



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Utilização de técnicas cinematográficas ultrarrápidas para caracterização do processo de detonação de emulsões explosivas**

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

**Autor**

**Hugo Alfredo Monteiro Fernandes**

**Orientadores**

**Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes**

**Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva  
Ribeiro**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor José Leandro Simões de Andrade  
**Campos**  
Professor Associado da Universidade de Coimbra

**Coimbra, Julho, 2013**





## **Agradecimentos**

O trabalho que aqui se apresenta não teria sido possível sem a colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de transmitir as minhas palavras de apreço e gratidão.

Em primeiro lugar ao Professor Doutor Ricardo Mendes, orientador, pela partilha do conhecimento e pelas suas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor José Manuel Baranda Ribeiro, orientador auxiliar, pela disponibilidade para realizar ensaios esclarecer dúvidas.

Ao Bruno Tavares pela preparação das emulsões e partilha de conhecimento.

Aos funcionários do DEM, pela disponibilidade na preparação do material necessário para os ensaios.

À instituição LEDAP pelas condições e equipamento que tornaram possível a realização do trabalho experimental.

Aos meus pais e irmã pela compreensão e apoio que sempre me proporcionaram.

Aos meus amigos pela confiança que me transmitem.

**OBRIGADO**



## Resumo

Com a presente dissertação pretende-se caracterizar algumas propriedades de emulsões explosivas à base de nitrato de amónio, sensibilizada, com diferentes concentrações de microesferas ocas de expancel, utilizando técnicas cinematográficas ultrarrápidas, recorrendo a uma câmara eletrónica de varrimento digital e fibras óticas.

Como o comportamento de detonação deste tipo de explosivo, é dependente do diâmetro e porosidade da carga, e pretendendo conhecer a velocidade e forma da frente de onda, foram construídos tubos, em PVC, de diferentes diâmetros, nos quais foi inserida emulsão explosiva à base de nitrato de amónio, sensibilizada com diferentes concentrações de microesferas ocas de expancel. Ao longo do comprimento do tubo, assim como do diâmetro de uma das bases, foram feitos furos equidistantes, e em cada, foi inserido um par de fibras óticas, conectadas, na extremidade oposta, a uma câmara de varrimento eletrónica ultrarrápida. Pretende-se assim, captar, a radiação emitida no momento de detonação, conduzindo-a para o interior da câmara eletrónica de varrimento, onde chega em tempos diferentes. Processando os dados obtidos com a câmara eletrónica ultrarrápida de varrimento, foram determinadas as velocidades de detonação, e forma da frente de detonação.

No LEDAP, foram realizados ensaios para diâmetros de carga de 15,5mm, 25mm, e 31mm com concentrações de microesferas ocas de expancel entre 0,3% e 2%, com recurso a uma câmara de varrimento eletrónica ultrarrápida, ou com recurso a um osciloscópio e sondas elétricas.

**Palavras-chave:** Velocidade de detonação, Frente de onda, Emulsão explosiva, Nitrato de amónio, streak camera, fibras óticas.



## Abstract

The present dissertation aims to characterize some properties of ammonium nitrate based emulsion explosives sensitized with different concentrations of hollow glass microspheres, using an ultrafast cinematographic technique, employing a digital electronic streak camera and optical fibers.

Since the detonation behavior of this type of explosive, is largely dependent of charge diameter and porosity, three types of tubes, made from PVC, with different diameters, were built to confine an ammonium nitrate based emulsion charge sensitized with different concentrations of hollow glass microspheres. In each tube, equidistant holes were drilled along its length, and along the diameter of one of its bases. A pair of optical fibers were connected from each drilled hole, to the electronic streak camera. The aim is thus, to capture the radiation emitted at the moment of detonation, and to direct it towards the electronic streak camera, to which it arrives at different times. By processing the data obtained by means of the electronic streak camera and optical fibers and also by means of an oscilloscope and electric probes, velocity of detonation, and detonation front shape were determined.

At LEDAP, tests were performed for charge diameters of 15,5mm, 25mm, and 31mm for concentrations of hollow glass microspheres between 0,3% and 2% using either the streak camera and optical fibers or the oscilloscope and electric probes.

