

• U C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

## **Sensibilidade ao Choque de Explosivos**

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

**Autor**

**Pedro Miguel Saraiva Cabral Fernandes**

**Orientador**

**Ricardo António Lopes Mendes**

**Júri**

	<b>Professor Doutor José Leandro Simões de Andrade</b>
<b>Presidente</b>	<b>Campos</b> <b>Professor Associado da Universidade de Coimbra</b> <b>Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva</b> <b>Ribeiro</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>
<b>Vogais</b>	<b>Professor Doutor Igor Plaksin</b> <b>Investigador Principal da ADAI da Universidade de Coimbra</b>
<b>Orientador</b>	<b>Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>



**Laboratório de  
Energética e Detónica**







## Agradecimentos

A realização do presente trabalho teria sido impossível sem o apoio e colaboração de várias pessoas, às quais quero expressar o meu agradecimento.

Ao **Professor Doutor Ricardo Mendes**, orientador da dissertação, por todos os conhecimentos que me transmitiu com coerência e paciência, pelo tempo que dedicou no auxílio da preparação dos ensaios experimentais, à orientação que prestou na aproximação inicial ao tema, quero deixar os meus agradecimentos.

Aos meus **Pais**, pelo apoio incondicional, paciência, e bom aconselhamento que me deram na realização deste trabalho e durante toda a jornada académica quero expressar os meus maiores agradecimentos. Todo este percurso seria impossível sem eles.

Ao meu irmão **João**, agradeço a orientação e conselhos de irmão mais velho, obrigado.

À **Laura Cruz** agradeço todo o carinho, apoio, paciência, tolerância e companhia que me dedicou durante a realização deste trabalho.

A todos os professores com quem tive oportunidade de trabalhar e aprender agradeço todos os conhecimentos transmitidos durante todo o meu percurso académico.

Aos meus amigos e colegas agradeço a sua amizade.

Agradeço também às seguintes instituições que me proporcionaram condições ótimas para a realização do presente trabalho:

**FCTUC – DEM:** Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Mecânica.

**LEDAP** – Laboratório de Energética e Detónica.



---

## Resumo

O presente trabalho tem como intuito avaliar a sensibilidade ao choque de explosivos plásticos, os quais apresentam diferentes dimensões no diâmetro dos cristais explosivos que os constituem.

De forma a estudar a sensibilidade ao choque realizou-se um estudo experimental no LEDAP, dividido em três etapas. Inicialmente, prepararam-se as fibras óticas e realizaram-se ensaios de calibração dos equipamentos e instrumentos permitindo registar temporalmente os eventos de interesse a captar na câmara de detonação. Posteriormente, procedeu-se à calibração do composto explosivo dador RU 81-18, caracterizando a onda de choque gerada pela detonação do mesmo. Finalmente, avaliou-se o tempo e a distância percorrida pela onda de choque proveniente da detonação do explosivo dador, até esta iniciar a detonação de uma carga recetora em forma de cunha.

A dimensão dos cristais de HMX nas formulações HMX-HTPB com um rácio mássico de 82/18% em massa, foi um parâmetro fundamental na comparação da sensibilidade ao choque avaliada para cada composto testado.

Averiguou-se que o composto HMX-HTPB ( $d_{50}=297\mu\text{m}$ ) apresentava uma distância até à detonação,  $H_D=1,069\text{mm}$  e um tempo até à detonação,  $t_D=0,208\mu\text{s}$ . Para o composto HMX-HTPB ( $d_{50}=53-63\mu\text{m}$ ), verificou-se uma distância até à detonação,  $H_D=0,883\text{mm}$  e um tempo até à detonação,  $t_D=0,168\mu\text{s}$ .

A composição P03-P04-HTPB ( $d_{50}(\text{P03})=130,925\mu\text{m}$ ,  $d_{50}(\text{P04})=11,06\mu\text{m}$ ) apresenta uma distância até à detonação,  $H_D=1,247\text{mm}$  e um tempo até à detonação,  $t_D=0,206\mu\text{s}$ . O composto P03-P05-HTPB ( $d_{50}(\text{P03})=130,925\mu\text{m}$ ,  $d_{50}(\text{P05})=1,64\mu\text{m}$ ) é caracterizado por uma distância até à detonação,  $H_D=1,549\text{mm}$  e um tempo até à detonação,  $t_D=0,230\mu\text{s}$ .

Neste estudo verificou-se que a redução do tamanho médio dos cristais de HMX nos compostos de PBX promovem a sensibilização dos materiais explosivos.

**Palavras-chave:** Sensibilidade, Explosivo, Onda de Choque, Fibras Óticas, HMX, HTPB, Cristais Explosivos.





## Abstract

This work has as objective to evaluate the shock sensitivity of explosives, which have different dimensions in the diameter of crystals that make their compounds.

In order to study the sensitivity to shock, an experimental study was conducted in LEDAP, and was divided into three stages. Initially the optical fibers were prepared, and assays were carried out in order to calibrate the equipment and instruments enabling recording the events of interest within the timing they occur inside the detonation chamber. Subsequently assays were conducted to calibrate the donor explosive compound RU 81-18, featuring the shock wave given by the material detonation. Finally, the run time and the run distance to detonation traveled by the shock wave in a wedge-shaped charge were measured.

The size of the HMX crystals HMX HTPB formulations with a mass ratio of 82/18% is an essential parameter for comparison of the sensitivity to shock evaluated for each compound tested.

It was found that the compound HMX-HTPB ( $d_{50}=297\mu\text{m}$ ) had a run distance to detonation,  $H_D=1,069\text{mm}$  and a time run to detonation,  $t_D=0,208\mu\text{s}$ . For the compound HMX HTPB ( $d_{50}=53-63\mu\text{m}$ ), the run distance to detonation is  $H_D=0,883\text{mm}$  and the run time to detonation,  $t_D=0,168\mu\text{s}$ .

The composition P03-P04-HTPB ( $d_{50}(\text{P03})=130,925\mu\text{m}$ ,  $d_{50}(\text{P04})=11,06\mu\text{m}$ ) has a run distance to detonation  $H_D=1,247\text{mm}$  and a time run to detonation,  $t_D=0,206\mu\text{s}$ . The compound P03-P05-HTPB ( $d_{50}(\text{P03})=130,925\mu\text{m}$ ,  $d_{50}(\text{P05})=1,64\mu\text{m}$ ) is characterized by a run distance to detonation,  $H_D=1,549\text{mm}$  and a run time to detonation,  $t_D=0,230\mu\text{s}$ .

In this study it was found that the decrease of the mean particle size of HMX crystals in the compounds PBX promote sensibilization of explosive materials.

**Keywords** Sensibility, Explosive, Shock wave, Optical fiber, HMX, HTPB, Explosive crystals.



## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xiii
Simbologia e Siglas .....	xv
Simbologia.....	xv
Siglas .....	xvi
1. Introdução.....	1
1.1. O Estado Atual da Arte, Motivação e Objetivos .....	1
1.2. Plano e Organização da Tese .....	3
2. Revisão Bibliográfica .....	5
2.1. Física Inerente ao Fenómeno da Detonação .....	5
2.1.1. Velocidade de Detonação .....	5
2.1.2. Pressão de Detonação .....	6
2.2. Ondas de Choque .....	7
2.2.1. Relações de Transição .....	7
2.2.2. Equação de Estado.....	8
2.2.3. Impedância a Ondas de Choque .....	10
2.2.4. Sensibilidade ao Choque de Explosivos.....	11
2.3. Materiais Explosivos e Explosivos Plasticamente Ligados .....	11
2.3.1. Substâncias Explosivas.....	11
2.3.2. Explosivos Plásticos .....	11
2.4. Ciclotrimetileno-Trinitramina, (RDX).....	12
2.5. Ciclotetrametileno-Tetranitramina, (HMX).....	13
2.6. Equipamento de Registo Ótico .....	14
2.6.1. Câmara Eletrónica de Varrimento Digital, CEVD .....	14
3. Materiais e Métodos .....	17
3.1. Preparação das Fibras Óticas .....	17
3.1.1. Aparato a Inserir na CEVD .....	17
3.1.2. Numeração individual das Fibras Óticas .....	18
3.1.3. Extremidade das Fibras Óticas ligada à Câmara de Detonação .....	19
3.2. Preparação dos Atenuadores de Choque.....	21
3.3. Preparação dos Tubos para as Cargas Cilíndricas .....	22
3.3.1. Cargas para os Ensaios de Caracterização do Explosivo Dador .....	22
3.3.2. Cargas para os Ensaios de Caracterização do Explosivo Recetor .....	23
3.4. Cunha de Confinamento do Explosivo Recetor.....	23
Montagem do <i>Trigger</i> .....	25
3.5. Configuração Experimental .....	26
3.6. Configuração dos Aparatos e Equipamentos .....	26
4. Análise e Discussão de Resultados.....	29
4.1. Caracterização do Explosivo Dador RU 81-18.....	29

4.1.1.	Composição do Explosivo.....	29
4.1.2.	Composição da Emulsão Explosiva.....	30
4.1.3.	Condições de Operação.....	30
4.1.4.	Fotocronogramas Dinâmicos de Caracterização do Explosivo Dador.....	31
4.1.5.	Análise Temporal e Espacial dos Fotocronogramas.....	32
4.1.6.	Avaliação da Velocidade, Curvatura e Pressão da Onda de Detonação originada pelo Explosivo Dador.....	35
4.2.	Caracterização dos Explosivos Recetores HMX-HTPB, teste em Cunha.....	40
4.2.1.	Composição do Explosivo Recetor.....	40
4.2.1.	Dimensão dos Cristais de HMX.....	40
4.2.2.	Condições de Operação.....	41
4.2.3.	Fotocronogramas Dinâmicos de Caracterização do Explosivos Recetores ..	42
4.2.4.	Propagação e Velocidade Instantânea da Onda de Detonação.....	43
4.2.5.	Sensibilidade ao Choque dos Explosivos Recetores.....	46
4.3.	Caracterização dos compostos explosivos recetores P03-P04-HTPB vs. P03-P05-HTPB, teste em Cunha.....	47
4.3.1.	Configuração Experimental.....	47
4.3.2.	Pressão de Choque.....	48
4.3.3.	Composição do Explosivo Recetor.....	50
4.3.4.	Fotocronograma Dinâmico de Caracterização do Explosivo Recetor.....	51
4.3.5.	Velocidade e Velocidade Instantânea da Onda de Choque.....	52
4.3.6.	Sensibilidade ao Choque dos Explosivos Recetores.....	53
5.	Conclusões.....	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
	ANEXO A.....	59
	ANEXO B.....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Representação esquemática da propagação de uma Frente de Onda de choque unidimensional plana com velocidade $U_s$ através de um meio inicialmente em repouso. ....	8
Figura 2-2. Curva Hugoniot do <i>kapton</i> para a relação $U_s-u_p$ [15] [23]. ....	9
Figura 2-3. Curva Hugoniot do <i>kapton</i> para a relação $P-u_p$ [15] [23]. ....	10
Figura 2-4. Estrutura química do RDX. ....	12
Figura 2-5. Estrutura química do HMX. ....	13
Figura 2-6. Princípio de funcionamento do tubo <i>streak</i> numa CEVD adaptado [9]. ....	14
Figura 2-7. <i>Timing</i> de Operação (coincidente com o tempo de varrimento), adaptado [9].	15
Figura 3-1. Aparato utilizado no auxílio à colagem das FO. ....	17
Figura 3-2. Aparato a inserir na CEVD. ....	18
Figura 3-3. Guias numeradas para reconhecimento das FO. ....	19
Figura 3-4. (a) FO para a medição da curvatura de detonação, (b) FO para a medição da velocidade de detonação. ....	20
Figura 3-5. Fotografia da montagem de FO para caracterização do explosivo recetor. ....	21
Figura 3-6. Atenuadores de choque em <i>kapton</i> . ....	21
Figura 3-7. Dimensões dos pormenores geométricos dos tubos em PVC (mm). ....	22
Figura 3-8. Dimensões da ranhura para alocação do <i>trigger</i> (mm). ....	23
Figura 3-9. Dimensões da cunha para contenção do explosivo (mm). ....	24
Figura 3-10. Representação esquemática da altura até à detonação em função do angulo da cunha. ....	24
Figura 3-11. Fotografia do <i>trigger</i> utilizado nos ensaios. ....	25
Figura 3-12. (a) Configuração de caracterização do explosivo dador, (b) Configuração em cunha de caracterização do explosivo recetor. ....	26
Figura 3-13. Esquema de ligação dos equipamentos, adaptado [6]. ....	27
Figura 4-1. Fotocronograma dinâmico obtido experimentalmente para o ensaio 1 de caracterização explosivo dador. ....	31
Figura 4-2. Fotocronograma dinâmico obtido experimentalmente para o ensaio 2 de caracterização explosivo dador. ....	31
Figura 4-3. Fotocronograma estático obtido experimentalmente para o fator de correção vertical do ensaio 2 de caracterização explosivo dador. ....	32

---

Figura 4-4. Fator de correção horizontal, obtido a partir da fotografia registada com recurso a um microscópio, das FO utilizada para medir a velocidade de detonação no ensaio 1 de caracterização do explosivo dador. ....	33
Figura 4-5. Fotocronograma dinâmico editado para o ensaio 1 de caracterização explosivo dador.....	33
Figura 4-6. Fotocronograma dinâmico editado para o ensaio 2 de caracterização explosivo dador.....	35
Figura 4-7. Representação gráfica propagação da OD para o ensaio 1 de caracterização do explosivo dador. ....	36
Figura 4-8. Representação gráfica da propagação da OD para o ensaio 2 de caracterização do explosivo dador. ....	36
Figura 4-9. Representação gráfica da velocidade instantânea da OD para o ensaio 1 de caracterização do explosivo dador. ....	37
Figura 4-10. Representação gráfica da velocidade instantânea da OD para o ensaio 2 de caracterização do explosivo dador. ....	37
Figura 4-11. Representação gráfica da curvatura da onda de choque para o ensaio 1 de caracterização do explosivo dador. ....	38
Figura 4-12. Representação gráfica da curvatura das ondas de choque a montante e a jusante do atenuador de choque em <i>kapton</i> para o ensaio 2 de caracterização do explosivo dador. ....	39
Figura 4-13. Fotocronograma dinâmico editado obtido experimentalmente para o ensaio 1 de caracterização explosivo recetor. ....	42
Figura 4-14. Fotocronograma dinâmico editado obtido experimentalmente para o ensaio 2 de caracterização explosivo recetor. ....	43
Figura 4-15. Representação gráfica da propagação da OD sobre a cunha de explosivo para o ensaio 1 de caracterização do explosivo recetor. ....	44
Figura 4-16. Representação gráfica da propagação da OD sobre a cunha de explosivo para o ensaio 2 de caracterização do explosivo recetor. ....	44
Figura 4-17. Representação gráfica da propagação da OD sobre a cunha de explosivo para o ensaio 1 e 2 de caracterização do explosivo recetor. ....	45
Figura 4-18. Evolução da velocidade Instantânea para o ensaio 1 de caracterização do explosivo recetor. ....	45
Figura 4-19. Evolução da velocidade Instantânea para o ensaio 2 de caracterização do explosivo recetor. ....	46
Figura 4-20. Configuração experimental para caracterização dos compostos explosivos P03-P04-HTPB vs. P03-P05-HTPB, adaptado [20]. ....	48
Figura 4-21. Representação gráfica da relação de Hugoniot $P-u_p$ para o PVC [15] [20]....	49
Figura 4-22. Fotocronograma dinâmico obtido experimentalmente para a caracterização dos explosivos recetores, adaptado [20]. ....	51

---

Figura 4-23. Propagação da OD para os explosivos recetores, P03-P04-HTPB vs. P03-P05-HTPB..... 52

Figura 4-24. Velocidade Instantânea dos explosivos recetores, P03-P04-HTPB vs. P03-P05-HTPB..... 53





---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1. Composição química do explosivo dador RU 81-18.....	29
Tabela 4.2. Composição da emulsão explosiva.....	30
Tabela 4.3. Condições de operação dos materiais e equipamentos para os ensaios de caracterização do explosivo dador. ....	30
Tabela 4.4. Velocidade média instantânea registada para os ensaios 1 e 2 de caracterização do explosivo dador. ....	38
Tabela 4.5. Pressão no <i>kapton</i> por ação da onda de choque decorrente da detonação do explosivo dador. ....	40
Tabela 4.6. Composição do explosivo dador.....	40
Tabela 4.7. Dimensão dos cristais de HMX para os ensaios de caracterização do explosivo recetor.....	41
Tabela 4.8. Condições de operação dos materiais e equipamentos para os ensaios de caracterização do explosivo recetor. ....	41
Tabela 4.9. Sensibilidade ao choque em função de $t_D$ e $H_D$ para os explosivos recetores. .	46
Tabela 4.10. Pressão da OC decorrente da detonação da carga dadora, imposta às cargas recetoras.....	49
Tabela 4.11. Composição do explosivo recetor.....	50
Tabela 4.12. Sensibilidade ao choque em função de $t_D$ e $H_D$ para os explosivos recetores, adaptado [20].....	53



---

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

C – Velocidade do som

D – Velocidade de detonação

$d_{50}$  – Tamanho médio dos cristais

E – Energia Interna

$H_D$  – Distância até à detonação

P – Pressão de detonação

s – Constante adimensional de aproximação linear

T – Temperatura

$t_D$  – Tempo até à detonação

$u_p$  – Velocidade das partículas do material

$U_s$  – Velocidade da onda de choque

Z – Impedância

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$  – Variantes polimórficas de HMX

$\gamma$  – Expoente politrópico de produtos de detonação

v – Volume específico

$\rho$  – Densidade

## Siglas

AC – Atenuador de choque

CEVD – Câmara eletrónica de varrimento digital

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EE – Emulsão Explosiva

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FO – Fibras Óticas

HMX – High Melting Explosive

HTPB – *Hydroxyl-terminated polybutadiene*

LEDAP – Laboratório de Energética e Detónica

MC – monitor de choque

MCP – Multichannel Plate

OC – Onda de choque

OD – Onda de detonação

PBX – *Polymer Bonded Explosives*

PETN – *Pentaerythritol tetranitrate*

PVC – Policloreto de vinil

RDX – *Research department explosive*

SMFO – Sonda múltipla de fibras óticas

TNT – *Trinitrotoluene*

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. O Estado Atual da Arte, Motivação e Objetivos

O uso de explosivos pensa-se remontar ao século VII d.C. quando os chineses descobriram e usaram a pólvora como explosivo, propulsor e fogo-de-artifício. Esta substância composta por carvão, enxofre e nitrato de potássio foi posteriormente introduzida na Europa no século XIII. Devido às limitações que a pólvora oferecia para operações de desmonte em minas e túneis, surgiram também na Europa novos materiais explosivos, a nitrocelulose e a nitroglicerina. Descobertos em meados do século XIX, estes viriam a originar uma nova classe de explosivos, os explosivos fracos. Estes apresentam uma taxa de queima lenta e controlada produzindo um grande volume de gases quentes que pode ser usado na propulsão de um projétil.

Os explosivos secundários nascem da necessidade de criar materiais explosivos mais energéticos. Esta necessidade crescente, especialmente, para uso militar no enchimento de bombas e de ogivas, dá origem à descoberta de materiais explosivos como o ácido pírico, a trinitramina TNT, o tetranitrato de pentaeritritol PETN, a Ciclotrimetileno-Trinitramina RDX, a Ciclotetrametileno-Tetranitramina HMX.

Esta nova classe de explosivos, embora mais energéticos, apresenta uma relativa insensibilidade a vários estímulos como: impacto, calor, fricção e faísca.

