Livermore Software Technology Corporation (LSTC) [31]. Atualmente, para a resolução de diversos problemas no campo da engenharia, o método dos elementos finitos é frequentemente empregue para obter resultados de análises não-lineares com um certo grau de precisão. O LS-Dyna é um software robusto amplamente utilizado na indústria devido à sua capacidade de prever a resposta de colisões de veículos contra paredes ou outros carros, avaliar danos às pessoas dentro do veículo, modelar mecânica de fluidos, projetar infraestruturas para resistência a impactos e reproduzir ondas de choque para simular a onda de pressão e os danos que esta pode causar.

O LS-Dyna tem a capacidade de realizar análises explícitas não-lineares, bem como análises implícitas. Para o trabalho apresentado, optou-se pela análise explícita devido ao tipo de problema analisado, que envolve um problema de contato rápido. Neste caso, a análise explícita oferece resultados com precisão e com um esforço computacional menor quando comparado com a análise implícita.

O modelo numérico foi concebido com o propósito de comparar com a campanha experimental, proporcionando uma abordagem complementar para replicar as condições reais. Essa representação virtual permitiu uma análise mais aprofundada e controlada, oferecendo contributos valiosos para a compreensão do fenômeno em estudo. A combinação do modelo numérico com a campanha experimental proporcionou uma abordagem abrangente, abrindo espaço para uma validação robusta e uma interpretação mais precisa dos resultados obtidos. O modelo numérico da viga está exposto na Figura 44.

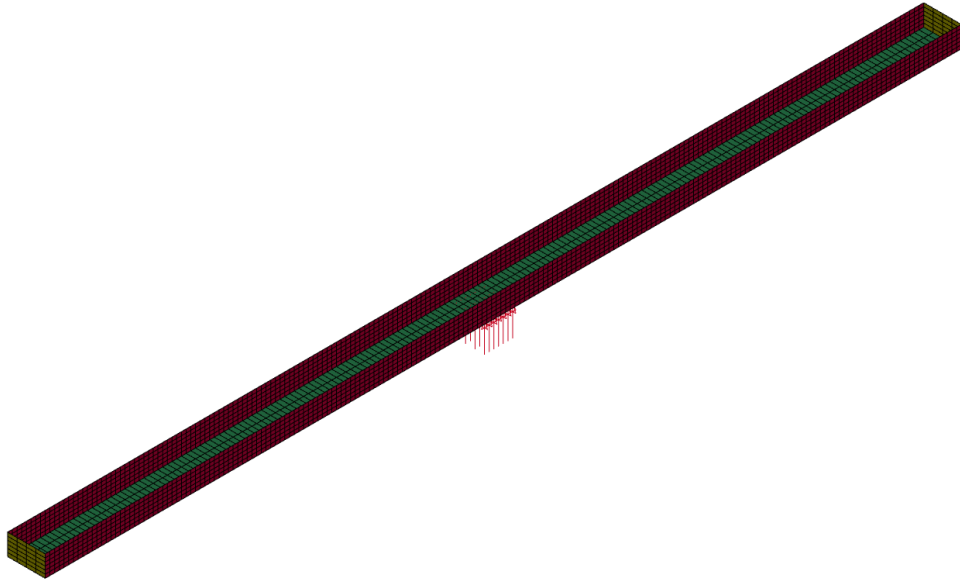


Figura 44 - Viga modelada com a carga aplicada no LS-Dyna

4.3.1 Geometria e condições de fronteira

O modelo numérico é constituído por três partes diferentes, sendo que na *keyword* de PART foi definido uma PART para os banzos, uma PART para a alma da viga e mais uma PART para as chapas de topo que estão definidas para ajudar na simulação dos apoios da viga, assim como também foram definidas as mesmas SECTION_SHELL para estas mesmas partes.

A dimensão da alma é de 1950 mm em comprimento e 80 mm de largura. Os banzos têm dimensões iguais entre si, e são estas 1950 milímetros de comprimento por 45 mm de altura. As chapas de topo também têm dimensões iguais entre si e são estas 80 mm de largura por 45 mm de altura.

Às chapas de topo estão associadas as keywords BOUNDARY e estão definidas em BOUNDARY_SPC_SET como ilustrado nas Figura 45 e Figura 46, permitindo fixar os graus de liberdade apresentados nas figuras.