**Keywords** Detonation velocity, Detonation front, Explosive emulsion, Ammonium nitrate, Steak Camera, Optical Fibres.



## Índice

Índice de Figuras.....	xii
Índice de Tabelas .....	xvi
Simbologia e Siglas.....	2
Simbologia.....	2
Siglas .....	4
1. INTRODUÇÃO .....	6
1.1. Enquadramento do Trabalho. Motivação e Objetivos .....	6
1.2. Plano e Organização da Tese.....	6
2. Revisão Bibliográfica .....	8
2.1. Física de Explosão .....	8
2.1.1. Combustão até Detonação .....	8
2.1.2. Choque até Detonação .....	8
2.1.3. Iniciação de Sequências Explosivas .....	9
2.1.4. Efeito do Material da Carga Explosiva na Velocidade de Detonação .....	9
2.2. Nitrato de Amónio .....	10
2.2.1. Composição Heterogénea de Nitrato de Amónio .....	11
2.2.2. Comportamento de Explosivos Compósitos .....	11
2.3. Princípio de Funcionamento de uma Câmara Eletrónica de Varrimento Digital Ultrarrápida.....	17
2.3.1. Câmara Eletrónica de Varrimento Digital (CEVD).....	17
2.3.2. CCDs (Charge Coupled Devices).....	18
2.3.3. Trigger/Delay Unit/Frequency Divider.....	19
3. Procedimento Experimental.....	20
3.1. Preparação do Explosivo .....	20
3.2. Preparação dos Ensaios .....	21
3.2.1. Ensaios com Recurso a Fibras Óticas e Câmara Eletrónica de Varrimento ..	21
3.2.2. Montagem com Recurso a um Osciloscópio e Sondas Elétricas.....	30
4. Análise Experimental .....	32
4.1. Tratamento de Dados .....	32
4.1.1. Tratamento de Dados dos Ensaios Obtidos com a CEVD .....	32
4.1.2. Tratamento de Dados dos Ensaios Obtidos com Osciloscópio .....	39
4.2. Resultados Obtidos .....	40
5. Conclusões .....	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
ANEXO A .....	52
ANEXO B .....	70

---

ANEXO C .....	72
ANEXO D .....	76

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Densidade inicial da carga versus diâmetro crítico de detonação [8] .....	13
Figura 2 Velocidade de detonação versus diâmetro da carga [1] .....	13
Figura 3 Efeito do diâmetro da carga na velocidade de detonação para $\rho_0 = 1,021$ e $0,89 \text{ g/cm}^3$ (2) [8].....	14
Figura 4 Velocidade de detonação versus densidade, [7]. .....	16
Figura 5 Velocidade de detonação versus densidade, [7]. .....	16
Figura 6 Diagrama dos principais componentes de uma câmara ultrarrápida de varrimento [3]. .....	17
Figura 7 Fotocronograma típico obtido em ensaio estático. ....	18
Figura 8 Fotocronograma típico obtido em ensaio dinâmico.....	19
Figura 9 <i>Timing</i> do Momento de Varrimento [4]. .....	19
Figura 10 Microesferas oco D30 em solução aquosa, ampliadas com o microscópio. ....	20
Figura 11 Emulsão sensibilizada com 0,6% microesferas D30 para 94,6% de emulsão de NA. ....	21
Figura 12 Ampliação da fita de fibras óticas.....	22
Figura 13 Peça em acrílico com as fibras óticas acopladas.....	22
Figura 14 Tubo de níquel com duas fibras óticas inseridas, iluminado na extremidade oposta.....	22
Figura 15 Ensaio com cordão detonante PETN.....	23
Figura 16 Confinamento cilíndrico em PVC com 31mm de diâmetro e 250mm de altura. 24	
Figura 17 Fotografia do Confinamento com as Fibras Óticas Colocadas num tubo de 15,5mm. ....	24
Figura 18 Carga explosiva de 31mm. ....	25
Figura 19 Configuração esquemática das ligações entre os equipamentos.....	27
Figura 20 Dimensões da CEVD Hamamatsu C7700 [mm]. ....	28
Figura 21 Câmara Eletrônica Ultrarrápida de Varrimento <i>Hamamatsu C7700</i> acoplada ao <i>Hamamatsu CCD C8484</i> . ....	28
Figura 22 CCD Hamamatsu C8484 .....	29
Figura 23 Confinamento cilíndrico de 31mm com as sondas elétricas colocadas nos furos. ....	30