A necessidade de criar materiais energéticos insensíveis à detonação acidental, de forma a aumentar a segurança no armazenamento, transporte e manuseio destes materiais, traduz-se no aparecimento dos explosivos plasticamente ligados PBX. A inferior suscetibilidade de iniciação por choque e outros estímulos surge da ligação entre os cristais de explosivo e a matriz polimérica ligante, sendo esta composição responsável pelas propriedades do produto explosivo. A composição e as propriedades do material explosivo e do ligante são fatores muito importantes na otimização do produto garantindo sensibilidade adequada para a performance máxima.

A alteração das propriedades do material explosivo na composição explosiva plástica tem sido objeto de estudo por vários investigadores.

O trabalho realizado por Qiu *et al.* (2010) estudou a composição de RDX com base em micropartículas nano compósitas para uma reduzida sensibilidade ao choque, verificando que a sensibilidade ao choque do explosivo era reduzida devido ao pequeno tamanho de cristais de RDX e devido à pequena dimensão dos espaços vazios na composição explosiva [21]. A avaliação dos defeitos superficiais e o seu papel na sensibilidade ao choque de explosivos foi alvo de estudo por Bellitto e Melnik (2009), que constataram que os defeitos superficiais no explosivo influenciam a sensibilidade ao choque sendo a sua consistência na superfície particular, o fator chave na sensibilidade do produto explosivo [4].

A recristalização dos cristais explosivos de HMX na redução de micro defeitos superficiais na dessensibilização de explosivos foi alvo de estudo por parte de Plaksin *et al.* (2012). Neste estudo concluiu-se que a recristalização dos cristais explosivos para a redução de micro defeitos superficiais promovem a dessensibilização do explosivo. Verificou-se, ainda, que o ataque químico de partículas grandes, até total dissolução da camada superficial na qual há elevada concentração de defeitos cristalinos, também influencia na redução da sensibilidade à iniciação do explosivo [19].

O efeito da natureza do ligante polimérico e do tamanho cristalino de HMX na iniciação por choque e extinção à detonação foi estudado por Plaksin *et al.* (2004) onde se observou uma dependência clara da natureza do ligante e do tamanho cristalino do material explosivo na sensibilidade dos PBX. Nos testes de transição do choque até à detonação, os autores referem que o tamanho dos cristais de HMX influenciam a propagação da onda de detonação, enquanto nos testes de falha de detonação a natureza do ligante representa o parâmetro principal para caracterização destes ensaios [20].

Neste contexto, o objetivo fundamental do presente trabalho será avaliar a influência do tamanho dos cristais explosivos na sensibilidade ao choque de diferentes composições de PBX.

Objetivamente a sensibilidade de um explosivo será determinada pela altura mínima da coluna de explosivo para a qual ocorre a detonação total ou parcial do PBX testado. Este estudo teve como principal motivação a caracterização de misturas plásticas explosivas de forma a aumentar a segurança associada ao uso, manuseio, transporte e armazenamento de materiais energéticos.

## **1.2. Plano e Organização da Tese**

De modo a fazer uma abordagem simples e metódica dividiu-se a dissertação em cinco capítulos:

Capítulo 1- Capítulo introdutório, no qual se apresenta: o estado atual da arte, os objetivos e a motivação da dissertação de mestrado, bem como a estrutura do trabalho a realizar.

Capítulo 2 - Capítulo dedicado à revisão bibliográfica; é feita uma abordagem sobre a física e conceitos inerentes à detonação e às ondas de choque, o comportamento de materiais explosivos plásticos e o princípio de funcionamento de uma câmara eletrónica de varrimento digital ultrarrápida.

Capítulo 3 - Capítulo que se debruça sobre o procedimento experimental; para tal é feita a descrição dos métodos e materiais utilizados nos ensaios experimentais.

Capítulo 4 - Capítulo dedicado à análise experimental onde são apresentados os dados que advêm dos ensaios experimentais realizados, bem como o tratamento dos mesmos.

Capítulo 5 - Capítulo de apresentação das conclusões e ilações a retirar da utilização de diferentes diâmetros de cristais explosivos em compostos explosivos plásticos e a sua sensibilidade ao choque.





## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

No presente capítulo é feita uma abordagem aos conceitos e fenómenos associados à detonação de materiais explosivos, incluindo uma referência à propagação e resistência à propagação de ondas de choque.

Neste capítulo apresenta-se, também, uma descrição dos materiais explosivos utilizados, e é feita uma breve explicação do princípio de funcionamento de uma câmara eletrónica de varrimento digital.

### **2.1. Física Inerente ao Fenómeno da Detonação**

#### **2.1.1. Velocidade de Detonação**

Decorrente do processo de detonação, no qual um explosivo sofre reações químicas muito rápidas, é gerada uma onda de choque associada à geração de uma quantidade muito grande de energia denominada por onda de detonação.

Esta onda propaga-se pelo explosivo por meio de altas temperaturas e pressões geradas na frente de onda de detonação, garantindo que a reação química se inicia instantaneamente.

Normalmente, a propagação da onda de detonação ocorre a uma velocidade média constante sobre uma carga de material explosivo, sendo esta hipótese inviável quando a detonação ainda se encontra em fase inicial.

A velocidade de detonação é então definida pela taxa de velocidade de propagação das ondas de detonação num explosivo.

O confinamento, ou não, de materiais explosivos é um fator que influencia a velocidade de detonação sendo esta crescente quando a densidade de confinamento do material explosivo em coluna aumenta [2].

### 2.1.1.1. Efeito do diâmetro de confinamento na velocidade de detonação

Quando o confinamento do material explosivo é feito numa carga cilíndrica, a velocidade de detonação aumenta com o aumento do diâmetro de confinamento até um valor máximo.

A onda de detonação que percorre a carga em condições de estado estacionário é uma onda convexa que atinge sucessivamente camadas de material explosivo por iniciar, o que se traduz numa redução da velocidade de detonação do centro da carga para a sua periferia.

### 2.1.1.2. Efeito do Material Explosivo na Velocidade de Detonação

O material explosivo é uma característica que influencia diretamente a velocidade de detonação do material, é então dada pela Equação 2.1 [3]:

$$D = C + u_p \quad (2.1)$$

O pressuposto da velocidade de propagação  $D$  das ondas de choque no material explosivo à temperatura e pressão existentes na frente de onda de choque, ser igual à soma da velocidade do som no meio  $C$  com a velocidade das partículas do material  $u_p$  à medida que este se move para a frente na onda de choque é conhecido por condição de Chapman-Jouguet.

## 2.1.2. Pressão de Detonação

Num material explosivo a pressão de detonação corresponde à pressão de CJ-Champman-Jouguet, na onda de detonação. Num explosivo ideal, no ponto CJ é considerado que a reacção química está completa e a partir do qual ocorre a expansão dos produtos da detonação. Para a maioria dos explosivos secundários quando o grau de certeza não é fulcral, a pressão de detonação pode ser estimada de uma forma prática pela Equação 2.2 proposta por Cook [3]:

$$P = \frac{1}{(1 + \gamma)} \times \rho \times D^2 \quad (2.2)$$

Na qual:

P = Pressão de detonação

$\rho$  = Densidade do explosivo

D = Velocidade de detonação

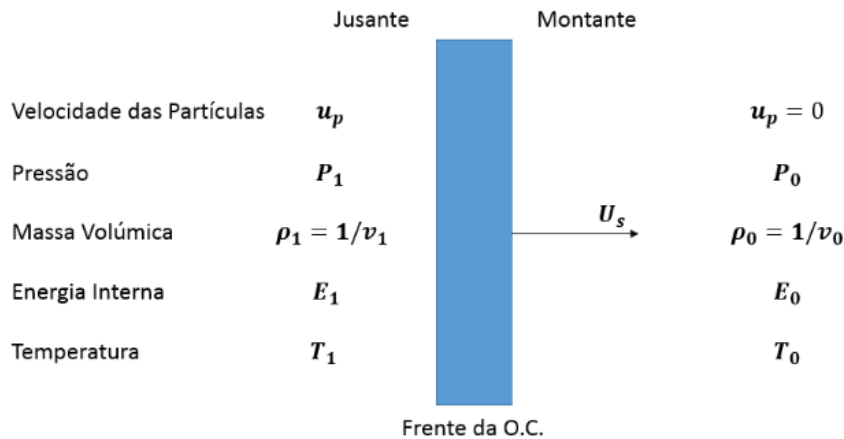
$\gamma$  = Expoente politrópico de produtos de detonação (=3 para explosivos fortes).

## **2.2. Ondas de Choque**

Para qualquer variação de pressão num ponto que se encontra num meio contínuo irá ocorrer uma correspondente variação da massa volúmica, traduzindo-se numa alteração da posição relativa das partículas. As ondas de choque resultam de variações fortes de pressão num determinado meio, sendo as suas velocidades superiores à velocidade do som nesse meio.

### **2.2.1. Relações de Transição**

O estado de um material, decorrente da passagem de uma onda de choque, pode ser caracterizado recorrendo a equações que relacionem parâmetros como a pressão  $P$ , a energia interna  $E$ , o volume específico  $v$  ou a densidade  $\rho$  antes e depois da passagem da onda de choque, em função da velocidade da onda de choque  $U_s$  e da velocidade das partículas  $u_p$ . Para análise das propriedades de um meio após a passagem de uma OC recorre-se às equações de conservação de massa, conservação de quantidade de movimento e conservação da energia. Estas Equações 2.3, 2.4 e 2.5 são designadas por relações de Rankine-Hugoniot e baseiam-se no pressuposto da OC ser um fenómeno unidimensional plano, propagando-se em regime permanente sobre o eixo  $xx$  com uma determinada velocidade através de um material em repouso. As leis de conservação vêm-se aplicadas sobre uma determinada área para um período de tempo conhecido como representado na Figura 2-1.



**Figura 2-1.** Representação esquemática da propagação de uma Frente de Onda de choque unidimensional plana com velocidade  $U_s$  através de um meio inicialmente em repouso.

#### 2.2.1.1. Conservação da Massa

$$\rho \times (U_s - u_p) = \rho_0 \times U_s \quad (2.3)$$

#### 2.2.1.2. Conservação da Quantidade de Movimento

$$P - P_0 = \rho_0 \times U_s \times u_p \quad (2.4)$$

#### 2.2.1.3. Conservação da Energia

$$E - E_0 = \frac{(P_0 + P) \times (v_0 - v)}{2} \quad (2.5)$$

### 2.2.2. Equação de Estado

De forma a obter um sistema de equações que tenha apenas uma variável independente, a partir das cinco variáveis presentes nas Equações 2.3, 2.4 e 2.5 que por elas são incapazes de determinar o estado do material após a passagem de uma onda de choque, recorre-se à Equação 2.6.

A equação de estado caracteriza o comportamento dos materiais nos quais se desenvolve o choque, sendo normalmente determinada via experimental. A curva de Hugoniot representa este parâmetro em função dos parâmetros experimentais de velocidade da onda de choque  $U_s$  e de velocidade das partículas do material  $u_p$ . Esta relação é normalmente linear para uma variedade de materiais e de aplicações de ondas de choque podendo ser escrita sobre a forma da Equação 2.6, onde  $C_0$  representa a velocidade do som

num meio não perturbado e  $s$  é uma constante adimensional com valores compreendidos entre 1,0 e 1,6.

$$U_s = C_0 + s \times u_p \quad (2.6)$$

A Equação 2.6 foi, inicialmente, introduzida em 1958 por Rice, McQueen e Walsh e incluía dados para 23 metais, no entanto o Compêndio de Ondas de Choque de Los Alamos para dados de Hugoniot apresenta aproximações lineares para a maioria dos materiais, incluindo metais e ligas metálicas, minerais, plásticos e explosivos por reagir [13] [18] [22] [23].

A curva de Hugoniot define o estado final de equilíbrio de uma material, quando sujeito a uma onda de choque, não descrevendo os pontos pelos quais o material passa quando está a ser impactado pela onda de choque, esta curva pode ser representada por três relações distintas.

A relação  $U_s-u_p$  representada na Figura 2-2 é normalmente a mais utilizada para descrever o estado final de uma material, mas este estado pode também ser avaliado com recurso à relação  $P-u_p$  representada na Figura 2-3 [15] [23]. A relação  $P-u_p$  é obtida a partir do diagrama  $U_s-u_p$ , retirando os valores de  $C_0$  e  $s$  que são respetivamente o valor da ordenada na origem, e o valor do declive da reta, determinados a partir de uma aproximação linear ajustada aos pontos experimentais do diagrama.

Os valores de volume específico e pressão correspondentes em cada ponto são determinados com recurso à Equação 2.3 e 2.4 respetivamente.

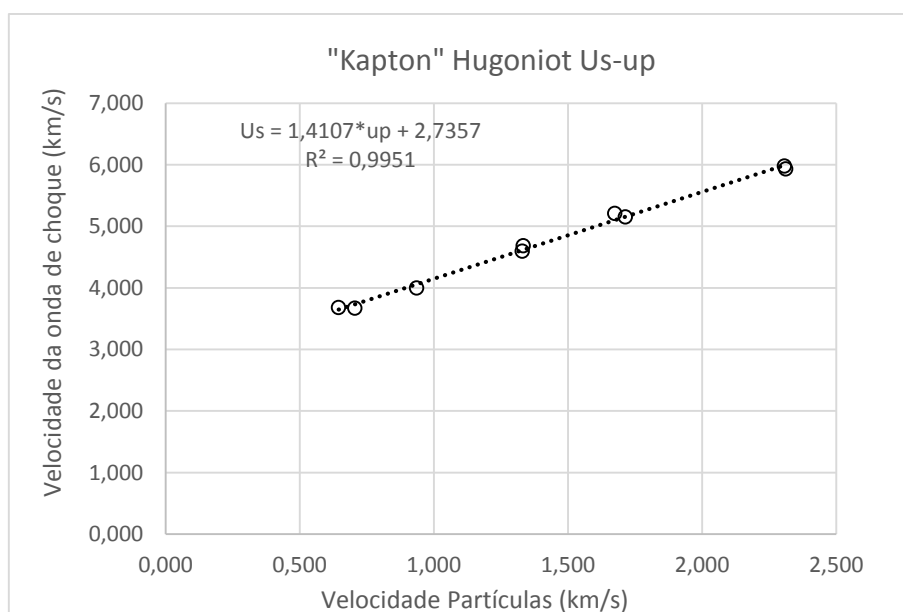


Figura 2-2. Curva Hugoniot do kapton para a relação  $U_s-u_p$  [15] [23].

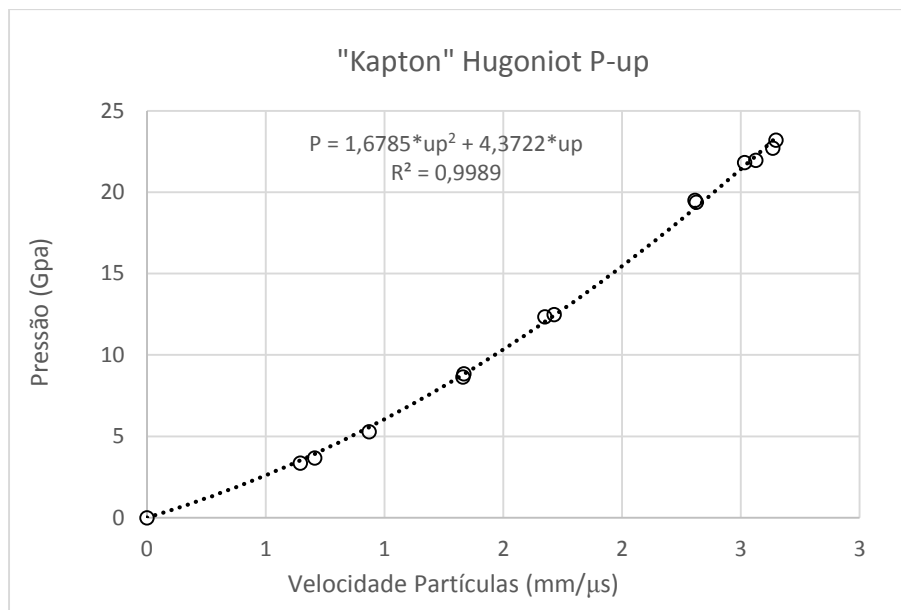


Figura 2-3. Curva Hugoniot do *kapton* para a relação  $P-u_p$  [15] [23].

### 2.2.3. Impedância a Ondas de Choque

A diferentes materiais, correspondem diferentes resistências à passagem de uma onda de choque. A impedância é então esta resistência normalmente designada por  $Z$  dada pela Equação 2.7 e está definida respetivamente pelo produto da densidade inicial do material e a velocidade da onda de choque que atravessa o material [7] [11] [25].

$$Z = \rho_0 \times U_s \quad (2.7)$$

#### 2.2.3.1. Interação entre Ondas de Choque, Adaptação de Impedâncias

A impedância de um material pode ser obtida graficamente, recorrendo ao declive da reta que passa no estado inicial e final no diagrama de Pressão-Velocidade das partículas desse material,  $P-u_p$ .

Para o caso de uma onda de choque atravessar dois materiais justapostos cuja interface entre eles tem pressão e velocidade particular idênticas, a propagação da onda sobre o material  $A$ , a uma pressão  $P_A$  e velocidade particular  $u_{pA}$  irá atingir a interface entre o material  $A$  e  $B$ , produzindo uma onda de choque em  $B$  que se propagará a uma velocidade particular  $u_{pB}$  com pressão  $P_B$ .

O método de adaptação de impedâncias consiste então em fazer coincidir o novo estado do material  $A$  com uma curva simétrica de Hugoniot em torno de uma assíntota vertical com coordenada horizontal  $u_p = u_{pA}$  [7] [24] [25].

#### **2.2.4. Sensibilidade ao Choque de Explosivos**

A sensibilidade ao choque de um explosivo representa a facilidade com que um material explosivo se inicia por meio de uma onda de choque; no presente trabalho esta onda de choque será produzida por outra carga explosiva.

Esta sensibilidade é também conhecida por *gap sensitivity* e pode ser medida avaliando a pressão mínima, para a qual a onda de choque provocada pelo explosivo dador causa a detonação completa do explosivo a testar.

O método para a avaliação desta sensibilidade consiste em sujeitar o explosivo de teste ao efeito de uma onda de choque com pressão conhecida. Esta onda de choque é gerada por uma carga calibrada sendo atenuada por um meio físico antes de atingir o explosivo de teste [14].

### **2.3. Materiais Explosivos e Explosivos Plasticamente Ligados**

#### **2.3.1. Substâncias Explosivas**

Um explosivo é uma substância que quando é oportunamente iniciada, liberta uma grande quantidade de calor e pressão. A reação de decomposição do material é autossustentável e exotérmica ocorrendo em apenas alguns microssegundos.

Uma substância química ou uma mistura de substâncias químicas também podem ser consideradas materiais explosivos, isto quando sujeitas a percussão, detonação, catálise ou calor sofrem uma decomposição acelerada, libertando uma grande quantidade de energia. Durante o processo é libertado um volume de gases muito maior que o volume de material explosivo.

Também é considerado um explosivo uma substância ou engenho que produza uma repentina explosão direcionada de gases, que exercem uma grande pressão sobre o ar circundante. Esta explosão decorre com a libertação da energia potencial da substância ou engenho [5] [8] [17].

#### **2.3.2. Explosivos Plásticos**

Considerados melhores que os explosivos convencionais, os explosivos plásticos ou PBX apresentam mais estabilidade térmica, maior compacidade, melhor performance e

maior estabilidade de processamento e manuseamento que as formulações mais convencionais de materiais explosivos.

Estas melhorias nas propriedades dos explosivos plásticos advêm da ligação que existe entre a substância ligante polimérica e os cristais de material explosivo que são aprisionados de forma individual na matriz de ligante, tornando o material explosivo mais insensível.

Atualmente, de forma a aumentar a performance dos explosivos plásticos substituíram-se as matrizes poliméricas inertes, por matrizes poliméricas energéticas.

Como matriz ligante o *Hydroxyl-terminated polybutadiene* HTPB revela-se capaz de melhorar a performance de uma composição de PBX, isto sem comprometer a sua vulnerabilidade à iniciação acidental [2] [16].