1	NSID	CID	DOFX	DOFY	DOFZ	DOFRX	DOFRY	DOFRZ
	1	0	0	1	1	0	0	0

Figura 45 - BOUNDARY_SPC_SET apoio móvel.

1	NSID	CID	DOFX	DOFY	DOFZ	DOFRX	DOFRY	DOFRZ
	2	0	1	1	1	0	0	0

Figura 46 - BOUNDARY_SPC_SET apoio fixo.

A malha de elementos finitos usada em todas as partes da secção da modelação é constituída por elementos com dimensão de 10x20 mm. A espessura das paredes definidas nos banzos é de 8 mm e a espessura da parede definida na alma é de 6 mm. A espessura dos elementos usados nas chapas de topo foi de 8 mm.

4.3.2 Modelos de material

O modelo usado foi o elasto-plástico com endurecimento, e este modelo leva em consideração tanto a deformação elástica quanto a deformação plástica. A deformação elástica é reversível, o que significa que o material retorna à sua forma original quando a carga é removida. A deformação plástica é irreversível e ocorre quando o material sofre deformação permanente. O endurecimento é um fenômeno em que um material se torna mais difícil ou resistente à deformação plástica à medida que é deformado [31].

Dentro da *keyword* MAT_PLASTIC_KINEMATIC, o que ficou definido para o aço foram os parâmetros apresentados na Figura 47, em que as unidades são o kg, mm e kN.

TITLE							
steel							
1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	BETA
	1	7.860e-06	200.00000	0.3000000	0.2750000	0.0010000	0.0
2	SRC	SRP	FS	VP			
	0.0	0.0	0.0	0.0			

Figura 47 - Parâmetros para o aço introduzidos no LS-Dyna.

4.3.3 Carregamento

Para simular as cargas a que a viga esteve sujeita durante a campanha experimental, foi introduzida na *keyword* DEFINE_CURVE a carga variável no tempo que se originou da campanha. Esta carga pode ser consultada na Figura 48, e de modo a tentar recriar o modelo com o sucedido durante o ensaio área a que se fez aplicar esta carga foi de 70x80 mm, que se traduz na seleção de 7x4 elementos.

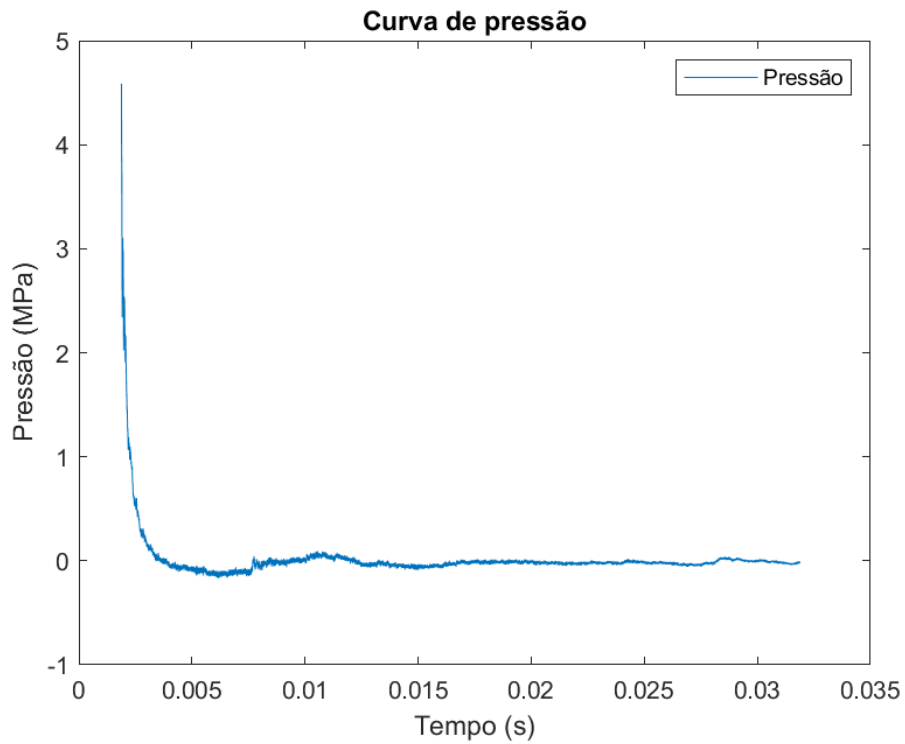


Figura 48 - Curva de pressão aplicada ao modelo no LS-Dyna.