---

Figura 24 Carga explosiva pronta a detonar no interior da câmara de explosões, com cinco sondas elétricas colocadas ao longo do seu comprimento.....	31
Figura 25 Fotocronograma do ensaio dinâmico EX2DE30-3 utilizando a CEVD.....	33
Figura 26 Definição de uma linha de interesse ao longo de uma risca. ....	34
Figura 27 Gráfico intensidade luminosa versus posição, ao longo da linha de interesse. ....	34
Figura 28 Análise de perfil da linha de interesse.....	34
Figura 29 Posição das fibras óticas em relação ao comprimento. ....	35
Figura 30 Tempo ocorrido entre intensidade máxima de radiação em cada fibra ótica. ....	36
Figura 31 Posição das fibras óticas em relação à tampa. ....	37
Figura 32 Frente de onda obtida no ensaio.....	37
Figura 33 Frente de onda para uma carga de 25mm sensibilizada com 2% de esferas D30. ....	38
Figura 34 Relação Posição/Tempo Obtida com Sondas Elétricas e Osciloscópio EX05DE30-11osc.....	39
Figura 35 Comparação das densidades medidas com a densidade teórica. ....	41
Figura 36 Relação da densidade do EE com a velocidade de detonação para um diâmetro de 25mm. ....	42
Figura 37 Relação da densidade do EE com a velocidade de detonação para um diâmetro de 15,5mm. ....	43
Figura 38 Relação da densidade do EE com a velocidade de detonação para um diâmetro de 31mm. ....	43
Figura 39 Comparação dos resultados obtidos para densidade versus velocidade de detonação para cargas de 15,5mm; 25mm; 31mm. ....	44
Figura 40 Relação da velocidade de detonação com o inverso do diâmetro de carga.....	45
Figura 41 Frente de detonação de cargas de 25mm de diâmetro para várias densidades de carga. ....	46
Figura 42 Frente de onda de cargas com diâmetros de 15,5mm e 25mm sensibilizadas com 1% de esferas. ....	47
Figura 43 Confinamento cilíndrico de 25mm, e corte ao longo do seu comprimento.....	72
Figura 44 Tampa do confinamento cilíndrico destinada a inserção do detonador. ....	73
Figura 45 Tampa do confinamento destinada a medição da frente de onda de detonação. ....	73
Figura 46 Montagem integral do confinamento com as tampas colocadas em posição. ....	74
Figura 47 do diálogo de abertura do HPDTA. ....	76
Figura 48 Calibração da escala de tempo.....	77
Figura 49 Condições de operação do CCD. ....	78
Figura 50 Condições de operação do <i>trigger</i> . ....	78

---

Figura 51 Fotocronograma capturado em modo estático após focagem e alinhamento das fitas .....78



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Composição da emulsão explosiva.....	20
Tabela 2 Especificações da CEVD Hamamatsu C7700.....	27
Tabela 3 Distâncias centro-centro entre os furos do confinamento.....	32
Tabela 4 Valores obtidos no ensaio EX2DE30-3 para cálculo da velocidade de detonação. .....	36
Tabela 5 tabela do ensaio EX05DE30-11osc.....	39
Tabela 6 Velocidade de detonação e densidades obtidas para várias concentrações de esferas D30 e diâmetros de carga.....	40
Tabela 7 Densidades da emulsão explosiva medidas para os quais existe discrepância com os valores teóricos.....	42
Tabela 8 Ensaio com diferentes diâmetros de carga para densidades semelhantes.....	47



## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$\rho$  – Densidade de Carga