## 2.4. Ciclotrimetileno-Trinitramina, (RDX)

Conhecido por RDX (*Research department explosive*) ou Ciclonita devido à sua estrutura e natureza cíclica tal como representado na Figura 2-4 [1].

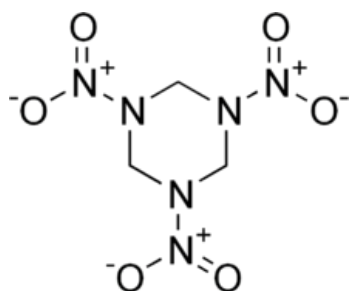


Figura 2-4. Estrutura química do RDX.

Esta substância é maioritariamente preparada por dois processos distintos.

No processo de nitrólise direta ou processo de Wollwich a substância é preparada tratando a tetramina hexametileno (hexamina) diretamente com um grande excesso de HNO<sub>3</sub> (densidade: 1,52 g/cm<sup>3</sup> e pureza de 99%) à temperatura de 20-25°C. Neste processo a hexamina é adicionada lentamente em pequenas quantidades.

Por outro lado, no processo de combinação ou processo *Bachmann* a mistura de reação contém ácido nítrico, nitrato de amónio, anidrido acético e ácido acético. O produto obtido apresenta elevada pureza sendo conhecido por RDX (B) que contém ≈10% HMX.

Trata-se de uma substância cristalina, sólida, branca com uma densidade de 1,82g/cm<sup>3</sup>. Esta é insolúvel na água, no álcool e no éter, ligeiramente solúvel em benzeno



quente e prontamente solúvel em anilina quente, nitrobenzeno e fenol. Devido à sua moderada solubilidade em acetona quente, esta é usada convenientemente na recristalização do RDX.

A importância do RDX revela-se devido às suas propriedades excepcionais: alta estabilidade química e grande poder explosivo.

Para uma densidade de  $1,77\text{g/cm}^3$  apresenta uma velocidade de detonação de  $8600\text{ m/s}$  e uma pressão de detonação de  $33,8\text{ GPa}$ .

## 2.5. Ciclotetrametileno-Tetranitramina, (HMX)

Conhecido por HMX (*High melting explosive* ou *Her Majesty's explosive*), apresenta a estrutura química representada na Figura 2-5 [1].

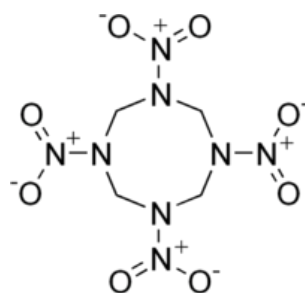


Figura 2-5. Estrutura química do HMX.

Inicialmente descoberto por *Bachmann*, em 1941, por modificação do processo de combinação para a preparação de RDX. O principal produto obtido é HMX e a sua purificação remove o RDX, convertendo o HMX na sua forma  $\beta$ . É preparado fazendo a nitração da hexamina dissolvida em ácido acético glacial, recorrendo ao nitrato de amônio dissolvido no ácido nítrico (pureza mínima 98%) em presença, com excesso de anidrina acética e p-formaldeído como catalisador.

O HMX é uma substância cristalina branca que existe em quatro variantes polimórficas, sendo a formulação  $\beta$  a mais estável e insensível. Para uma densidade de  $1,90\text{ g/cm}^3$  o  $\beta$ -HMX apresenta uma velocidade de detonação de  $9100\text{ m/s}$  e uma pressão de detonação de  $39,5\text{ GPa}$ .

As formulações  $\alpha$  e  $\gamma$  existem à temperatura ambiente mas todas se transformam em  $\delta$  polimórfico quando expostas acima de  $160^\circ\text{C}$ .

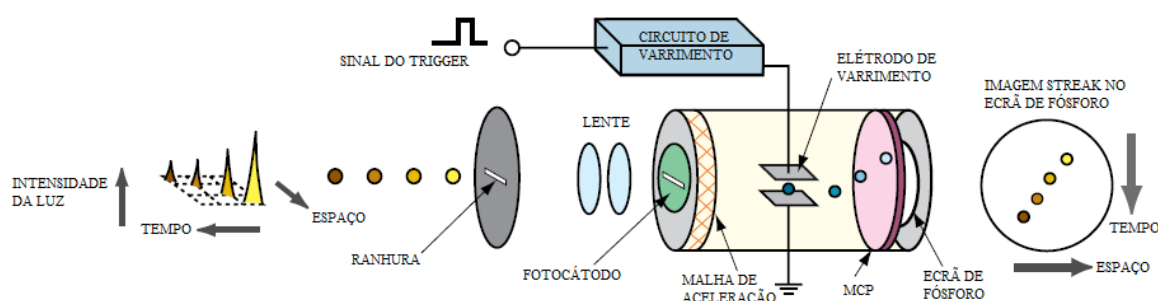
O HMX é considerado superior ao RDX devido à sua maior estabilidade química, maior velocidade de detonação, maior temperatura de ignição e maior densidade.

Atualmente em uso, o HMX é o explosivo militar mais brisante. A brisância é o parâmetro que mede a capacidade de um explosivo estilhaçar.

## 2.6. Equipamento de Registo Ótico

### 2.6.1. Câmara Eletrónica de Varrimento Digital, CEVD

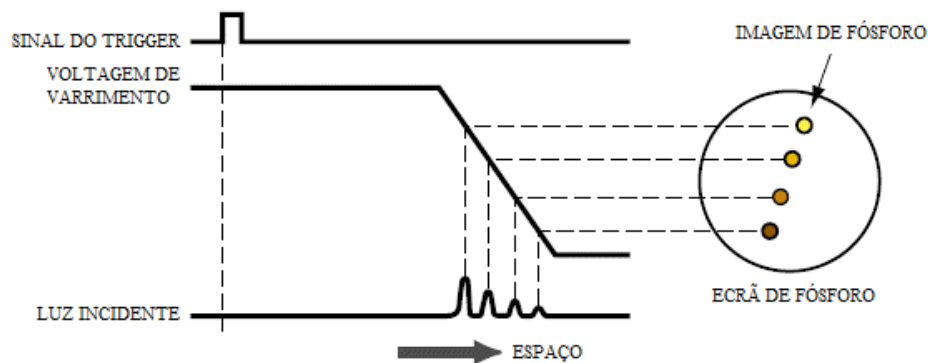
Uma câmara eletrónica de varrimento digital ou *streak camera* é um aparelho capaz de medir fenómenos ultrarrápidos de luz, possibilitando registar estes fenómenos em função do tempo, do espaço e da intensidade da luz.



**Figura 2-6.** Princípio de funcionamento do tubo *streak* numa CEVD adaptado [9].

Através da Figura 2-6 pode ver-se esquematicamente o princípio de funcionamento do tubo *streak* de uma CEVD. Inicialmente os quatro fenómenos de luz, diferentes em tempo de chegada, posição e intensidade de luz, atravessam a ranhura da câmara e chegam ao foto-cátodo do tubo de *streak*. Aí, os fenómenos luminosos são, então, transformados sequencialmente num número de elétrons proporcionais à intensidade da luz, sendo estes posteriormente acelerados por um par de eletrodos que os disparam contra um ecrã de fósforo.

Enquanto os elétrons produzidos pelos impulsos óticos passam por dois eletrodos de varrimento, alta voltagem é induzida aos eletrodos de maneira a varrer os elétrons de forma sincronizada com o fenómeno de luz, dando início a um varrimento de alta velocidade. Este fenómeno encontra-se esquematizado na Figura 2-7.



**Figura 2-7.** *Timing* de Operação (coincidente com o tempo de varrimento), adaptado [9].

Aquando do varrimento de alta velocidade, os eletrões, que chegaram em momentos distintos, são defletidos em ângulos ligeiramente diferentes dos da direção vertical entrando, então, na placa de micro canais ou MCP.

No momento em que os eletrões passam a MCP são multiplicados vários milhares de vezes sendo, então, projetados contra um ecrã de fósforo onde são convertidos novamente em luz.

A imagem obtida no ecrã de fósforo tem um eixo de tempo na sua direção vertical, e um eixo de espaço (distância) na sua direção horizontal, sendo a luminosidade da imagem de fósforo proporcional à intensidade dos fenómenos óticos captados.

Desta maneira, uma CEVD pode ser utilizada na conversão de variações espaciais e temporais da intensidade da luz, sendo medida por meio de uma imagem que revela a distribuição de brilho no ecrã de fósforo.

Pode-se também registar a intensidade ótica proveniente da imagem de fósforo, bem como o tempo e a localização da luz incidente provenientes da imagem de fósforo, por meio digital ou analógico [9] [10].



### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve todas as montagens experimentais necessárias para a realização dos ensaios experimentais.

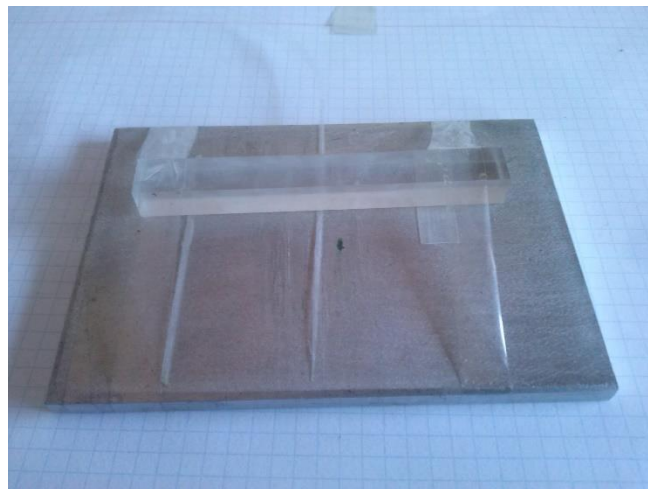
#### 3.1. Preparação das Fibras Óticas

Recorreu-se a um cabo de fibras óticas para efetuar a ligação entre o explosivo e a CEVD. Este cabo consiste numa carnagem plástica que protege 64 fibras óticas cilíndricas individuais com diâmetro de 250 $\mu$ m cada.

Em cada extremidade foi necessário proceder a algumas alterações essenciais de forma a garantir que a visualização da extremidade inserida na CEVD fosse em forma de uma fita linear de fibras e que na extremidade oposta o espaçamento entre as fibras estivesse perfeitamente determinado.

##### 3.1.1. Aparato a Inserir na CEVD

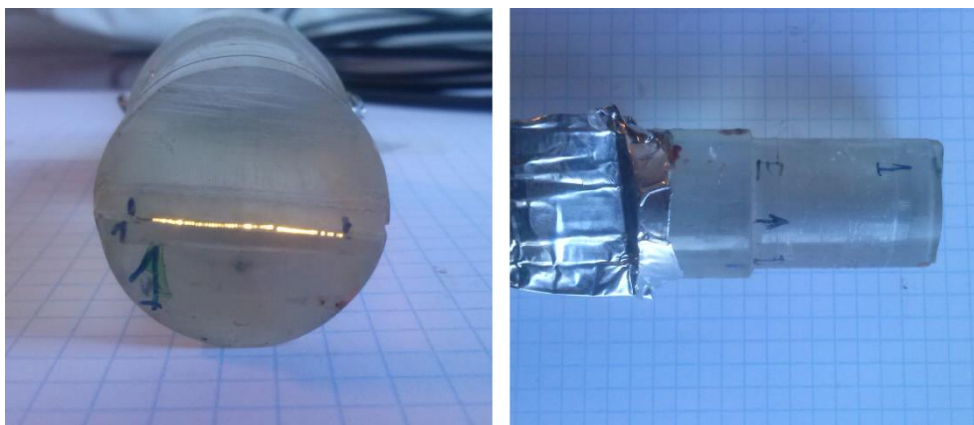
Na extremidade a inserir na CEVD, inicialmente, colaram-se as fibras lado a lado em conjuntos de seis. Para realizar esta colagem recorreu-se a uma cola de cianoacrilato de colagem rápida que garante a integridade das fibras óticas FO e a um aparato representado na Figura 3-1 que garante que as fibras não se sobrepõem umas sobre as outras.



**Figura 3-1.** Aparato utilizado no auxílio à colagem das FO.

Inicialmente, os vários conjuntos de seis fitas foram colados entre si recorrendo aos materiais referidos para fazer a montagem anterior, de modo a formar uma fita de 64 fibras óticas.

Posteriormente, confinou-se a fita de fibras óticas entre duas peças de acrílico com uma forma semicilíndrica. Para tal centrou-se a fita, em relação às duas peças semicirculares, e colou-se a mesma a uma das peças com o auxílio de uma cola de cianoacrilato. Finalmente, colaram-se as duas peças com uma cola de epóxi formando um cilindro com a fita no meio, sendo a extremidade polida de maneira a garantir uma visualização clara por parte da CEVD. O aparato experimental a inserir na CEVD encontra-se representado na Figura 3-2.



**Figura 3-2.** Aparato a inserir na CEVD.

### **3.1.2. Numeração individual das Fibras Óticas**

Foi feita uma numeração das fibras recorrendo a guias numeradas inseridas em cada fibra. Este processo foi feito justamente após a montagem do aparato a inserir CEVD de forma a possibilitar um arranjo ordeiro segundo uma certa ordem de acendimento luminoso das fibras.

A numeração e ordenação possibilitou reconhecer cada fibra ótica individualmente nos fotocronogramas obtidos experimentalmente. A Figura 3-3 representa as guias, numeradas, criadas para reconhecer cada fibra individualmente.

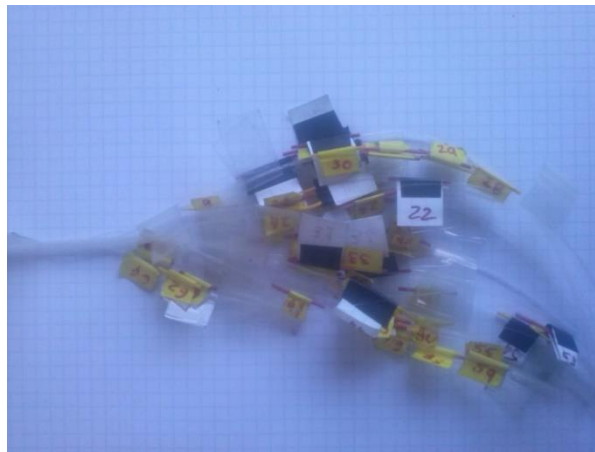


Figura 3-3. Guias numeradas para reconhecimento das FO.

### 3.1.3. Extremidade das Fibras Óticas ligada à Câmara de Detonação

#### 3.1.3.1. Ensaio de Caracterização do Explosivo Dador

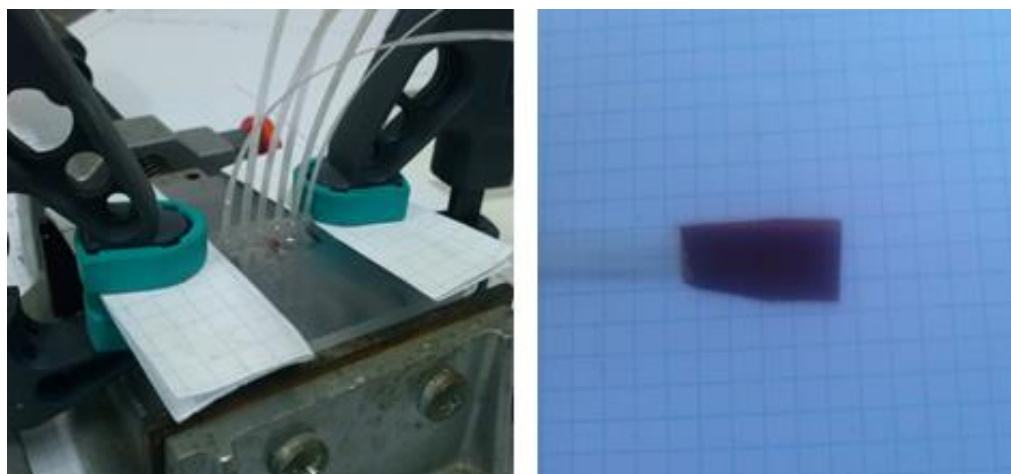
Na extremidade a colocar na câmara de detonação, dividiram-se as fibras óticas em dois conjuntos, sendo um deles utilizado para medir a curvatura de detonação e o outro para medir a velocidade de detonação.

Recorreu-se ao processo feito inicialmente na extremidade a inserir na CEVD. Após as fibras estarem coladas em grupos de seis, utilizaram-se seis grupos para a medição da curvatura de detonação, perfazendo um total de 36 fibras, sendo as restantes fibras utilizadas para medir a velocidade de detonação.

Na medição da curvatura de detonação, usaram-se duas placas acrílicas paralelepípedicas entre as quais se fez o confinamento dos sete conjuntos de fibras óticas. Para tal colaram-se os seis conjuntos a uma das placas de acrílico por meio de uma cola de cianoacrilato.

Estes conjuntos foram colados de maneira a que o espaçamento entre eles estivesse rigorosamente definido, garantindo que a soma dos comprimentos dos diâmetros das fibras com o comprimento dos espaçamentos entre os seis conjuntos perfizesse o comprimento correspondente ao diâmetro da carga explosiva.

Finalmente, uniram-se as duas peças acrílicas por meio de uma cola epóxi, obtendo uma placa sobre a qual assentou a carga explosiva cilíndrica, centrada com os seis conjuntos de fibras. A Figura 3-4 (a) representa o aparato montado para medir a curvatura de detonação.



(a)

(b)

**Figura 3-4.** (a) FO para a medição da curvatura de detonação, (b) FO para a medição da velocidade de detonação.

Para a medição da velocidade de detonação, colaram-se as 24 fibras por meio de uma cola de cianoacrilato e um aparato que garantisse que as fibras não se sobrepunham umas às outras, minimizando o espaçamento entre elas, formando uma fita de fibras ordenadas.

Posteriormente, colaram-se duas folhas de *kapton* com uma espessura de  $50\mu\text{m}$  perfeitamente ajustadas sobre cada face da extremidade da fita de 24 fibras óticas.

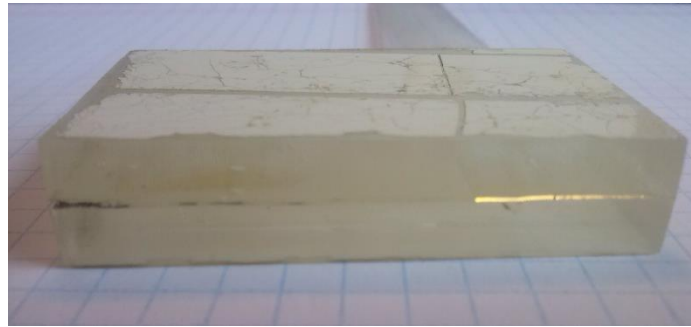
A montagem feita para medir a velocidade de detonação encontra-se representada na Figura 3-4 (b).

### **3.1.3.2. Ensaios para a Caracterização do Explosivo Recetor**

Para os ensaios cuja finalidade será medir a sensibilidade do explosivo, na extremidade a inserir na câmara de detonação colaram-se as fibras óticas, de forma ordenada em fita, com o auxílio de uma cola de cianoacrilato e o aparato que garantisse a não sobreposição das fibras.

Esta fita de fibras óticas é composta por 54 fibras individuais que posteriormente foi colada por meio de uma cola de epóxi entre duas placas de acrílico como representado na Figura 3-5.