O deslocamento obtido através da modelação de todos estes parâmetros pode ser visto na Figura 49.

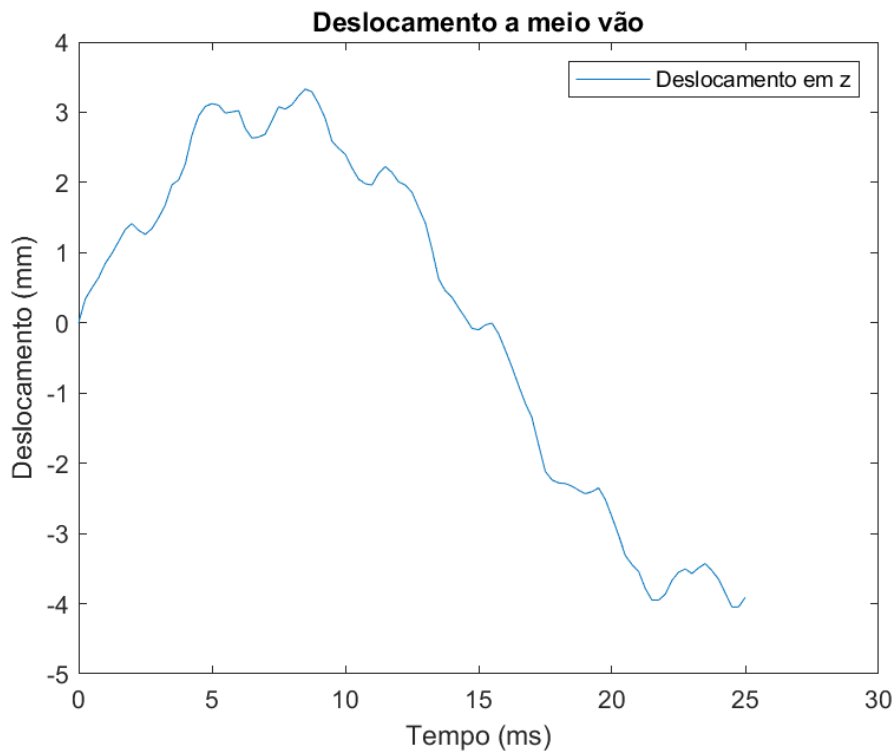


Figura 49 - Deslocamento obtido através da modelação em LS-Dyna.

4.4 Comparação de resultados

Comparando os resultados obtidos através dos métodos analítico, numérico e experimental, podemos verificar que diferenças existe entre cada análise. Na Figura 50 podemos ver a curva de deslocamento obtida através do método numérico com recurso ao programa de simulação LS-Dyna, os valores analíticos são os valores obtidos através das tabelas UFC [13] e dos respetivos cálculos. O valor representado pelo máximo DAQ, é o valor máximo do deslocamento da viga obtido pelo acelerómetro, da mesma forma que o valor máximo DIC foi o valor máximo registado do deslocamento da viga através das câmaras de alta velocidade, assim como os valores obtidos através da integração numérico no tempo, apenas estão apresentados os valores máximos obtidos.

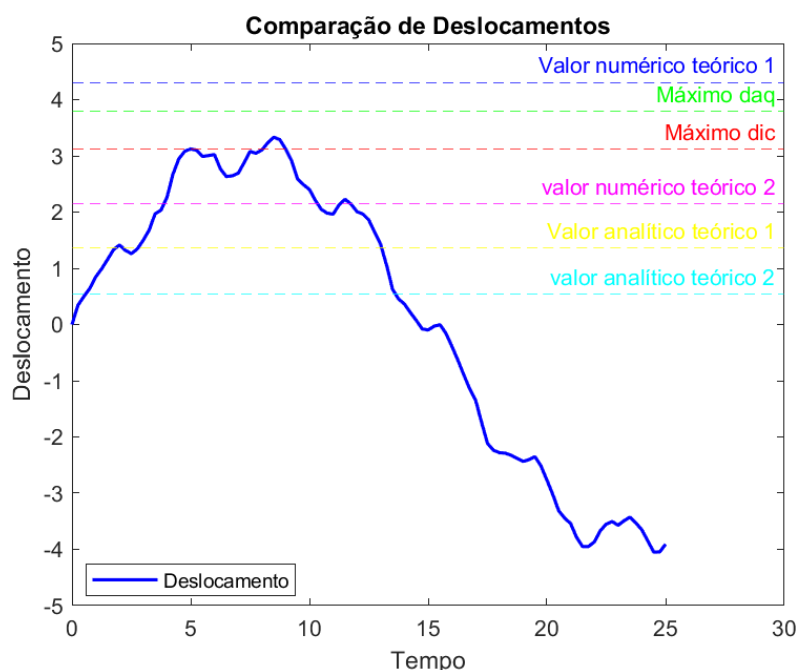


Figura 50 - Comparação de deslocamentos.