$D$  – Velocidade de Detonação

$Q$  – Energia Específica de Detonação

$d_{cr}$  – Diâmetro Crítico

$d_{\infty}$  - Diâmetro Infinito

$t_{varr}$  – Tempo de varrimento

$px_{total}$  – Resolução vertical

$px_{máx}$  – *Pixel* onde a intensidade é máxima numa risca

$t_{máx}$  – Tempo onde a intensidade é máxima numa risca

$A$  – Coeficiente de proporcionalidade

$\delta$  – tamanho médio da partícula do sensibilizador

$x$  – Fração mássica do sensibilizador

---

## **Siglas**

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

CCD – Charge Coupled Device

EX – Emulsion Explosive

EE – Explosivo de Emulsão

NA – Nitrato de Amónio

ANFO – Ammonium Nitrate Fuel Oil

FD – Frente de Detonação

MCP - Placa de microcanais

FGAN - Fertilizer Grade Ammonium Nitrate

TNT - Trinitrotolueno

PETN - Tetranitrato de Pentaeritrina

CJ - Chapman-Jouguet

CEVD – Câmara Eletrónica de Varrimento Digital

---

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Enquadramento do Trabalho. Motivação e Objetivos**

Para além, da utilização de emulsões explosivas em operações de desmonte de rocha, estas são, cada vez mais, utilizadas em operações tecnológicas, como na compactação de pós, ou na soldadura de metais dissemelhantes. Como as cargas cilíndricas utilizadas neste tipo de aplicações são de tamanho reduzido, o seu comportamento é diferente do esperado pelas condições de equilíbrio, assumindo um comportamento não ideal, pelo que se justifica a caracterização do processo de detonação de emulsões explosivas, em cargas com as dimensões idênticas às utilizadas nestas aplicações.

Constitui, portanto, objetivo deste trabalho, o desenvolvimento e otimização de uma técnica cinematográfica, recorrendo a uma câmara eletrónica de varrimento ultrarrápida e um conjunto de fibras óticas, para caracterização do processo de detonação de emulsões explosivas, e observação do comportamento de algumas propriedades de detonação, em função do diâmetro e densidade de carga. Foram também realizados ensaios adicionais recorrendo a um osciloscópio e sondas elétricas para determinação da velocidade de detonação.

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

Tendo em vista uma apresentação clara e metódica, a dissertação encontra-se dividida nos seguintes capítulos:

Capítulo 1 – Capítulo introdutório é apresentando o enquadramento, objetivos e motivação do trabalho, assim como a estrutura da dissertação.

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica. Neste capítulo, é referido o estudo realizado sobre física de detonação, comportamento de misturas heterogéneas explosivas à base de nitrato de amónio, assim como, o princípio de funcionamento de uma câmara eletrónica de varrimento digital ultrarrápida.

---

Capítulo 3 – Procedimento experimental. Neste capítulo, será descrita a metodologia utilizada para determinação da velocidade de detonação e frente de onda de detonação, utilizando a CEVD e fibras óticas, assim como dos ensaios recorrendo a um osciloscópio e sondas elétricas,

Capítulo 4 – Análise experimental. Serão apresentados e tratados os dados obtidos com o procedimento experimental.

Capítulo 5 - Conclusões. Confirmação dos resultados obtidos, conclusões, descrição das vantagens e desvantagens dos dois métodos utilizados, e ideias para sua otimização para implementação em trabalhos futuros.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Física de Explosão**

#### **2.1.1. Combustão até Detonação**

Quando uma substância explosiva é confinada e inflamada numa extremidade, o gás gerado a partir da decomposição química da mistura explosiva fica retido, resultando num aumento de pressão na superfície de combustão, que por sua vez, aumenta a velocidade de combustão linear. Em explosivos detonantes a velocidade de combustão linear é elevada por impulsos de pressão gerados na superfície de combustão que excedem a velocidade do som no meio, resultando numa detonação. Este fenómeno varia consoante o tipo de composição explosiva, granulometria, densidade do explosivo e condições de confinamento. Este princípio é utilizado em fusíveis de atraso e na explosão de detonadores.