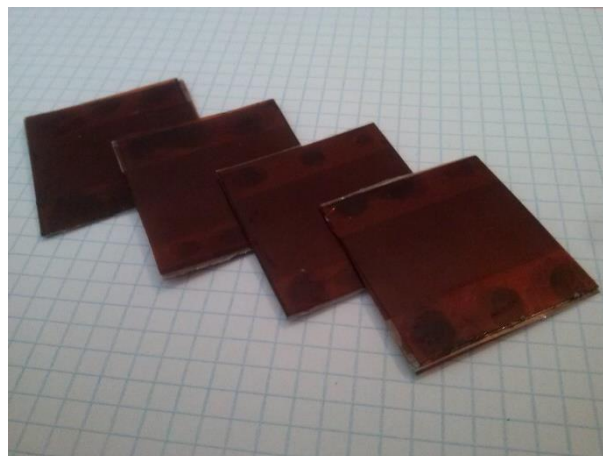


**Figura 3-5.** Fotografia da montagem de FO para caracterização do explosivo recetor.

### 3.2. Preparação dos Atenuadores de Choque

Prepararam-se atenuadores de choque em *kapton*, colando quadrados de dimensão 40 x 40mm e espessura 125 $\mu$ m, para o primeiro ensaio de caracterização do explosivo dador, uns sobre os outros. A colagem foi feita com uma cola de cinoacrilato e foram coladas, apenas, duas das extremidades laterais dos quadrados de *kapton* garantindo que entre as folhas houvesse a presença de ar [20].

Para os restantes ensaios, foram feitos os mesmos atenuadores, mas a espessura das folhas de *kapton* era de 125 $\mu$ m, pois no primeiro ensaio, no fotocronograma dinâmico obtido a passagem da onda de choque pelo atenuador não se encontra representada. A montagem obtida encontra-se representada na Figura 3-6.



**Figura 3-6.** Atenuadores de choque em *kapton*.

### 3.3. Preparação dos Tubos para as Cargas Cilíndricas

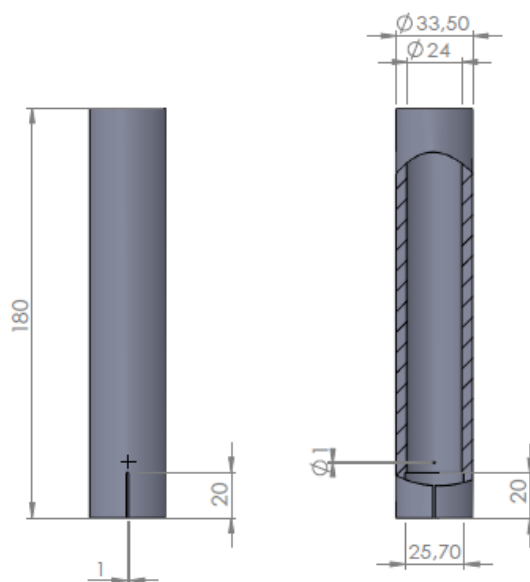
Na preparação das cargas cilíndricas, optou-se pelo uso de tubos em PVC para conter a carga explosiva bem como a emulsão explosiva com o diâmetro interno e externo de, comprimento mm.

#### 3.3.1. Cargas para os Ensaios de Caracterização do Explosivo Dador

Os tubos em policloreto de vinil PVC foram maquinados de maneira a obter diferentes diâmetros internos do tubo. Posteriormente, fez-se um furo lateral nos tubos, perpendicular à sua espessura, para inserir o *trigger* que aciona a CEVD.

Fez-se também um corte lateral sobre toda a espessura, na parte inferior dos tubos, de maneira a inserir a fita de fibras óticas que irá medir a velocidade de detonação.

Adicionalmente, fizeram-se furos laterais para que a emulsão contida dentro do tubo se pudesse arranjar de forma homogênea eliminando a presença de ar. As dimensões dos pormenores geométricos encontram-se representadas na Figura 3-7.



**Figura 3-7.** Dimensões dos pormenores geométricos dos tubos em PVC (mm).

### 3.3.2. Cargas para os Ensaios de Caracterização do Explosivo Recetor

Para os ensaios de caracterização do explosivo recetor utilizaram-se tubos em PVC, com o mesmo tipo de maquinação, de forma a obter os mesmos diâmetros internos obtidos nos ensaios de caracterização do explosivo dador.

Criou-se uma ranhura na face dos cilindros de forma a atravessar toda a espessura do tubo em PVC e a espessura do cilindro que contém o explosivo dador.

Esta ranhura possibilitou a inserção do *trigger* diretamente em contacto com a substância explosiva de forma a acionar a CEVD com o *timing* de interesse que será a altura em que a onda de choque atravessa o explosivo recetor e atinge as fibras óticas que captam a detonação, ou não deste. A Figura 3-8 mostra as dimensões da profundidade e do afastamento da ranhura ao final do tubo.

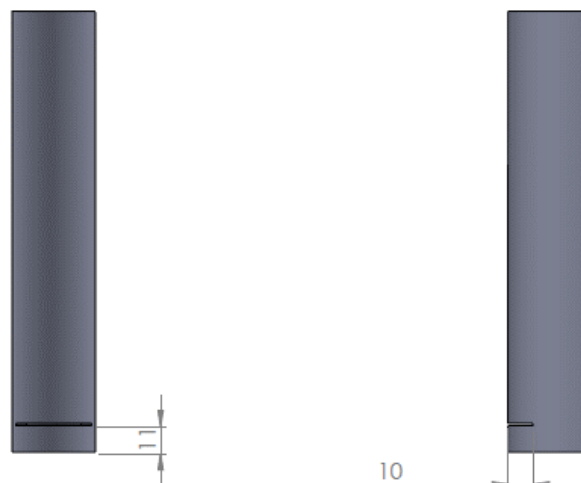
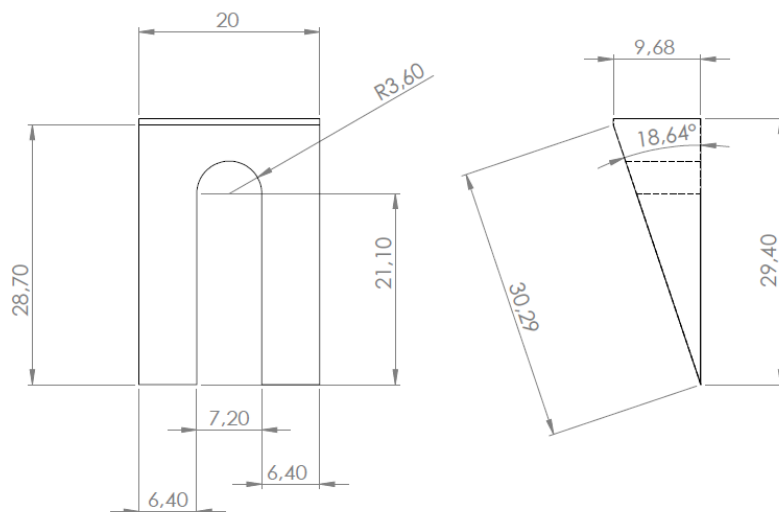


Figura 3-8. Dimensões da ranhura para alocação do *trigger* (mm).

### 3.4. Cunha de Confinamento do Explosivo Recetor

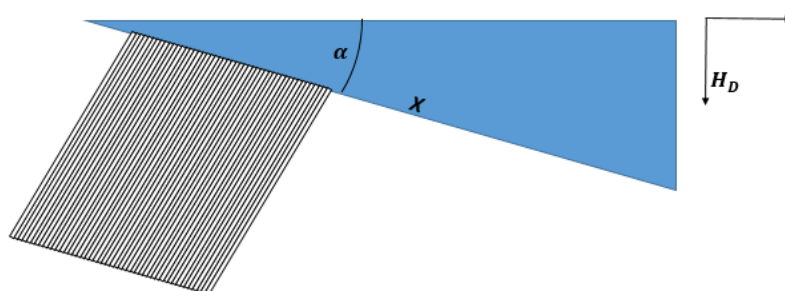
Para poder conter o explosivo a testar maquinaram-se cunhas acrílicas de dimensões perfeitamente conhecidas como representado na Figura 3-9.



**Figura 3-9.** Dimensões da cunha para contenção do explosivo (mm).

Estas assumem também um papel fulcral no objetivo do presente trabalho, pois a variação da altura da cunha com o seu afastamento permite verificar pelas fibras óticas a que altura o explosivo recetor detonou, sendo este parâmetro fundamental para os ensaios experimentais e resultados deste trabalho.

A Figura 3-10 representa esquematicamente a montagem das FO na cunha sendo a altura da cunha dada em função da Equação 3.1.



**Figura 3-10.** Representação esquemática da altura até à detonação em função do angulo da cunha.

$$H_D = x \times \sin(\alpha) \tag{3.1}$$

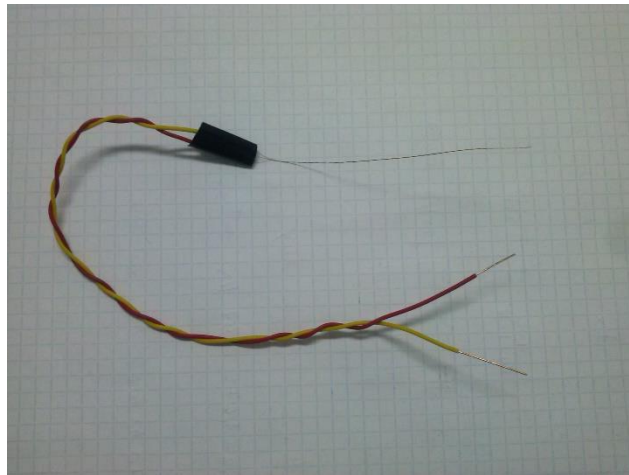
## Montagem do *Trigger*

A montagem de um aparato, denominado por *trigger*, foi necessária para a realização de cada ensaio experimental, dado este ser fundamental para a sua exata caracterização. Este pequeno engenho tem como função dar sinal à CEVD para iniciar o varrimento de eletrões na câmara escura.

Este pequeno aparato consiste num cabo coaxial ligado a um entrelaçado de dois fios de cobre protegidos, nos quais é soldado um fio de cobre de pequenas dimensões, revestido por uma carnagem reduzida de verniz. Este pequeno fio de cobre, por sua vez, é entrelaçado sobre si próprio, sendo cortada a extremidade do entrelaçado de forma a garantir que o circuito formado pelos dois fios fique em aberto.

No momento do ensaio, o *trigger* é inserido na carga explosiva de forma que, quando ocorrer a detonação, a pressão libertada decorrente deste processo faça com que a carnagem de verniz se desintegre originando o contacto entre os dois fios do entrelaçado fechando o circuito elétrico e dando início ao varrimento da CEVD.

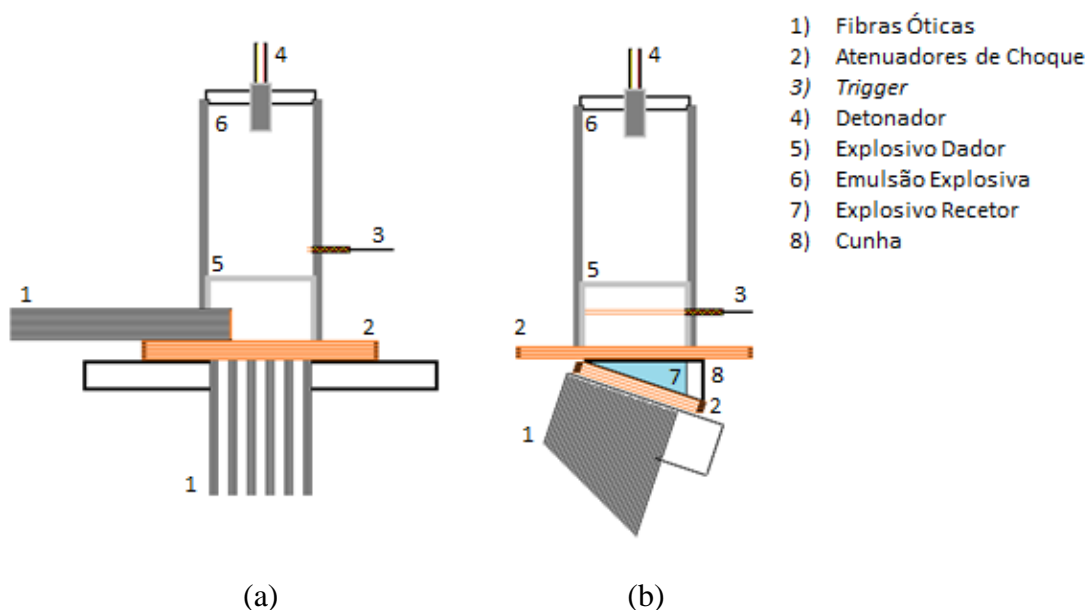
A Figura 3-11 representa o *trigger* típico utilizado nos ensaios experimentais.



**Figura 3-11.** Fotografia do *trigger* utilizado nos ensaios.

### 3.5. Configuração Experimental

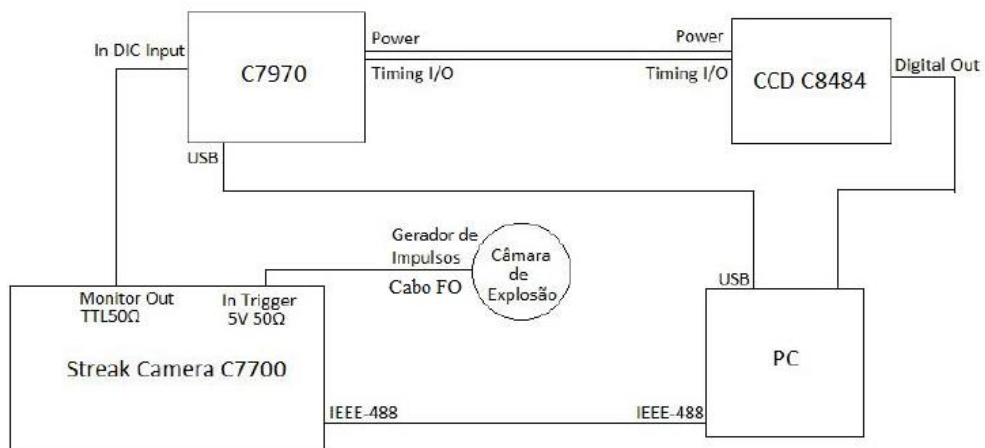
Os aparatos experimentais utilizados nos dois ensaios feitos para avaliar as características do explosivo dador, e nos dois ensaios para avaliar a sensibilidade do explosivo recetor, encontram-se representados na Figura 3-12.



**Figura 3-12.** (a) Configuração de caracterização do explosivo dador, (b) Configuração em cunha de caracterização do explosivo recetor.

### 3.6. Configuração dos Aparatos e Equipamentos

A configuração que faz a ligação entre os aparatos experimentais e os equipamentos de aquisição e análise de dados encontram-se representados esquematicamente como representado na Figura 3-13.



**Figura 3-13.** Esquema de ligação dos equipamentos, adaptado [6].





## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo é feita uma análise dos fotocronogramas obtidos via experimental, permitindo conhecer a velocidade de detonação, curvatura de onda de detonação e pressão de detonação do explosivo que irão dar o choque ao explosivo recetor para o qual se quer testar a sensibilidade.

A sensibilidade ao choque dos compostos testados será feita com base no tamanho dos cristais explosivos na mistura HMX-HTPB.

### 4.1. Caracterização do Explosivo Dador RU 81-18

#### 4.1.1. Composição do Explosivo

Realizaram-se dois ensaios de caracterização do explosivo dador, este apresenta uma densidade de 1,578 g/cm<sup>3</sup> e a sua composição química encontra-se apresentada na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1.** Composição química do explosivo dador RU 81-18.

Componente	Ligante (%)	Composição (%)	Massa (g)
<i>Flexzone 6H</i>	0,068	0,01	0,10
IDP	30,405	4,50	45,00
<i>Dantocol DHE</i>	0,676	0,10	1,00
HTPB R45-HT	61,216	9,06	90,60
IPDI	7,635	1,13	11,30
RDX (tipo C)	-	56,10	561,00
RDX (tipo E)	-	28,90	289,00
Lecitina	-	0,20	2,00
Total	100,000	100,00	1000,00

#### 4.1.2. Composição da Emulsão Explosiva

A utilização de uma emulsão explosiva EE foi necessária para garantir a iniciação da carga dadora. Esta emulsão foi utilizada nos ensaios de caracterização do explosivo recetor e dador. A matriz de emulsão foi sensibilizadas com 5% de micro-esferas ocas de perlite com um diâmetro médio de 70 $\mu$ m. A Tabela 4.2 apresenta a composição da EE utilizada.

A densidade média da emulsão é de 1,057 g/cm<sup>3</sup> e apresenta uma velocidade de detonação de 5 km/s.

**Tabela 4.2.** Composição da emulsão explosiva.

Componente	Composição (%)	Massa (g)
Micro Esferas de Vidro	5,0	7,50
Matriz	95,0	142,53
Total	100,0	150,09

#### 4.1.3. Condições de Operação

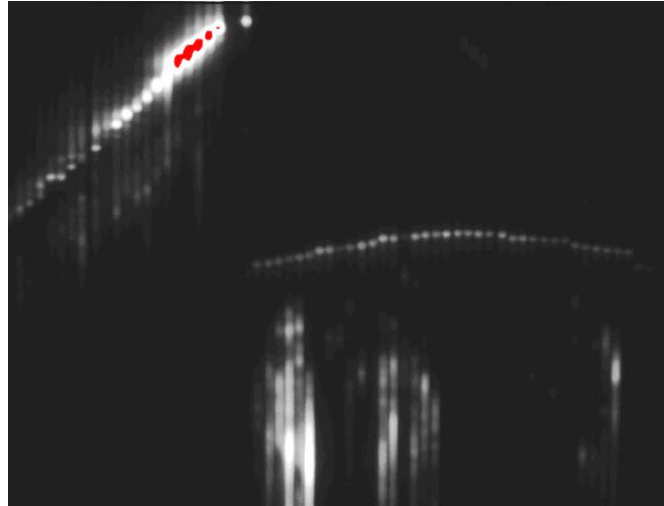
As condições definidas inicialmente em cada ensaio experimental, para os equipamentos e materiais encontram-se na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3.** Condições de operação dos materiais e equipamentos para os ensaios de caracterização do explosivo dador.

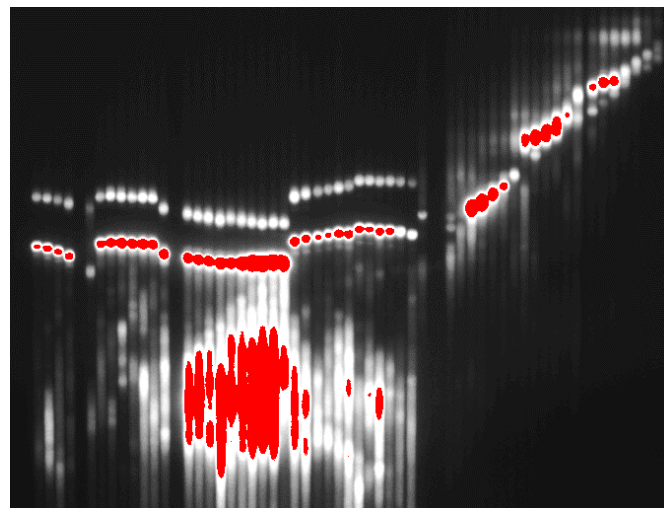
Parâmetro	Ensaio 1	Ensaio 2
Atraso do <i>Trigger</i> ( $\mu$ s)	2,47	2,47
<i>Binning</i>	1x1	2x2
Resolução Vertical (pixel)	1024	512
<i>Sweep Range</i> ( $\mu$ s)	2	2
Tempo de Exposição ( $\mu$ s)	400	600

#### 4.1.4. Fotocronogramas Dinâmicos de Caracterização do Explosivo Dador

Decorrentes dos dois ensaios, para caracterização do explosivo dador, obtiveram-se os respetivos fotocronogramas representados na Figura 4-1 e na Figura 4-2.