Na Tabela 22 são apresentados os valor de forma mais condensada de todos os métodos já apresentados em que os valores são expostos em mm.

Tabela 22 - Valores máximos dos deslocamentos.

Tipos de deslocamento	Valor máximo obtido (mm)
DAQ	3.8
DIC	3.11
Teórico 1	5.4
Teórico 1	12.2
Numérico	3.33
Integração numérico simples	4.31
Integração numérico encastrada	2.15

5 Conclusão

As quatro campanhas experimentais realizadas foram fundamentais para alcançar os objetivos propostos neste estudo. Na primeira campanha, concentramo-nos na obtenção das equivalências de TNT para o explosivo PE4-A, utilizando sobrepressões de pico e impulsos como métricas. Os resultados obtidos demonstraram uma consistência notável e validaram a precisão e repetibilidade dos ensaios.

A segunda campanha experimental expandiu a nossa compreensão ao explorar as equivalências de TNT a partir da avaliação da velocidade de propagação da onda de choque. Esta abordagem proporcionou uma perspectiva única e complementar, enriquecendo os nossos dados e reforçando a confiabilidade das medições.

A terceira campanha concentrou-se na obtenção de pressões incidentes amplificadas através do tubo de choque, fornecendo uma visão abrangente das características das ondas de choque em diferentes condições. Este conjunto de dados foi crucial para estabelecer equivalências de TNT a partir das pressões amplificadas.

A última campanha experimental trouxe um elemento prático ao avaliar os deslocamentos provocados em uma viga metálica pelas forças resultantes das pressões obtidas através do tubo de choque. Essa abordagem experimental permitiu uma validação prática das conclusões obtidas nas campanhas anteriores.

A análise pormenorizada dos resultados, incluindo desvios padrão dos fatores de equivalência em percentagem da média, demonstrou a consistência e confiabilidade dos dados obtidos em todas as campanhas experimentais.

Em resumo, as quatro campanhas experimentais proporcionaram uma compreensão abrangente das características do explosivo PE4-A em relação ao TNT. Os métodos de avaliação utilizados, incluindo sobrepressões de pico, impulsos e velocidade de propagação da onda de choque, demonstraram ser eficazes e coerentes. Esses resultados têm implicações significativas para a segurança e eficácia no manuseio de explosivos em ambientes controlados.

Bibliografia

- [1] J. Watson, "United States bomb Data Center, Explosives Incident Report," 2019.
- [2] Al Jazeera, "Romania gas station hit by deadly explosions | News | Al Jazeera," Romania gas station hit by deadly explosions. Accessed: Sep. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.aljazeera.com/news/2023/8/27/romania-gas-station-hit-by-deadly-explosions>
- [3] B. Karakas and H. Hayatsever, "Attackers set off bomb at Turkish government building, both die." Accessed: Oct. 24, 2023. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/world/middle-east/explosion-heard-turkish-capital-media-report-2023-10-01/>
- [4] Al Jazeera, "Brazil grain silo explosions kill at least eight people; 11 injured | Agriculture News | Al Jazeera," Brazil grain silo explosions kill at least eight people; 11 injured. Accessed: Sep. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.aljazeera.com/news/2023/7/27/brazil-grain-silo-explosions-kills-at-least-eight-11-injured>
- [5] W. Baker, "Engineering Design Handbook Explosions in air. Part one.," Texas, Jul. 1974.
- [6] A. Lima and J. Sousa, "Uso e características do explosivo c4," *Proelium*, vol. VIII, pp. 275–281, 2018.
- [7] R. Meyer, Josef. Köhler, and Axel. Homburg, *Explosives*. Wiley-VCH, 2007.
- [8] G. F. Kinney and K. J. Graham, "Explosive Shocks in Air," 1985.
- [9] V. Karlos, G. Solomos, and M. Larcher, "Analysis of blast parameters in the near-field for spherical free-air explosions 2016 EUR 27823," 2016.
- [10] H. M. B. Rebelo, "Development and study of a high performance protective solution against blast loads," Lisboa, Jan. 2020.
- [11] B. Hopkinson, "Report 13565.," *British ordnance board minutes.*, 1915.
- [12] C. Cranz, "LEHRBUCH DER BALLISTIK," 1926, doi: 10.1007/9783642526121.
- [13] "UFC 3-340-02 - Change 2 - STRUCTURES TO RESIST THE EFFECTS OF ACCIDENTAL EXPLOSIONS," *UNIFIED FACILITIES CRITERIA*, 2014.
- [14] J. Augusto Carneiro Machado and J. Joaquim Costa Branco de Oliveira Pedro Lt Col Eng Pedro José da Silva Gonçalves Matias, "Design, Analysis and Testing of a Glazing Façade with Energy Dissipation Devices Military Engineering," 2022.
- [15] J. A. R. Pinto, "Comportamento de Estruturas de Aço sob a Ação de Explosões Conceção de dissipadores de energia Engenharia Militar Orientadores," 2018.
- [16] V. Aune, E. Fagerholt, M. Langseth, and T. Børvik, "A shock tube facility to generate blast loading on structures," *International Journal of Protective Structures*, vol. 7, no. 3, pp. 340–366, Sep. 2016, doi: 10.1177/2041419616666236.