#### **2.1.2. Choque até Detonação**

Substâncias explosivas podem ser detonadas se sujeitas a uma onda de choque de alta velocidade. Este método é muitas vezes usado na iniciação de explosivos secundários. Detonação de um explosivo primário vai gerar uma onda de choque que inicia uma explosão secundária se estiver na sua proximidade. A onda de choque comprime as partículas dando origem a aquecimento adiabático elevando a temperatura acima da temperatura de decomposição do material explosivo. Os cristais explosivos passam por uma decomposição química exotérmica que acelera a onda de choque. Se a velocidade da onda de choque na composição explosiva exceder a velocidade do som, ocorre detonação, para tal, é necessário confinar a carga explosiva, por exemplo, no interior de um tubo.

Apesar de a iniciação da detonação não se dar instantaneamente o atraso é negligenciável, na ordem dos microssegundos, para misturas homogéneas. Para misturas heterogéneas as características da zona de reação vão alterar o comportamento do explosivo. Numa detonação não ideal, a onda propaga-se a velocidade constante, mas as suas

---

caraterísticas são afetadas significativamente por condições como o diâmetro e o confinamento da carga.

### **2.1.3. Iniciação de Sequências Explosivas**

Para que ocorra detonação de certas composições, é muitas vezes, necessário criar condições de pressão e temperatura que não podem ser atingidas apenas com deflagração. Nesses casos, a composição explosiva pode ser iniciada ou detonada através de uma sequência de iniciação. Este processo consiste num arranjo de componentes explosivos, tal que a força inicial do primário é transmitida e intensificada até atingir e disparar a composição explosiva principal. O segundo componente da sequência vai depender do tipo de processo necessário para a iniciação principal da composição explosiva. No caso de se pretender detonação da composição explosiva, então, o segundo componente da sequência vai queimar até detonação de modo a transmitir uma onda de choque até à composição principal.

### **2.1.4. Efeito do Material da Carga Explosiva na Velocidade de Detonação**

O processo de detonação pode ser considerado uma onda liderada por uma frente de choque, que avança com velocidade constante  $D$  no explosivo não consumido, é seguido de uma zona de reação química.

Para a onda de detonação se propagar, a sua velocidade na zona de reação, deve ser igual à soma da velocidade do som e da velocidade do fluxo de material explosivo:

$$D = U + C$$

Onde  $D$  é a velocidade da frente de onda em regime permanente,  $U$  é a velocidade das partículas e  $C$  a velocidade da onda de som. Quando a velocidade das partículas é muito baixa, a onda de choque é lenta e a sua velocidade aproxima-se da velocidade do som, dando lugar a uma detonação.

Aplicando as propriedades fundamentais da física de conservação de massa, energia e momento ao longo da onda de choque, juntamente com a equação de estado para a composição explosiva, conclui-se que a velocidade de detonação é determinada pelo material que constitui o explosivo e a velocidade do material.

## 2.2. Nitrato de Amónio

O nitrato de amónio foi preparado pela primeira vez em 1654 por Glauber, mas apenas no início do século XIX, foi considerado para o uso em explosivos por Grindel e Robin como um substituto para o nitrato de potássio na pólvora negra. Suas propriedades explosivas foram relatadas em 1849 por Reise e Millon, quando uma mistura de pó de nitrato de amónio e carvão explodiu por aquecimento.

O nitrato de amónio não foi considerado um explosivo embora pequenos incêndios e explosões tenham ocorrido envolvendo nitrato de amónio, por todo o mundo.

Após o fim da 1ª Guerra Mundial, o nitrato de amónio começou a ser usado como fertilizante (FGAN).

Apenas após investigação na sequência de vários acidentes, envolvendo FGAN, foi demonstrado, que o nitrato de amónio era muito mais perigoso do que se pensava anteriormente.

O método mais corrente de produção de nitrato de amónio é o processo Haber, também conhecido como Haber–Bosch, este processo consiste na mistura de vapor de amónio e ácido nítrico, o que dá origem a uma reação fortemente exotérmica, que eleva a temperatura acima da temperatura de ebulição, concentrando-a.