**Figura 4-1.** Fotocronograma dinâmico obtido experimentalmente para o ensaio 1 de caracterização explosivo dador.



**Figura 4-2.** Fotocronograma dinâmico obtido experimentalmente para o ensaio 2 de caracterização explosivo dador.

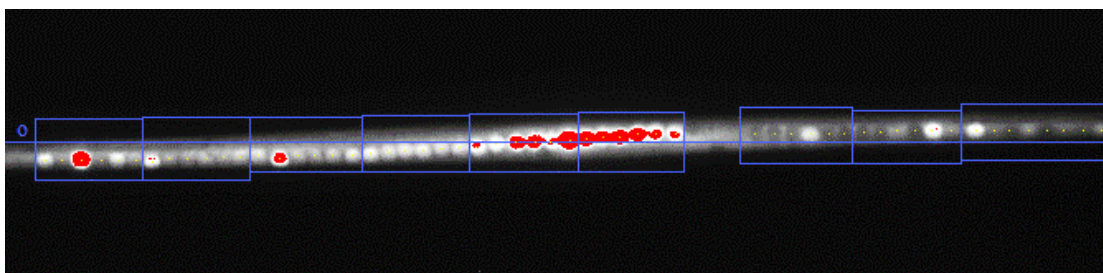
#### 4.1.5. Análise Temporal e Espacial dos Fotocronogramas

##### 4.1.5.1. Parâmetros de correção

De forma a representar graficamente os eventos registados nos fotocronogramas, transformou-se o centro de cada ponto luminoso correspondente ao centro de cada FO individual de coordenadas dadas em pixéis, num sistema ordenado de dados cujas coordenadas verticais correspondem a tempo e as coordenadas horizontais correspondem a distância. A tradução das coordenadas verticais em pixéis das FO em tempo foi possível através do conhecimento da resolução das imagens e do tempo de varrimento da CEVD. A Tabela 4.3 apresenta a resolução vertical dos fotocronogramas em pixéis e o tempo de varrimento correspondente. A transformação das coordenadas horizontais em pixéis, dadas pela imagem, foi feita com base no diâmetro de uma FO ser de  $250\mu\text{m}$  que corresponde a um determinado número de pixéis na imagem.

De forma a garantir coerência nos dados experimentais obtidos, surgiu a necessidade de criar dois fatores de correção, um horizontal e outro vertical.

O fator de correção vertical corrige o tempo para o qual a CEVD regista o fenómeno de luz. Esta correção é feita dado a colagem da fita de FO a inserir na CEVD não ter ficado perfeitamente alinhada com a horizontal e a sua posição em relação ao *slit* da CEVD não ser perfeitamente horizontal. Para criar este fator recorreu-se ao fotocronograma estático obtido em cada ensaio pelo qual se fez passar uma linha reta intermédia com o afastamento vertical de cada fibra, medindo-se posteriormente a distância de cada centro das FO à linha intermédia. A Figura 4-3 representa o fator de correção vertical para o ensaio 2 de caracterização do explosivo dador.



**Figura 4-3.** Fotocronograma estático obtido experimentalmente para o fator de correção vertical do ensaio 2 de caracterização explosivo dador.

Para corrigir o afastamento horizontal entre os centros de cada FO individual que teoricamente seria de  $250\mu\text{m}$ , mas devido a defeitos nas colagens efetuadas não é exatamente  $250\mu\text{m}$ , criou-se o fator de correção horizontal que garante que o afastamento entre os

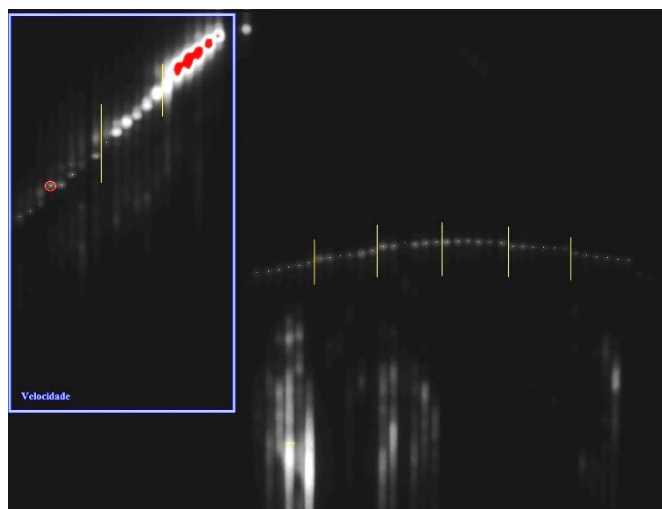
centros das FO é o afastamento exato. Para tal, tiraram-se fotografias com recurso a um microscópio às extremidades das FO que seriam montadas nos aparatos. Nestas imagens criou-se uma linha horizontal e marcou-se o centro da primeira FO, a partir desta primeira marcação usada para referencial mediu-se o afastamento horizontal dos restantes centros das FO a este ponto em pixéis. A distância convertida de pixéis para  $\mu\text{m}$  é feita com base no diâmetro de  $250\mu\text{m}$  de uma FO corresponder a um determinado número de pixéis na fotografia. A Figura 4-4 representa a fotografia utilizada para obter o fator de correção horizontal para o ensaio 1 de caracterização do explosivo dador.



**Figura 4-4.** Fator de correção horizontal, obtido a partir da fotografia registada com recurso a um microscópio, das FO utilizada para medir a velocidade de detonação no ensaio 1 de caracterização do explosivo dador.

#### 4.1.5.1. Análise ao Fotocronograma Dinâmico obtido experimentalmente para o Ensaio 1 de Caracterização do Explosivo Dador

A partir do fotocronograma dinâmico editado para o ensaio de caracterização do explosivo dador, como representado na Figura 4-5 foi possível retirar algumas características e propriedades do explosivo dador.



**Figura 4-5.** Fotocronograma dinâmico editado para o ensaio 1 de caracterização explosivo dador.

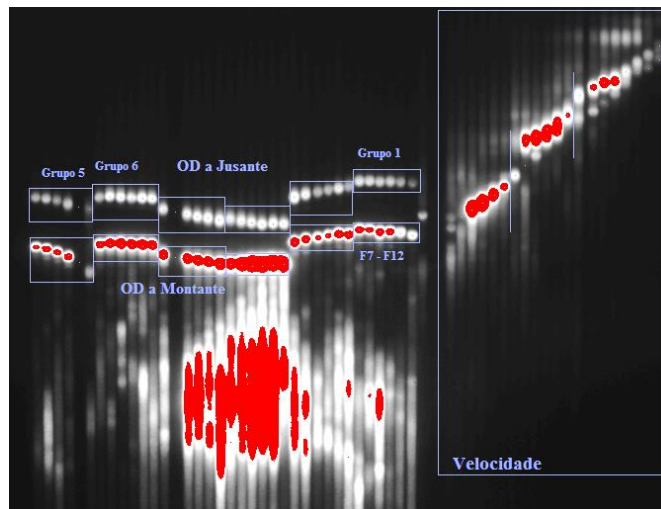
A resolução vertical do fotocronograma é de 1024 pixéis, para um tempo de varrimento correspondente de  $2\mu\text{s}$ . Na Figura 4-5 pode ver-se no canto superior esquerdo o conjunto de FO utilizado para avaliar a velocidade de detonação do explosivo dador. Neste conjunto o excesso de luz em algumas fibras é representado por manchas vermelhas. As fibras utilizadas para a avaliar a curvatura de detonação estão centradas horizontalmente na imagem e apresentam uma determinada curvatura correspondente à curvatura da frente de onda de detonação.

A impedância criada com o laminado de *kapton* colocada entre o explosivo e as FO não tinha ar suficiente entre as folhas de maneira que só apareceu uma frente de onda de detonação. Teoricamente deveriam aparecer tantas frentes de onda de detonação, quantos os espaços de ar existentes entre as folhas, pois à passagem da onda de detonação pelo laminado nos sítios onde existe ar este ioniza e revela-se luminoso no fotocronograma.

Através do ensaio 1 de caracterização do explosivo dador foi possível estimar a velocidade de detonação, a velocidade instantânea e retirar uma aproximação polinomial de segundo grau para a forma da frente de onda de detonação.

#### **4.1.5.2. Análise ao Fotocronograma Dinâmico obtido experimentalmente para o Ensaio 2 de Caracterização do Explosivo Dador**

Do segundo ensaio de caracterização do explosivo dador foi possível estimar a pressão de detonação do explosivo dador, sendo esta, a pressão da frente de onda de choque. A Figura 4-6 representa o fotocronograma dinâmico editado para o ensaio 2 de caracterização do explosivo dador.



**Figura 4-6.** Fotocronograma dinâmico editado para o ensaio 2 de caracterização explosivo dador.

A resolução vertical do fotocronograma é de 512 pixéis para um tempo de varrimento de  $2\mu\text{s}$ . No canto superior direito da Figura 4-6 está representado o grupo de fibras óticas utilizado para avaliar a velocidade do explosivo dador. O conjunto de duas curvas de FO ao centro da imagem foi utilizado para avaliar a curvatura da onda de choque bem como a sua pressão. As duas curvas representam o momento para o qual a CEVD captou a passagem da onda de choque de detonação provocada pelo explosivo dador, a montante e a jusante do laminado de *kapton*.

O primeiro grupo de FO com numeração 7 a 12 estava colado ao contrário, e a colagem dos grupos 5 e 6 estava trocada.

#### **4.1.6. Avaliação da Velocidade, Curvatura e Pressão da Onda de Detonação originada pelo Explosivo Dador**

##### **4.1.6.1. Velocidade da Onda de Detonação do Explosivo Dador**

Decorrente da análise dos fotocronogramas experimentais foi possível determinar a velocidade instantânea de detonação do explosivo dador. Este parâmetro foi obtido através de uma derivação local da velocidade registada, esta foi dada em função da aproximação linear entre a distância da fita de FO e o tempo que a OD demorou a percorrer esta distância.

A Figura 4-13 e a Figura 4-14 representam respetivamente o tempo que a OD demorou a percorrer a distância da fita de FO, nos ensaios 1 e 2 de caracterização do explosivo dador.

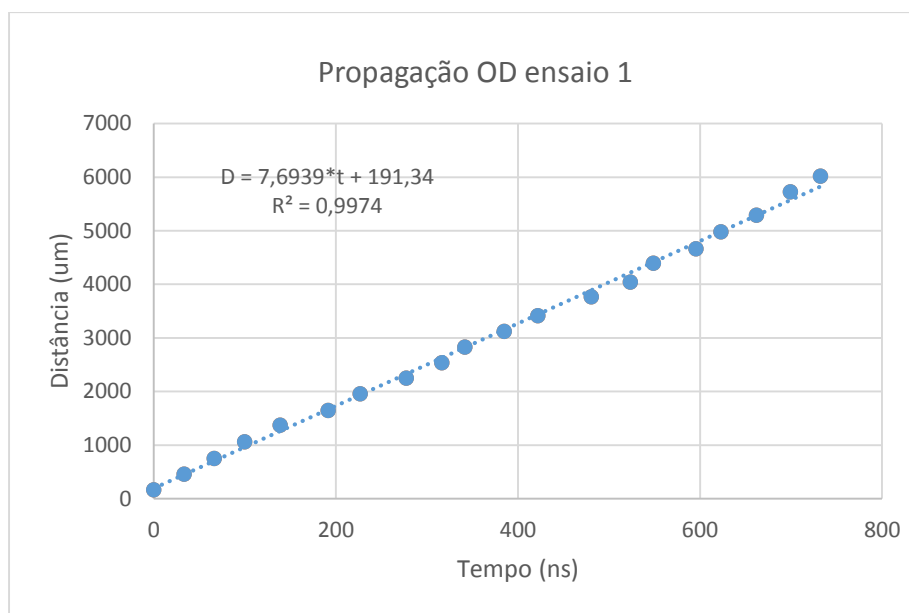


Figura 4-7. Representação gráfica propagação da OD para o ensaio 1 de caracterização do explosivo dador.

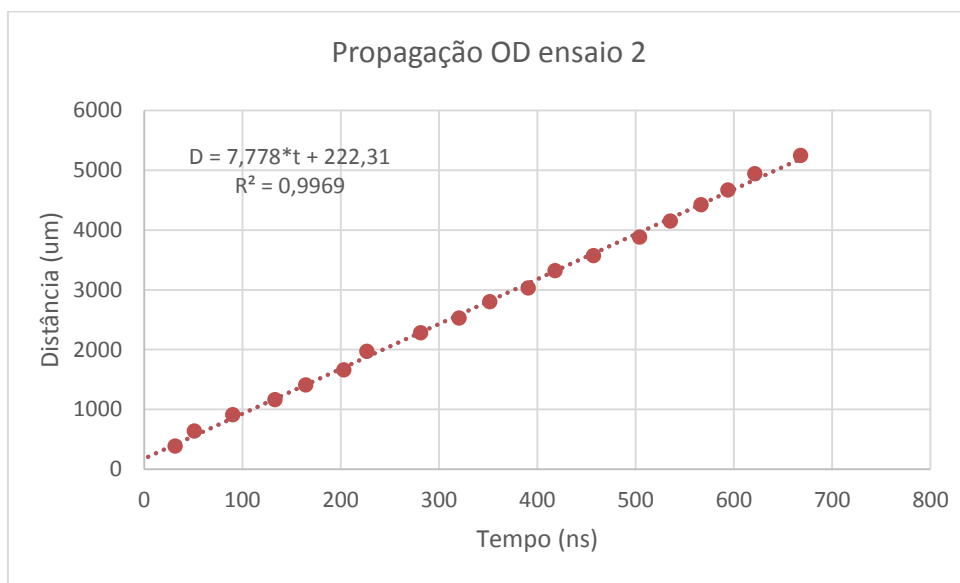
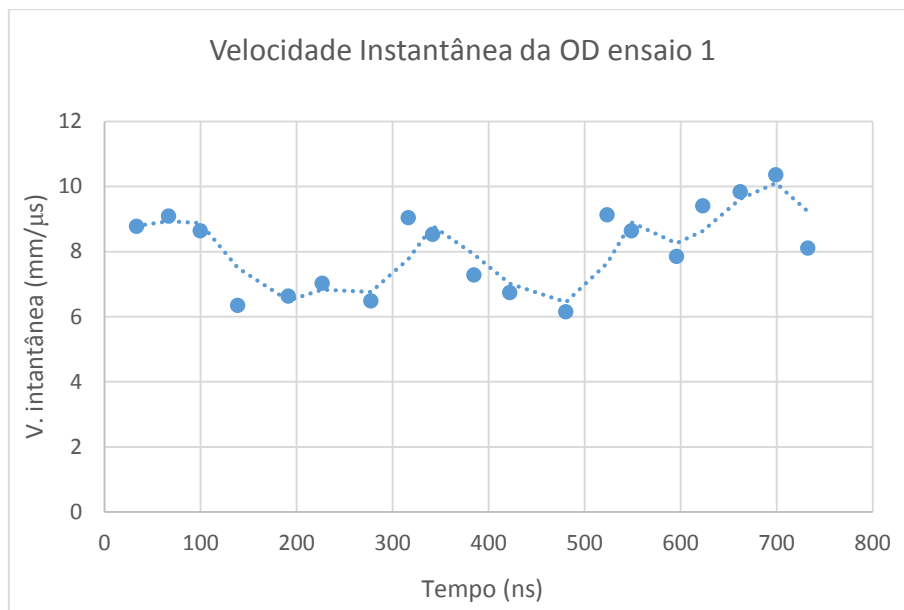


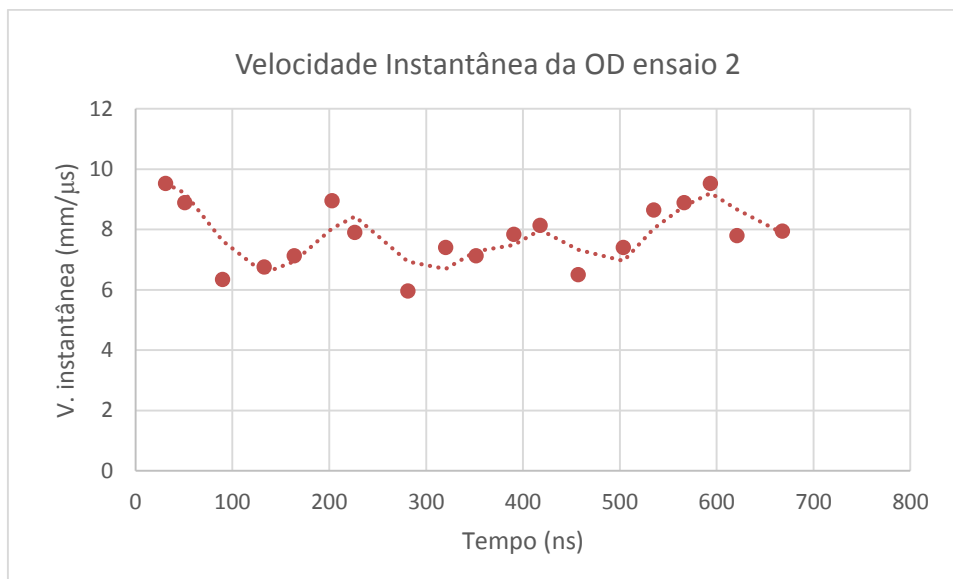
Figura 4-8. Representação gráfica da propagação da OD para o ensaio 2 de caracterização do explosivo dador.

As velocidades instantâneas em função do tempo decorrido calculadas para os ensaios 1 e 2 de caracterização do explosivo dador encontram-se representadas na Figura 4-9 e na Figura 4-10.





**Figura 4-9.** Representação gráfica da velocidade instantânea da OD para o ensaio 1 de caracterização do explosivo dador.



**Figura 4-10.** Representação gráfica da velocidade instantânea da OD para o ensaio 2 de caracterização do explosivo dador.

Através dos gráficos posição-tempo representados na Figura 4-9 e na Figura 4-10, fez uma aproximação linear pelo método dos mínimos devios quadrados e determinou-se a velocidade média da OD. A Tabela 4.4 referente à velocidade média da OD para cada ensaio de caracterização do explosivo dador.

Esta velocidade média instantânea foi determinante para proceder ao cálculo da altura à qual colocar o *trigger* responsável por iniciar a CEVD

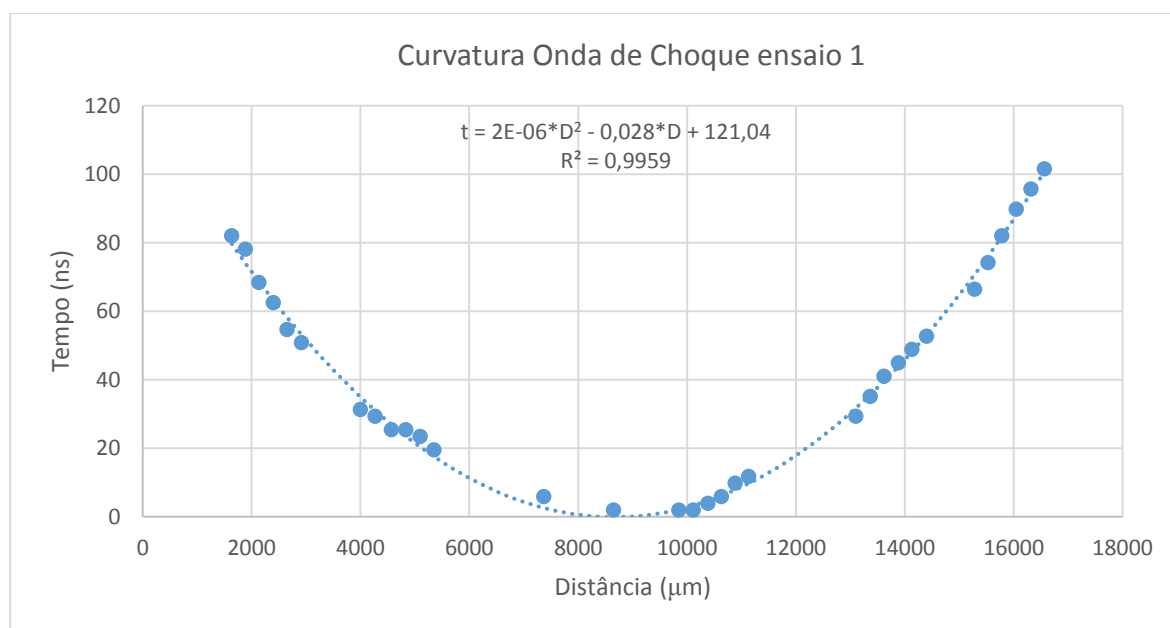
**Tabela 4.4.** Velocidade média instantânea registada para os ensaios 1 e 2 de caracterização do explosivo dador.