- [17] H. Ousji, B. Belkassam, M. A. Louar, B. Reymen, L. Pyl, and J. Vantomme, "Experimental Study of the Effectiveness of Sacrificial Cladding Using Polymeric Foams as Crushable Core with a Simply Supported Steel Beam," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/8301517.
- [18] N. N. Kleinschmit, "A Shock Tube Technique for Blast Wave Simulation and Studies of Flow Structure Interactions in Shock Tube Blast Experiments," 2011. [Online]. Available: <http://digitalcommons.unl.edu/engmechdiss><http://digitalcommons.unl.edu/engmechdiss/22>
- [19] C. E. Needham, D. Ritzel, G. T. Rule, S. Wiri, and L. Young, "Blast testing issues and TBI: Experimental models that lead to wrong conclusions," *Frontiers in Neurology*, vol. 6, no. APR. Frontiers Media S.A., 2015. doi: 10.3389/fneur.2015.00072.
- [20] H. Ousji *et al.*, "Parametric Study of an Explosive-Driven Shock Tube as Blast Loading Tool," *Exp Tech*, p. n/a-n/a, Nov. 2015, doi: 10.1111/ext.12179.
- [21] E. Courtney, A. Courtney, and M. Courtney, "Shock tube design for high intensity blast waves for laboratory testing of armor and combat materiel," *Defence Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 245–250, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.dt.2014.04.003.
- [22] V. Karlos and G. Solomos, "Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components," *JRC Technical Reports*, 2013, doi: 10.2788/61866.
- [23] F. da C. C. Martins, "Sistemas de Proteção de Fachadas Envidraçadas contra Explosões com Recurso a Tecnologias de Impressão 3D Engenharia Militar."
- [24] J. M. Biggs, *Introductions to Structural Dynamics*, Mcgraw-Hill. 1964.
- [25] PCB Piezotronics, "Model 137B32 ICP® Pressure Sensor Installation and Operating Manual."
- [26] W. Xiao, M. Andrae, and N. Gebbeken, "Air blast TNT equivalence factors of high explosive material PETN for bare charges," *J Hazard Mater*, vol. 377, 2019, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.05.078.
- [27] PCB Piezotronics, "Model 113B23 High frequency ICP® pressure sensor, 10k psi, 0.5 mV/psi, 0.218" dia. diaphragm, accel. comp. Installation and Operating Manual."
- [28] PCB Piezotronics, "Model 113B22 Platinum Stock Products; High frequency ICP® pressure sensor, 5000 psi, 1 mV/psi, 0.218" dia. diaphragm, accel. comp. Installation and Operating Manual."
- [29] PCB Piezotronics, "Model 622B01 Platinum Precision Industrial ICP® Accelerometer Installation and Operating Manual." [Online]. Available: www.pcb.com.
- [30] "EN 1993-1-1: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings."

- [31] Ansys, "LS-DYNA® KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME I," 1992. [Online]. Available: <https://lsdyna.ansys.com>