Posteriormente, por evaporação a vácuo, a solução é uma vez mais concentrada. Utilizando métodos diferentes de remoção de água, conseguem-se várias formas de nitrato de amónio, sendo um dos processos mais usados, o processo de *prilling*. Desenvolvido no final dos anos 40, consiste em bombear uma solução quente de nitrato de amónio do topo de uma torre de *prilling*, de onde é pulverizada para o ar fresco e deixada cair, arrefecendo, e formando *pellets* esféricos. Para produzir nitrato de amónio de grau explosivo, é requerida uma torre de *prilling* mais elevada para conferir uma maior porosidade, o que irá aumentar a sua capacidade de absorção de, por exemplo, *fuel oil*, necessário para o fabrico de ANFO, nitroglicerina, TNT, ou na preparação de emulsões explosivas. O desenvolvimento deste processo, veio tornar a produção de nitrato de amónio

---

mais rápida e menos dispendiosa, permitindo o seu uso como uma fonte barata de oxigénio disponível para explosivos comerciais.

### **2.2.1. Composição Heterogénea de Nitrato de Amónio**

Os explosivos de emulsão (EE), ou em inglês, *emulsion explosives* (EX), também conhecidos como *slurry explosives*, foram desenvolvidos há mais de 40 anos [11], e são, geralmente constituídos por duas fases imiscíveis. Uma fase oxidante à base de nitrato de amónio, geralmente em forma de *prills*, sobressaturado numa solução de água,  $\text{NaNO}_3$ , ou  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  que fornece a maior parte do oxigénio para a reação. E uma fase orgânica, constituída por um emulsionante [8], para assegurar o estado estável da base de emulsão no tempo requerido [1], e produtos de óleo refinados, i.e. óleo industrial, *diesel, fuel oil*.

As características dos EE foram estudadas extensivamente [1]. Tendo uma velocidade de detonação elevada  $5 - 6 \text{ km/s}$ , os EE para além de, possuírem uma elevada resistência à água, baixa toxicidade dos produtos de explosão, e baixa combustibilidade, podendo ser submetidos a esforços mecânicos [1], conferindo-lhes segurança na sua produção e uso [8]. Estes fatores, juntamente com a possibilidade de obter uma abrangente gama de densidades, velocidades de detonação, e pressões [8], em comparação com os explosivos comerciais convencionais, tornam as EE frequentemente utilizadas na indústria, nomeadamente, em operações de desmonte de rocha [7], assim como, cada vez mais, em operações tecnológicas de soldadura de metais dissemelhantes [17] e compactação de pós [19] [18] [17].

Uma das características dos EE é a impossibilidade de detonação sem adição de sensibilizadores [12], que servem como centro inicial da zona de reação química na frente da onda de detonação. Os sensibilizadores podem ser microbolhas, adicionadas por métodos químicos, perlite porosa, microesferas ocas de expandel [1] [7] [16], ou microbalões de polímero [13]. A sua adição diminui a densidade da carga, aumentando a porosidade, o que altera significativamente os parâmetros de detonação [7] [8] [16].

### **2.2.2. Comportamento de Explosivos Compósitos**

Os EE são geralmente classificados como explosivos compósitos, diferenciando-se dos explosivos convencionais, por apresentarem um comportamento de detonação não ideal, uma vez que a sua velocidade de detonação, pressão, frente de

detonação (FD), ou expansão isentrópica manifestam uma dependência elevada com a natureza e tamanho do confinamento da carga explosiva, quando comparada com explosivos convencionais, assim como um comportamento real significativamente diferente do esperado em equilíbrio, e cálculos em regime permanente, baseados no modelo unidimensional Chapman-Jouguet (CJ) e à não monotonia da curva de detonação  $D(\rho)$ .

A dependência não monótona da velocidade de detonação  $D(\rho)$  de composições explosivas é causada por mudanças no mecanismo de detonação. Após compressão por choque, o componente heterogéneo da taxa de decomposição diminui devido a homogeneização da carga. Este comportamento deve-se à decomposição relativamente lenta do nitrato de amónio, que causa uma zona de reação espessa, que em combinação com perdas de calor laterais e ondas de rarefação extinguem as reações de decomposição.