Ensaio de caracterização Explosivo Dador	Velocidade Média (Km/s)
1	7,69
2	7,78

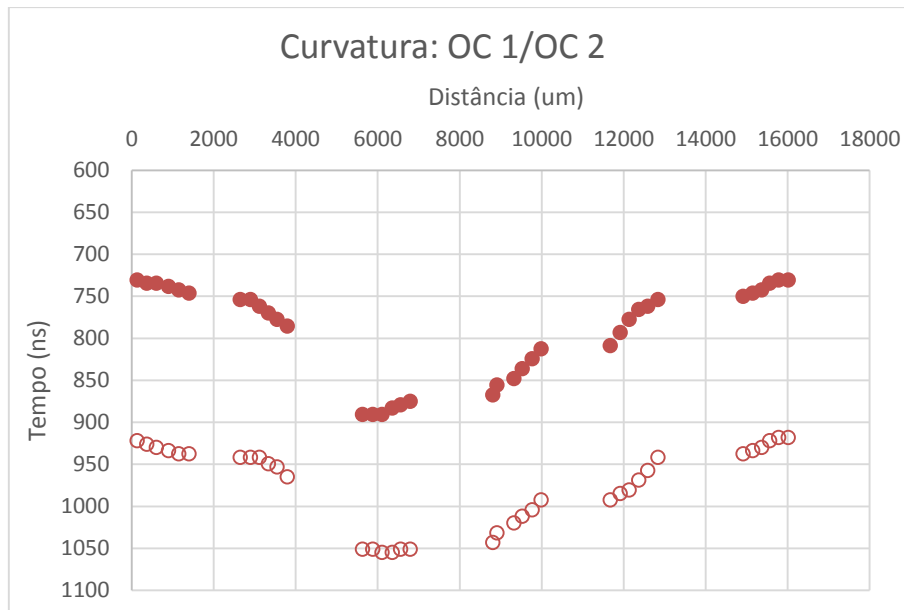
#### 4.1.6.2. Curvatura da Onda de Choque do Explosivo Dador

A curvatura da onda de choque decorrente da detonação do explosivo dador foi avaliada através do atraso com que a fita de fibras óticas registou a passagem da OC desde o centro da carga cilíndrica até à sua periferia.

Na Figura 4-11 apresenta-se o gráfico da parábola correspondente à curvatura da OC para o ensaio 1, obtida através de uma aproximação polinomial de segunda ordem. O valor mínimo no gráfico refere-se ao momento “zero” temporal para o qual as FO registam inicialmente a OC e o atraso desta é dado em função da distância do centro para a periferia da carga explosiva.

**Figura 4-11.** Representação gráfica da curvatura da onda de choque para o ensaio 1 de caracterização do explosivo dador.

A Figura 4-12 representa graficamente as ondas de choque registadas pelas FO a montante OC-M e a jusante OC-J do atenuador de choque em *kapton*. Os pontos correspondentes em cada OC têm uma diferença temporal média de 183,4ns entre eles.



**Figura 4-12.** Representação gráfica da curvatura das ondas de choque a montante e a jusante do atenuador de choque em *kapton* para o ensaio 2 de caracterização do explosivo dador.

#### 4.1.6.3. Pressão da Onda de Choque Gerada pelo Explosivo Dador

De forma a poder avaliar a pressão da OC gerada pela detonação do explosivo dador calculou-se o tempo que esta demorou a atravessar a espessura do atenuador de choque constituído em *kapton*, obteve-se uma velocidade de propagação da OC igual a 6,180km/s.

Com recurso à Equação 4.1 da aproximação linear da relação de Hugoniot Us-up para o *kapton* representada na Figura 2-2 calculou-se uma velocidade particular do material igual a 2,443km/s.

$$U_s = 1,4107 \times u_p + 2,7357 \quad (4.1)$$

Posteriormente recorreu-se à Equação 4.2 da aproximação polinomial de segunda ordem da relação de Hugoniot P-up para o *kapton* representada na Figura 2-3, para estimar a pressão.

$$P = 1,6816 \times u_p^2 + 4,0784 \times u_p \quad (4.2)$$

A pressão no *kapton* em função da velocidade particular é apresentada na Tabela 4.5 [15] [20].

**Tabela 4.5.** Pressão no *kapton* por ação da onda de choque decorrente da detonação do explosivo dador.

Curva	Velocidade da OC (km/s)	Velocidade das Partículas (km/s)	Pressão no <i>Kapton</i> (GPa)
U <sub>s</sub> -u <sub>p</sub>	6,180	2,443	-
P-u <sub>p</sub>	-	2,443	20,697

## 4.2. Caracterização dos Explosivos Recetores HMX-HTPB, teste em Cunha

### 4.2.1. Composição do Explosivo Recetor

Realizaram-se dois ensaios de caracterização do explosivo recetor, a sua composição química e mássica encontra-se apresentada na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6.** Composição do explosivo dador.

Componente	Ligante (%)	Composição (%)	Massa (g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Ensaio 1 Caracterização Explosivo Recetor</b>				
HMX	0,000	82,000	1,330	-
HTPB	100,000	18,000	0,290	0,960
Total	100,000	100,000	1,620	1,580
<b>Ensaio 2 Caracterização Explosivo Recetor</b>				
HMX	0,000	82,000	1,066	-
HTPB	100,000	18,000	0,234	0,960
Total	100,000	100,000	1,300	1,550

### 4.2.1. Dimensão dos Cristais de HMX

O tamanho médio dos cristais explosivos de HMX é fundamental na avaliação da sensibilidade do explosivo. Será com base neste parâmetro que se irá verificar se um composto explosivo plástico é mais ou menos sensível à detonação causada por uma onda

de choque. A Tabela 4.7 apresenta as dimensões dos cristais explosivos utilizados em cada ensaio [12] [20].

**Tabela 4.7.** Dimensão dos cristais de HMX para os ensaios de caracterização do explosivo recetor.

<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>
Diâmetro dos Cristais de HMX ( $\mu\text{m}$ )	297	53 - 63

#### 4.2.2. Condições de Operação

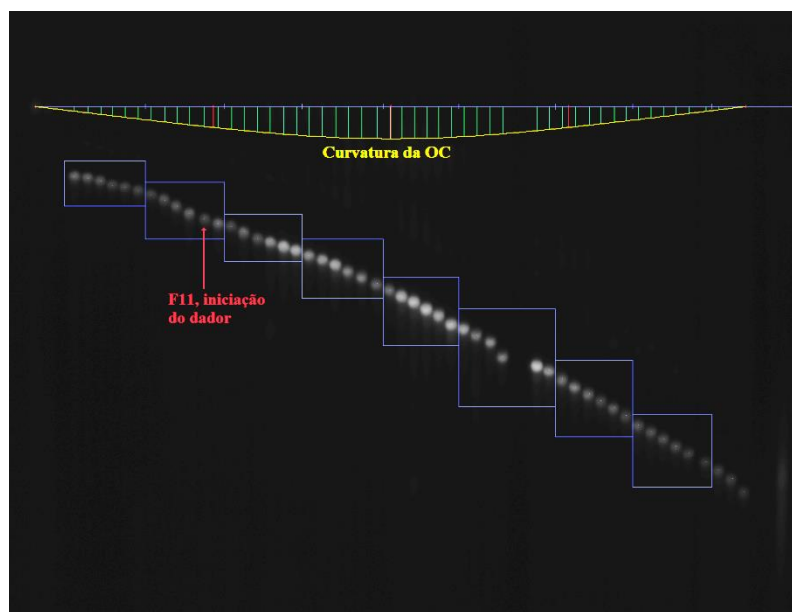
As condições definidas, inicialmente, em cada ensaio experimental para os equipamentos e materiais encontram-se na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8.** Condições de operação dos materiais e equipamentos para os ensaios de caracterização do explosivo recetor.

<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>
Atraso do <i>Trigger</i> ( $\mu\text{s}$ )	1,40	1,40
<i>Binning</i>	1x1	1x1
Resolução Vertical (pixeis)	1024	1024
<i>Sweep Range</i> ( $\mu\text{s}$ )	1	1
Tempo de Exposição ( $\mu\text{s}$ )	700	700

### 4.2.3. Fotocronogramas Dinâmicos de Caracterização do Explosivos Recetores

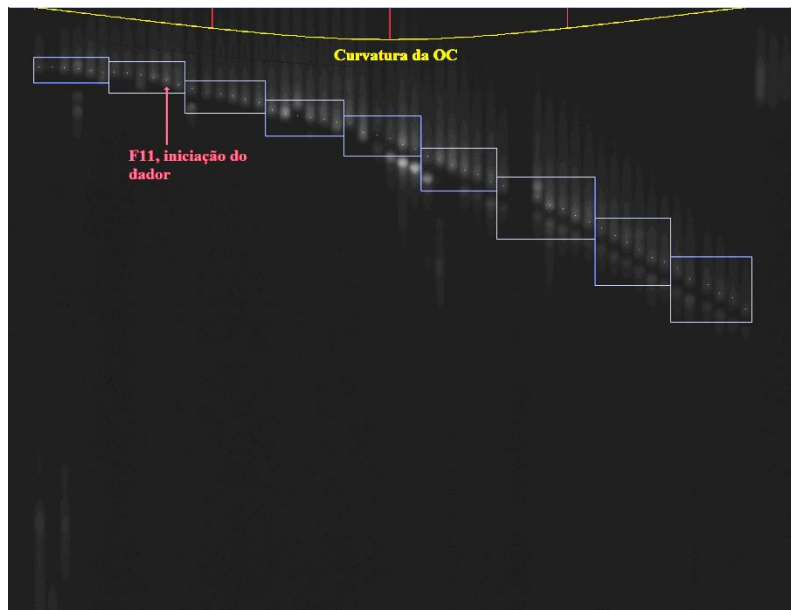
Decorrentes dos dois ensaios, para caracterização do explosivo dador, obtiveram-se os respetivos fotocronogramas editados, representados na Figura 4-13 e na Figura 4-14.



**Figura 4-13.** Fotocronograma dinâmico editado obtido experimentalmente para o ensaio 1 de caracterização explosivo recetor.

Na Figura 4-13 a curvatura da OC é dada pela linha amarela e representa o momento em que esta chega à carga recetora. A OC tem um atraso temporal, função da distância do centro para a periferia da carga explosiva dadora. As três primeiras FO não ficaram na imagem pois estas não estavam no campo de captura da CEVD.

O início da detonação do explosivo recetor por ação da OC foi registado pela décima primeira FO.



**Figura 4-14.** Fotocronograma dinâmico editado obtido experimentalmente para o ensaio 2 de caracterização explosivo recetor.

Na Figura 4-14 a curvatura da OC é dada pela linha amarela e representa o momento em que esta chega à carga recetora.

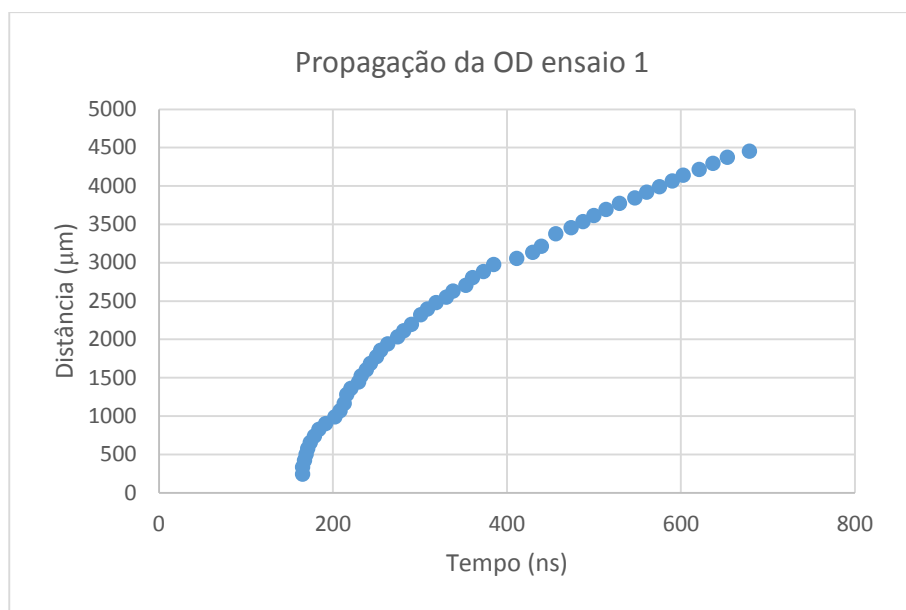
O início da detonação do explosivo recetor por ação da OC foi registado pela décima primeira FO.

#### **4.2.4. Propagação e Velocidade Instantânea da Onda de Detonação**

As velocidades da OD para os ensaios 1 e 2 de caracterização dos explosivos recetores, foram obtidas por análise dos fotocronogramas representados na Figura 4-13 e na Figura 4-14, respetivamente. Para tal, mediu-se o intervalo de tempo entre a entrada da OD e o registo desta em cada FO.

A Figura 4-15 e a Figura 4-16 representam graficamente a velocidade de propagação da OD sobre a cunha de explosivo recetor para os ensaios 1 e 2 de caracterização do explosivo recetor.

A representa a sobreposição das curvas apresentadas, na Figura 4-15 e na Figura 4-16.

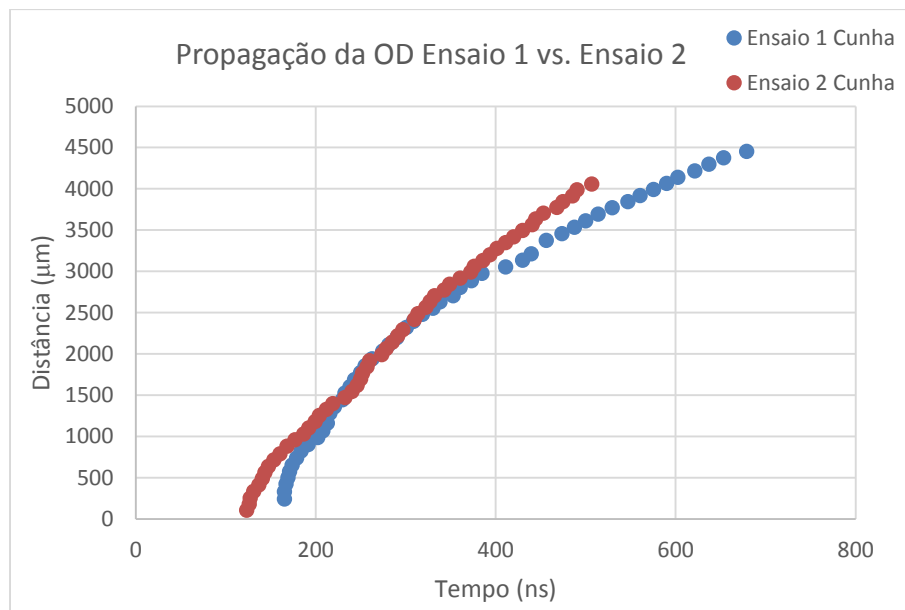


**Figura 4-15.** Representação gráfica da propagação da OD sobre a cunha de explosivo para o ensaio 1 de caracterização do explosivo recetor.



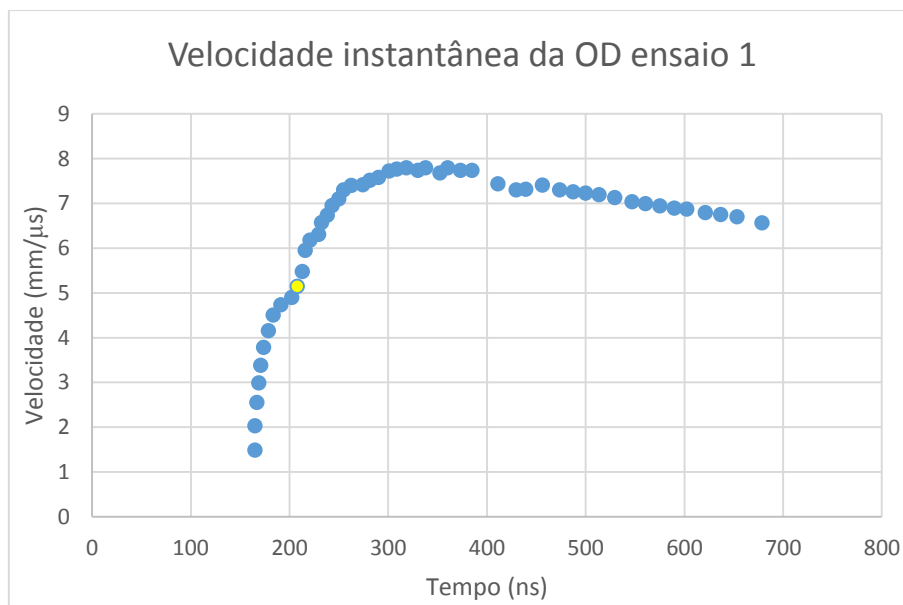
**Figura 4-16.** Representação gráfica da propagação da OD sobre a cunha de explosivo para o ensaio 2 de caracterização do explosivo recetor.





**Figura 4-17.** Representação gráfica da propagação da OD sobre a cunha de explosivo para o ensaio 1 e 2 de caracterização do explosivo recetor.

A velocidade instantânea de detonação foi determinada com recurso a uma derivação local dos pontos das curvas de velocidade. A Figura 4-18 e a Figura 4-19 apresentam respetivamente a evolução da velocidade instantânea de detonação sobre a cunha de explosivo em função do tempo decorrido para os ensaios 1 e 2 de caracterização do explosivo recetor, sendo a iniciação da detonação do dador assinalada a amarelo.



**Figura 4-18.** Evolução da velocidade Instantânea para o ensaio 1 de caracterização do explosivo recetor.

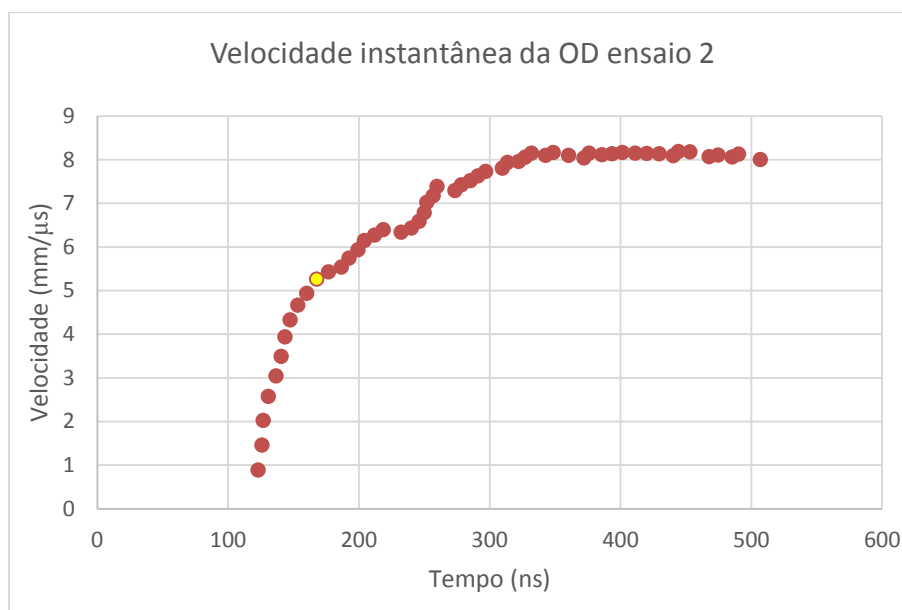


Figura 4-19. Evolução da velocidade Instantânea para o ensaio 2 de caracterização do explosivo recetor.