Para explosivos não ideais, é conhecido que á medida que a velocidade de detonação aumenta, inicialmente, a porosidade diminui, devido a um aumento na energia específica de detonação  $Q$ , visto como uma dependência  $D^2 \sim Q$ . No entanto também se conhece que abaixo de um valor de porosidade, mas ainda muito abaixo do valor teórico de densidade máxima, a velocidade de detonação diminui com a porosidade impedindo a detonação. Isto pode ser explicado com o facto da reação em explosivos de emulsão ser incompleta, diminuindo com o aumento da densidade. Esta observação pode ser explicada pela competição entre dois fenómenos. Por um lado, um aumento da densidade provoca o aumento da energia específica libertada e da velocidade de detonação. Por outro, um aumento da densidade dá origem a um aumento do diâmetro crítico do EE. Com a diminuição da porosidade, o mecanismo heterogéneo muda para um mecanismo homogéneo. Na detonação homogénea de explosivos não porosos, a propagação da onda de choque através da carga comprime as camadas de explosivos à frente da FD, trazendo assim, o seu calor e reação química. O aquecimento do explosivo necessário para excitação da reação pode ser atingido apenas com velocidades elevadas. Para densidades mais baixas, o aumento da temperatura devido a compressão de uma camada densa e homogénea é insignificante, e a reação química não é iniciada.

Conhece-se também, que as diferenças entre as velocidades de detonação teóricas e experimentais, extrapoladas até um diâmetro infinito ( $d_\infty$ ), são muito baixas, especialmente para elevadas densidades iniciais. No entanto, esta diferença aumenta a baixas

densidades, sendo a principal razão, apontada para este facto [15], as heterogeneidades da zona de reação, devido à grande quantidade de sensibilizador. O rápido aumento do diâmetro crítico com o aumento da densidade, foi também relatado em [14] [15].

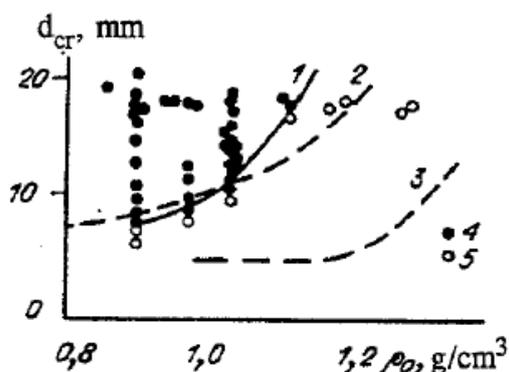


Figura 1 Densidade inicial da carga versus diâmetro crítico de detonação [8]

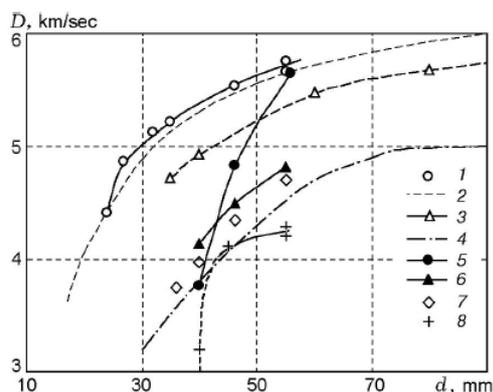


Figura 2 Velocidade de detonação versus diâmetro da carga [1]

### 2.2.2.1. Diâmetro Crítico

O diâmetro crítico de detonação,  $d_{cr}$  é uma característica importante da detonação de cargas explosivas que determina a possibilidade da sua utilização prática [4], o nitrato de amónio é considerado um explosivo não ideal devido ao seu valor elevado de diâmetro infinito ( $d_{\infty}$ ), valor acima do qual a detonação é ideal. E um valor relativamente pequeno para o diâmetro crítico ( $d_{cr}$ ), valor abaixo do qual ocorre distorção da frente de onda, reduzindo a sua velocidade e causando assim o seu desaparecimento gradual, para a maior parte dos casos práticos nunca atingindo o valor ideal previsto teoricamente.