#### 4.2.5. Sensibilidade ao Choque dos Explosivos Recetores

A sensibilidade ao choque dos materiais explosivos foi avaliada por dois parâmetros  $t_D$  e  $H_D$ . O tempo até à detonação,  $t_D$ , permite avaliar o tempo decorrido desde a chegada da OD à carga recetora até à detonação desta. A distância até à detonação,  $H_D$ , caracteriza a altura mínima na cunha de explosivo que faz iniciar a detonação do explosivo recetor. A Tabela 4.9 apresenta a sensibilidade ao choque dos explosivos testados em função do tempo e da distância até à detonação [20].

Tabela 4.9. Sensibilidade ao choque em função de  $t_D$  e  $H_D$  para os explosivos recetores.

Parâmetro	Ensaio 1	Ensaio 2
Nº da FO a registar a Iniciação do Explosivo Recetor	11	11
Densidade do Explosivo Recetor ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,579	1,550
Pressão da OC no <i>kaptan</i> (GPa)	20,697	20,697
Diâmetro dos Cristais de HMX ( $\mu\text{m}$ )	297	53-63
$H_D$ (mm)	$1,069 \pm 0,1$	$0,883 \pm 0,1$
$t_D$ ( $\mu\text{s}$ )	$0,208 \pm 0,01$	$0,168 \pm 0,01$

De acordo com a Tabela 4.9 observa-se um aumento da distância  $H_D$  e um aumento do tempo  $t_D$ , com o aumento da dimensão dos cristais explosivos.

Averiguou-se que, para o composto HMX-HTPB ( $d_{50}=297\mu\text{m}$ ) testado no ensaio 1, uma distância até à detonação,  $H_D=1,069\text{mm}$  e um tempo até à detonação,  $t_D=0,208\mu\text{s}$ . Para o composto HMX-HTPB ( $d_{50}=53-63\mu\text{m}$ ) testado no ensaio 2, verificou-se uma distância até à detonação,  $H_D=0,883\text{mm}$  e um tempo até à detonação,  $t_D=0,168\mu\text{s}$ .

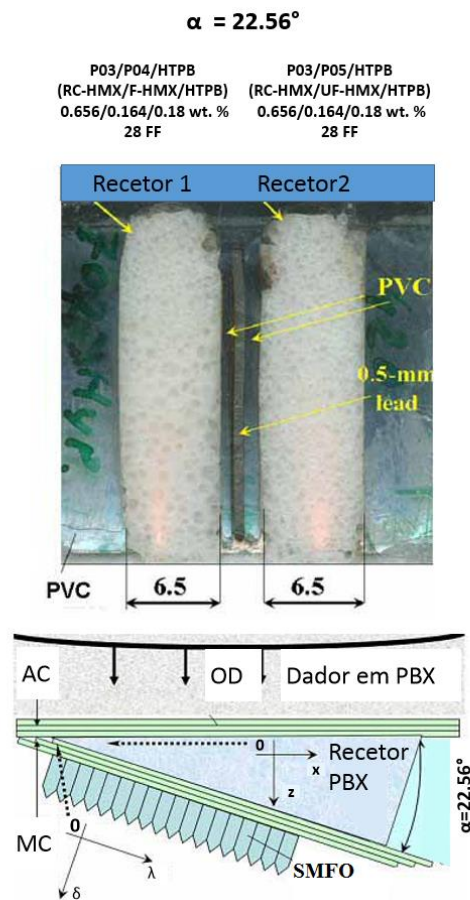
Deste modo, constata-se que a diminuição do tamanho das partículas que constituem o material explosivo contribui para um aumento na sensibilidade ao choque. No entanto, para uma análise mais completa, seria importante realizar testes complementares que avaliassem outros parâmetros tais como, a morfologia, os defeitos internos e a rugosidade da superfície dos cristais.

### **4.3. Caracterização dos compostos explosivos recetores P03-P04-HTPB vs. P03-P05-HTPB, teste em Cunha**

Os fotocronogramas analisados na presente secção foram obtidos no âmbito da realização do artigo científico: “*Exploring the HMX-based PBXs with the TATB Shock Sensitivity*” [20].

#### **4.3.1. Configuração Experimental**

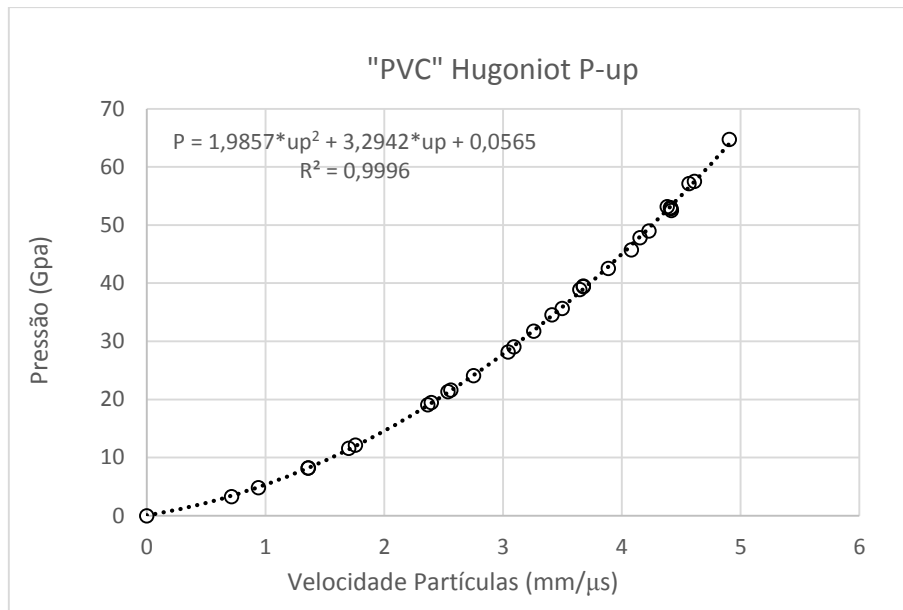
A configuração experimental utilizada de forma a avaliar a sensibilidade dos compostos explosivos recetores encontra-se representada na Figura 4-20 onde se representa esquematicamente a direcção da propagação da OD sobre o atenuador de choque AC, o explosivo recetor e o monitor de choque MC atingindo finalmente a sonda múltipla de fibras óticas SMFO.



**Figura 4-20.** Configuração experimental para caracterização dos compostos explosivos P03-P04-HTPB vs. P03-P05-HTPB, adaptado [20].

### 4.3.2. Pressão de Choque

A pressão à qual se submeteram as cargas recetoras, decorrente da onda de choque provocada pela detonação da carga dadora, foi calculada a partir de uma aproximação polinomial de segunda ordem da relação de Hugoniot  $P-u_p$  para o PVC com densidade igual a  $1,376\text{g/cm}^3$ . A pressão foi obtida a partir da Figura 4-21 e apresenta-se na Tabela 4.10.



**Figura 4-21.** Representação gráfica da relação de Hugoniot P-u<sub>p</sub> para o PVC [15] [20].

**Tabela 4.10.** Pressão da OC decorrente da detonação da carga dadora, imposta às cargas recetoras.

Composto	Pressão Imposta (GPa)
<b>P03-P04-HTPB</b>	22,5
<b>P03-P05-HTPB</b>	22,5

### 4.3.3. Composição do Explosivo Recetor

A composição dos compostos explosivos P03-P04-HTPB e P03-P05-HTPB apresenta-se na Tabela 4.11 [20].

Tabela 4.11. Composição do explosivo recetor.

Descrição	Componente	Ligante (%)	Composição (%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
<b>P03-P04-HTPB</b>				
P03*	RC-HMX	0,000	65,600	1,9023
P04*	F-HMX	0,000	16,400	1,8735
HTPB	HTPB	100,000	18,000	0,9600
Total		100,000	100,000	1,5730
<b>P03-P05-HTPB</b>				
P03*	RC-HMX	0,000	65,600	1,9023
P05*	UF-HMX	0,000	16,400	1,9330
HTPB	HTPB	100,000	18,000	0,9600
Total		100,000	100,000	1,5760

Usaram-se quatro tipos de partículas de  $\beta$ -HMX, referenciadas como P1\*, P03\*, P04\* e P05\* na fabricação dos compostos explosivos a testar.

As partículas P1\* representam a referência para o HMX<sub>Class-1</sub> de classe militar, produzido por Dyno Nobel, apresentando uma distribuição de tamanho de partículas mono-modal de tamanho médio  $d_{50} = 114,408\mu$ . As partículas P03\* foram fabricadas em Fraunhofer ICT através da recristalização de partículas de P1\* numa solução de carbonato de propileno. Estas apresentavam uma distribuição de tamanho de partículas mono-modal de tamanho médio,  $d_{50} = 130,925\mu$  [20].

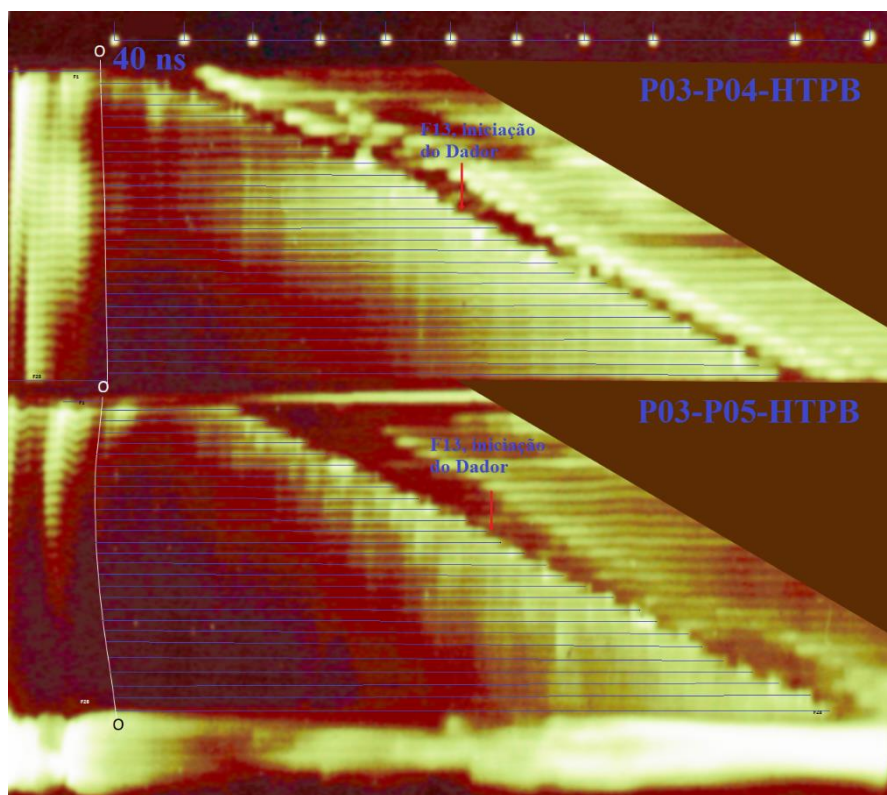
As partículas P04\* foram fabricadas em Fraunhofer ICT através da aplicação da tecnologia de moagem por estator-rotor em partículas do material P1\*. As partículas ultra

finas P05\* foram obtidas por trituração da pasta aquosa de grãos de P04\* obtida pelo método de moinho de esferas de espaço anelar, desenvolvido em Fraunhofer ICT [20].

As partículas P04\* e P05\* apresentam uma distribuição de partículas mono-modal, com tamanho médio,  $d_{50} = 11,06\mu\text{m}$  e  $d_{50} = 1,64\mu\text{m}$  respetivamente [20].

#### 4.3.4. Fotocronograma Dinâmico de Caracterização do Explosivo Recetor

O fotocronograma obtido, referente aos compostos P03-P04-HTPB e P03-P05-HTPB apresenta-se na Figura 4-22.



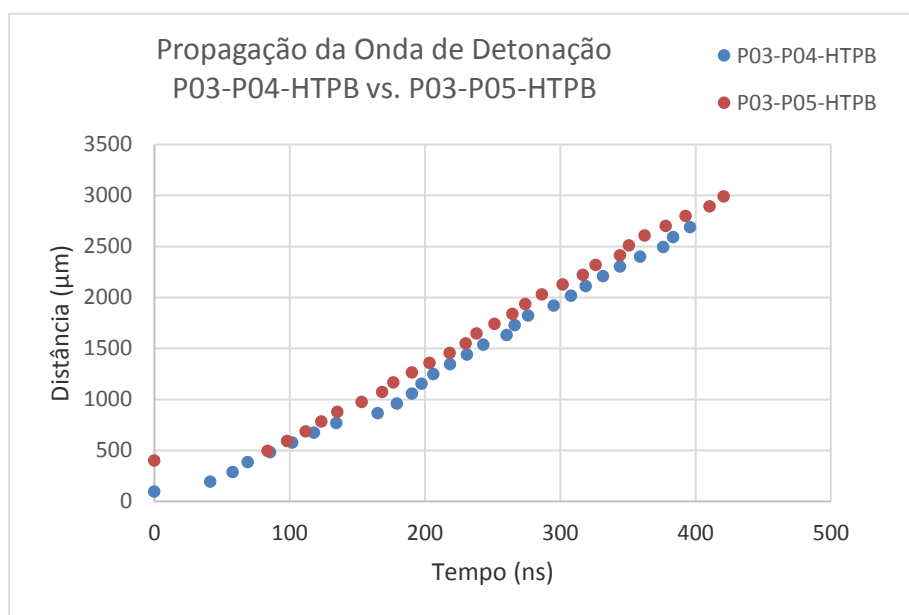
**Figura 4-22.** Fotocronograma dinâmico obtido experimentalmente para a caracterização dos explosivos recetores, adaptado [20].

No fotocronograma o eixo horizontal representa o tempo de varrimento da CEVD sendo o espaçamento entre dois pontos consecutivos correspondente a 40 ns. A linha branca à esquerda da imagem corresponde à curvatura da OD no momento em que esta atinge o AC. O tempo e a distância para os quais ocorre a detonação do explosivo dador foi registado na FO

#### 4.3.5. Velocidade e Velocidade Instantânea da Onda de Choque

Do fotocronograma obtido foi possível avaliar a velocidade da OD decorrente da detonação do explosivo dador, medindo o intervalo temporal que a OD demorou a percorrer a altura de explosivo recetor na cunha.

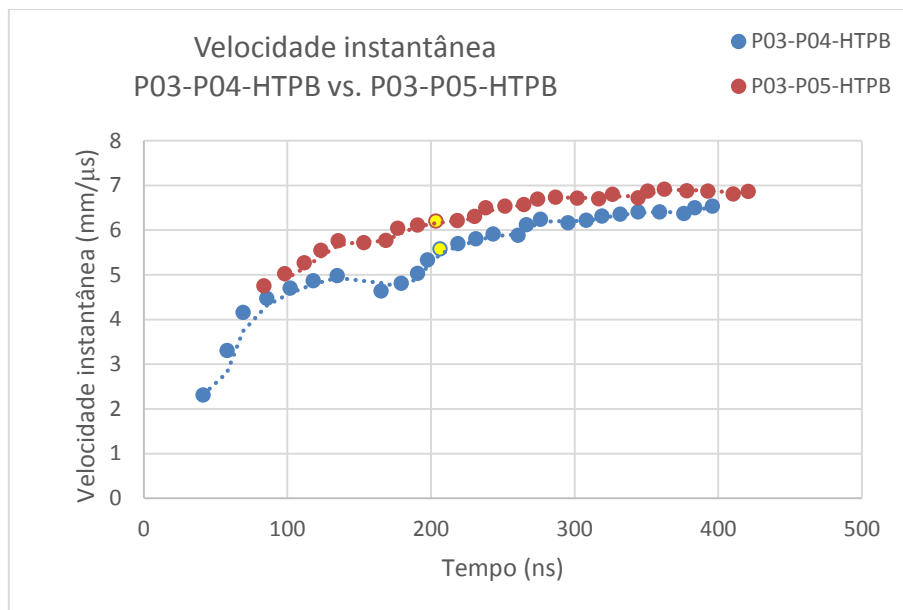
A Figura 4-23 representa as velocidades de propagação da OD nos explosivos recetores P03-P04-HTPB vs. P03-P05-HTPB.



**Figura 4-23.** Propagação da OD para os explosivos recetores, P03-P04-HTPB vs. P03-P05-HTPB.

A velocidade instantânea é obtida por derivação local da propagação da OD. As velocidades instantâneas, para os compostos P03-P04-HTPB vs. P03-P05-HTPB, encontram-se representadas na Figura 4-24, sendo a iniciação da detonação do dador assinalada a amarelo.





**Figura 4-24.** Velocidade Instantânea dos explosivos recetores, P03-P04-HTPB vs. P03-P05-HTPB.

#### 4.3.6. Sensibilidade ao Choque dos Explosivos Recetores

A sensibilidade ao choque dos materiais explosivos é caracterizada pelos parâmetros  $t_D$  e  $H_D$  [20]. A Tabela 4.12 apresenta a sensibilidade ao choque dos explosivos testados em função do tempo e da distância até à detonação.

**Tabela 4.12.** Sensibilidade ao choque em função de  $t_D$  e  $H_D$  para os explosivos recetores, adaptado [20].

Parâmetro	P03-P04-HTPB	P03-P05-HTPB
Nº da FO a registar a Iniciação do Explosivo Recetor	13	13
Densidade do Explosivo Recetor (g/cm <sup>3</sup> )	1,5730	1,5760
Pressão da OC (GPa)	22,5	22,5
Diâmetro Médio Cristais de HMX (μm)	$d_{50}(P03)=130.925$ $d_{50}(P04)=11.06$	$d_{50}(P03)=130.925$ $d_{50}(P05)= 1.64$
$H_D$ (mm)	$1,247 \pm 0,1$	$1,549 \pm 0,1$
$t_D$ (μs)	$0,206 \pm 0,01$	$0,230 \pm 0,01$

Pela análise da Tabela 4.12, verifica-se um aumento da sensibilidade de um material por diminuição dos parâmetros  $H_D$  e  $t_D$ , estes resultados não vão ao encontro dos resultados obtidos na secção 4.2.5, devido à forma como as partículas foram obtidas. O tratamento dos cristais revela-se então um factor importante na dessensibilização de explosivos.

A composição P03-P04-HTPB ( $d_{50}(P03)=130,925\mu\text{m}$ ,  $d_{50}(P04)=11,06\mu\text{m}$ ) apresenta uma distância até à detonação,  $H_D=1,247\text{mm}$  e um tempo até à detonação,  $t_D=0,206\mu\text{s}$ . O composto P03-P05-HTPB ( $d_{50}(P03)=130,925\mu\text{m}$ ,  $d_{50}(P05)=1,64\mu\text{m}$ ) é caracterizado por uma distância até à detonação,  $H_D=1,549\text{mm}$  e um tempo até à detonação,  $t_D=0,230\mu\text{s}$ .

---

## 5. CONCLUSÕES

Os principais contributos do estudo realizado para o conhecimento e desenvolvimento da dessensibilização de explosivos são apresentados neste capítulo.

Através da avaliação dos fotocronogramas obtidos com recurso a uma câmara eletrónica de varrimento digital e a sondas de fibras óticas, foi possível fazer uma caracterização temporal e espacial dos fenómenos físicos intrínsecos à detonação de um material energético.

Com a caracterização do material RU 81-18 foi possível determinar a pressão sobre o atenuador de choque permitindo avaliar a sensibilidade das formulações HMX-HTPB com um rácio mássico de 82/18%.

Por ação de uma pressão no atenuador de choque igual a 20,667GPa registou-se uma distância até à detonação,  $H_D=1,069\text{mm}$  e um tempo até à detonação,  $t_D=0,208\mu\text{s}$ , para o composto HMX-HTPB ( $d_{50}=297\mu\text{m}$ ). Sobre a mesma pressão no atenuador de choque o composto HMX-HTPB ( $d_{50}=53-63\mu\text{m}$ ) apresenta uma distância até à detonação,  $H_D=0,883\text{mm}$  e um tempo até à detonação,  $t_D=0,168\mu\text{s}$ .

Os compostos P03-P04-HTPB ( $d_{50}(\text{P03})=130,925\mu\text{m}$ ,  $d_{50}(\text{P04})=11,06\mu\text{m}$ ) e P03-P05-HTPB ( $d_{50}(\text{P03})=130,925\mu\text{m}$ ,  $d_{50}(\text{P05})=1,64\mu\text{m}$ ), quando subjugados a uma pressão de 22,5GPa registam uma distância até à detonação,  $H_D=1,247\text{mm}$  e um tempo até à detonação,  $t_D=0,206\mu\text{s}$  e uma distância até à detonação,  $H_D=1,549\text{mm}$  e um tempo até à detonação,  $t_D=0,230\mu\text{s}$ , respetivamente.

Com os resultados obtidos, com o presente estudo, verificou-se que o tamanho médio dos cristais é um fator que influencia a sensibilidade ao choque de explosivos. No entanto, com intuito de realizar um estudo mais completo, seria necessária a realização de testes complementares que avaliassem outros parâmetros tais como, a morfologia, os defeitos internos e a rugosidade da superfície dos cristais.



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Agrawal, J. (2010), “High Energy Material: Propellants, Explosives and Pyrotechnics”, 1ª Ed, Willey-VCH, Weinheim.
- [2] Akhavan, J. (2004), “The Chemistry of Explosives”, 2ª Ed, The Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- [3] Bailey, A., Murray, S., (1989) “Explosives, Propellants and Pyrotechnics”, 1ª Ed, Royal Military College of Science, Shrivenham.
- [4] Bellitto, V., Melnik, M., (2010), “Surface defects and their role in the shock sensitivity of cyclotrimethylene-trinitramine”, Applied Surface Science, 256, 3478-3481.
- [5] Davis, T., (1972), “The Chemistry of Powder Explosives”, Reprinted Ed, Angriff Press, Las Vegas.
- [6] Fernandes, H., (2013), “Utilização de técnicas cinematográficas ultrarrápidas para caracterização do processo de detonação de emulsões explosivas”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na especialidade de Energia e Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [7] Fickett, W., Davis, W., (2000), “Detonation Theory and Experiment”, 1º Ed, General Publishing Company, Toronto.
- [8] Fordham, S., (1980), “High Explosives and Propellants”, 2ª Ed, Pergamon Press Ltd., Oxford.
- [9] Hamamatsu, 2008, Guide to streak cameras, Acedido a 20 de Maio de 2014 em, [http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/sys/e\\_streakh.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/sys/e_streakh.pdf).
- [10] Hamamatsu, 2014, Anatomy of a Charge-Coupled Device, Acedido a 21 de Maio de 2014 em, <http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/ccdanatomy.html>.
- [11] Hayes D., (1973), “Introduction to stress wave phenomena”, Relatório Técnico, Sandia National Laboratories, Albuquerque.
- [12] Hudson, R., J., (2012), “Investigating the factors influencing RDX shock sensitivity”. Tese de Doutoramento. Departamento de Ciências Aplicadas e Engenharia – Universidade de Cranfield, Cranfield.
- [13] Kerley, G., (2006) “The Linear Us-up Relation in Shock-Wave Physics”. Relatório de Pesquisa, Kerley Technical Services.
- [14] Lochert, I., Franson, M., Hamshere, B., (2003), “Reduced Sensitivity RDX (RS-RDX) Part I: Literature Review and DSTO Evaluation”, Relatório Técnico, DSTO Defense Science and Technology Organisation, Edinburgh.
- [15] March, S., (1980), “LASL Shock Hugoniot Data”, 1ª Ed, University of California Press, Berkeley.

- [16] Merran, D., (2006), "Polyurethane Binder Systems for Polymer Bonded Explosives", Relatório Técnico, DSTO Defense Science and Technology Organization, Edinburgh.
- [17] Meyer, R., Kohler, J., Homburg, A., (2007), "Explosives", 6ª Ed, Willey-VCH, Weinheim.
- [18] Morris, M., (1991) "Shock-Wave equation-of-State studies at Los Alamos", Shock Waves, 1, 213-222.
- [19] Plaksin, I., Campos, J., Ribeiro, J., Mendes, R., Góis, J., Direito, J., (2004), "Birth and Death of the PBX' Detonation in a Mezzo-Scale. Effect of the Grain Sizes and Binder' Nature in Ignition and Failure of Detonation", Trabalho apresentado em 35th ICT-Conference, In Abstract for the 35th ICT-Conference, Karlsruhe.
- [20] Plaksin, I., Ribeiro, J., Mendes, R., Plaksin, S., Rodrigues, L., Campos, J., Hermann, M., Mikonsaari, I., Krause, H., (2012), "Exploring the HMX-based PBXs with the TATB Shock Sensitivity", Trabalho apresentado em Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium, Las Vegas.
- [21] Qiu, H., Stepanov, V., Stasio, A., Chou, T., Lee, W., (2011), "RDX-based nanocomposite microparticles for significantly reduced shock sensitivity", Journal of Hazardous Materials, 185, 489-493.
- [22] Rice, M., McQueen, R., Walsh, J., (1958), "Compression of Solids by Strong Shock Waves", Solid State Physics, 6, 1-63.
- [23] Shock Wave Database, 2002, Acedido a 28 de Agosto de 2014 em, <http://www.ihed.ras.ru/rusbank/>.
- [24] Tavares, B., (2011), "Compactação Dinâmica de Pós Metálicos". Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na especialidade de Energia e Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [25] Zukas, J., Walters, W., (2002) "Explosive Effects and Applications", 1º Ed, Springer, Albuquerque.

## ANEXO A

### Ensaio 1 de calibração do atraso do *trigger*.

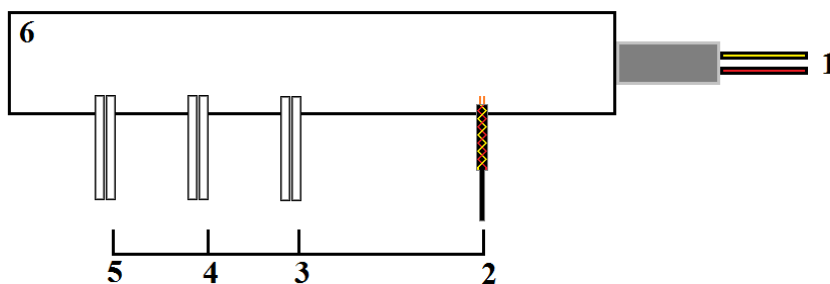
Condições de Operação da CEVD:

Tempo de exposição	400 $\mu$ s
Alcance de varrimento	2 $\mu$ s
Modo de operação	Normal
Resolução	1024 <i>pix</i>

Sabendo o tempo de varrimento da imagem, foi possível calcular o tempo que decorre para cada *pixel* na imagem correspondente.

$$\frac{2\mu s}{1024pix} = 1,953125 ns/pix$$

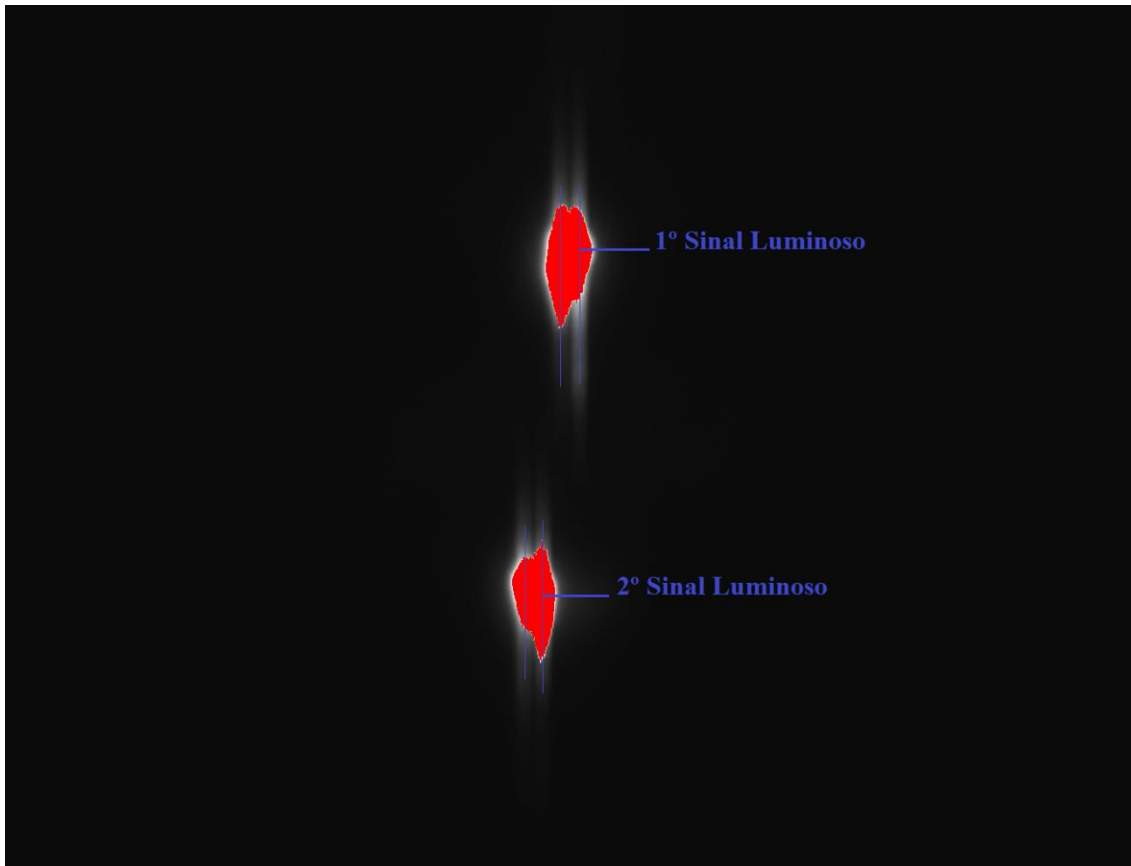
A figura representa esquematicamente a montagem feita para este ensaio.



- 1- Detonador
- 2- *Trigger*
- 3- 1º Conjunto de FO
- 4- 2º Conjunto de FO
- 5- 3º Conjunto de FO
- 6- Cordão detonante em PETN

---

Sinal	Marcação	Tempo Decorrido	Distância
1° Sinal Luminoso	Conjunto 2, Fibra 1	0,564 $\mu$ s	20,18mm
2° Sinal Luminoso	Conjunto 3, Fibra 1	1,365 $\mu$ s	26,30mm



A figura representa o fotocronograma dinâmico para o teste de calibração 1.

O primeiro conjunto de fibras não ficou na fotografia, isto significa que a CEVD ainda estava fechada quando a onda de detonação passou pelo primeiro conjunto de fibras. As distâncias são medidas desde o *trigger* até ao centro da primeira fibra de cada conjunto.

O tempo decorrente entre o primeiro e o segundo sinal é dado pela expressão:

$$\Delta t = 1,365\mu s - 0,564\mu s$$

$$\Delta t = 0,801\mu s$$

A distância entre o primeiro e o segundo sinal é dada pela expressão:

$$\Delta d = 26,30mm - 20,18mm$$

$$\Delta d = 6,12mm$$



A velocidade de detonação para este ensaio é então dada pela expressão:

$$V_{det} = \frac{6,12mm}{0,801\mu s} = 7,64km/s$$

Partindo do princípio que a velocidade de detonação é constante ao longo da carga pode-se então calcular o intervalo de tempo que decorre desde que a CEVD dispara até ao centro da imagem captada para este ensaio, dado o segundo conjunto ter ficado centrado na imagem:

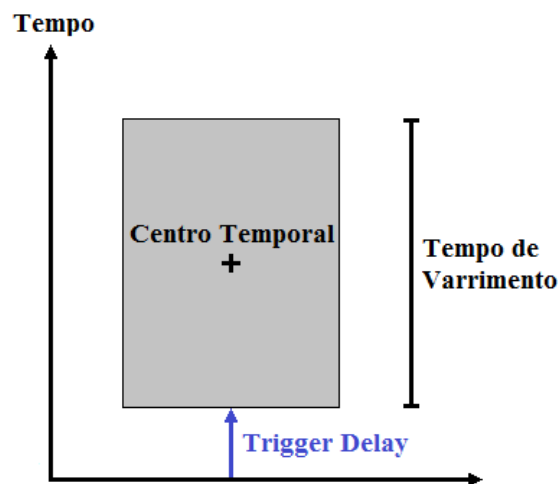
$$\frac{20,18mm}{7,64mm/\mu s} = 2,641\mu s$$

Sabendo que a primeira fibra do conjunto foi vista para o intervalo de tempo  $0,564\mu s$ , podemos calcular o atraso do *trigger* de forma a centrar na imagem o *timing* de ocorrência dos eventos de interesse.

$$2,641\mu s - 0,564\mu s \cong 2,1\mu s$$

O *trigger* de disparo da CEVD terá então que ter um atraso de  $2,1\mu s$ .

A figura representa esquematicamente o atraso do *trigger* em relação ao início da imagem.





## ANEXO B

### Ensaio 2 de calibração do atraso do *trigger*.

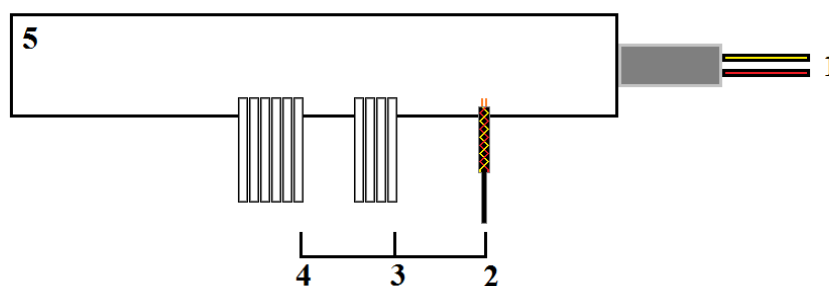
Condições de Operação da CEVD:

Tempo de exposição	250 $\mu$ s
Alcance de varrimento	1 $\mu$ s
Modo de operação	Normal
Resolução	1024 <i>pix</i>

Sabendo o tempo de varrimento da imagem, foi possível calcular o tempo que decorre para cada *pixel* na imagem correspondente.

$$\frac{1\mu s}{1024pix} = 0,976563 ns/pix$$

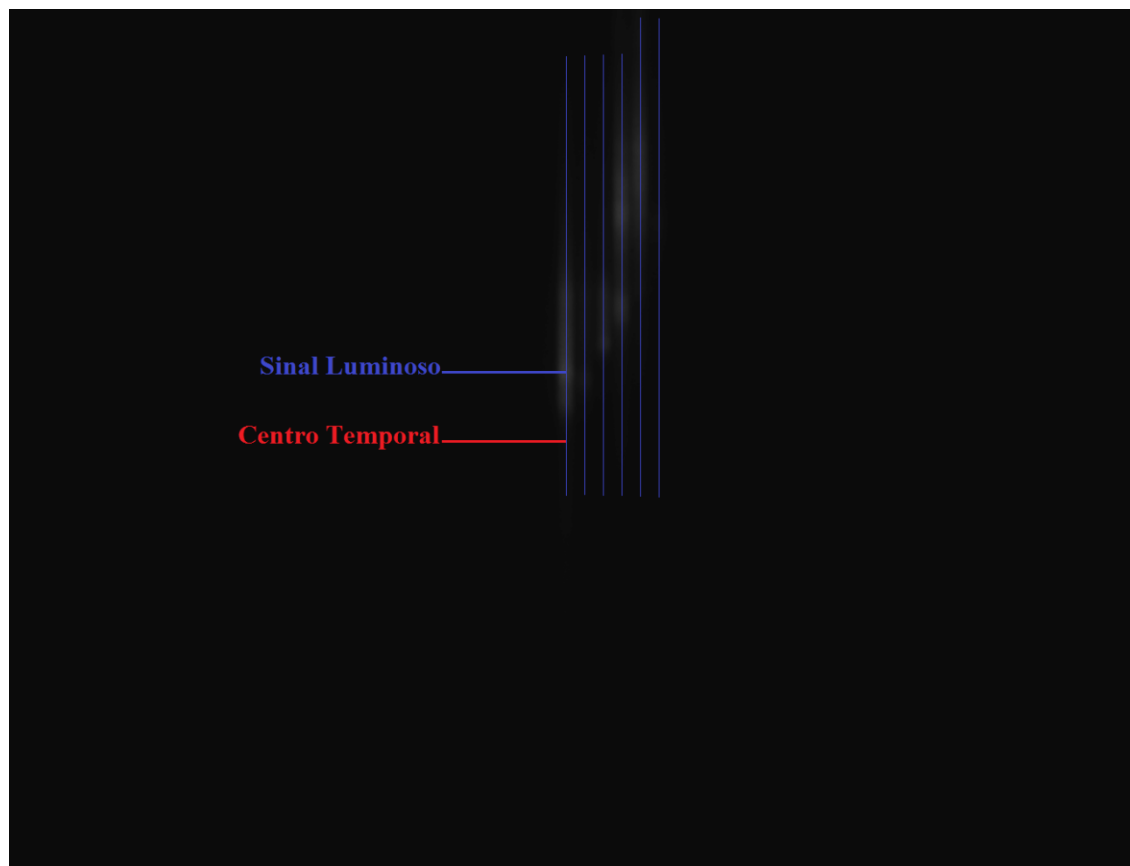
A figura representa esquematicamente a montagem feita para este ensaio.



- 1- Detonador;
- 2- Trigger;
- 3- 1º Conjunto de FO
- 4- 2º Conjunto de FO
- 5- Cordão detonante em PETN

---

Sinal	Marcação	Tempo Decorrido	Distância
Sinal Luminoso	Conjunto 2, Fibra 6	0,420 $\mu$ s	12,94mm



A figura representa o fotocronograma dinâmico para o teste de calibração 2.

O primeiro conjunto de fibras não ficou na fotografia, isto significa que a CEVD ainda estava fechada quando a onda de detonação passou pelo primeiro conjunto de fibras. As distâncias são medidas desde o *trigger* até ao centro da primeira fibra de cada conjunto.

Dado o primeiro conjunto de FO não ter ficado representado na figura foi impraticável calcular a velocidade de detonação do cordão de PETN, pois o comprimento disponível para fazer o cálculo é de apenas 1,5mm e o erro associado a esta velocidade iria ser muito grande.

Dado o sinal luminoso ter sido visto para um intervalo de tempo de 0,420 $\mu$ s o cálculo para o atraso do *trigger* foi feito com base no intervalo de tempo correspondente ao centro temporal da imagem.

---

A velocidade de detonação para este ensaio é então dada pela velocidade obtida para o ensaio 1 para a calibração do *trigger*.

$$V_{det} = 7,64km/s$$

Partindo do princípio que a velocidade de detonação é constante ao longo da carga pode-se então calcular o intervalo de tempo que decorre desde que a CEVD dispara até ao centro da imagem captada para este ensaio, dado a sexta FO do segundo conjunto ter ficado centrada na imagem:

$$\frac{12,94mm}{7,64mm/\mu s} = 1,694\mu s$$

Sabendo que o tempo decorrente para que o varrimento esteja ao centro da imagem é  $0,5\mu s$  podemos calcular o atraso do *trigger* de forma a centrar na imagem o *timing* de ocorrência dos eventos de interesse.

$$1,694\mu s - 0,500\mu s \cong 1,194\mu s$$

O *trigger* de disparo da CEVD terá então que ter um atraso de  $1,194\mu s$ .