Para os mesmos tamanhos de partículas de explosivos compósitos de nitrato de amónio, aumentar a densidade da carga explosiva, ou seja, transitar de um estado poroso para um estado de baixa porosidade (*pressed charges*) para um estado não poroso (*water-filled*) dá origem a um aumento significativo do  $d_{cr}$ . Em contraste, o  $d_{cr}$  das cargas explosivas diminui à medida que a sua densidade aumenta até uma densidade crítica perto o valor máximo possível. [4]

O efeito da dependência da velocidade de detonação no diâmetro da carga, pensa-se estar relacionado com a espessura da zona de reação. Explosivos que tenham zonas de reação mais espessas, exibem maior dependência no diâmetro. O efeito do diâmetro pode ser medido em experiências *rate-stick*. Nestas experiências é medida a velocidade de detonação em cargas de diâmetros diferentes.

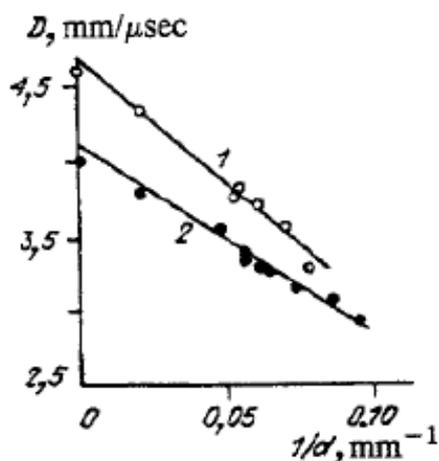


Figura 3 Efeito do diâmetro da carga na velocidade de detonação para  $\rho_0 = 1,02$  (1) e  $0,89$  g/cm<sup>3</sup> (2) [8].

Em 2006 Sil'vesterov (6) desenvolveu um modelo para explosivos não ideais, no qual o comportamento não monotónico da velocidade da FD, numa carga de diâmetro finito, é explicado por aumentos da espessura da zona de reação com a diminuição da porosidade, sendo a falha de detonação explicada por um aumento do diâmetro crítico,

$$d_{cr} = \frac{A\delta}{x^{1.5}}$$

A – Coeficiente de proporcionalidade;

$\delta$  – tamanho médio da partícula do sensibilizador;

---

$x$  – Fração mássica do sensibilizador;

### 2.2.2.2. Relação da densidade de carga com a velocidade de detonação

Para explosivos ideais, a velocidade da onda é proporcional à densidade do material explosivo.

Esta observação pode ser correlacionada empiricamente por dados experimentais. Para materiais heterogêneos, a velocidade de detonação aumenta, baixando à medida que a densidade de compactação aumenta, segundo:

$$D = j + k \rho_0$$

Onde  $j$  e  $k$  são constantes particulares a cada explosivo e  $\rho_0$  é a densidade do material por reagir.

Alterar a densidade tem efeitos opostos nos diâmetros críticos das cargas porosas de explosivos de nitrato de amónio. No entanto como a compressibilidade dinâmica das cargas porosas de explosivos de nitrato de amónio não são fundamentalmente diferentes para todas as densidades, o efeito da densidade sobre o valor de  $d_{cr}$  é consequência de uma diferente mudança na taxa de libertação de energia  $Q_{p,V}$ .

À medida que a quantidade de microesferas diminui, a porosidade diminui, e tanto a densidade como o diâmetro crítico aumentam. Isto é bem conhecido para experiências com microesferas de expancel [1]. Nestas experiências, a relação  $D = D(\rho_0)$  é determinada para um diâmetro constante da carga cilíndrica  $d$ . À medida que a porosidade diminui, aumentando a densidade, a velocidade de detonação primeiro cresce devido a um aumento na energia específica do explosivo. Com um seguinte aumento de densidade à medida que os valores de  $d$  e  $d_{cr}$  se aproximam, a velocidade começa a decrescer, chegando a um momento em que  $d \leq d_{cr}(\rho_{cr})$  é satisfeito i.e. a detonação falha. A densidade neste momento é a densidade crítica  $\rho_{cr}$  para um dado diâmetro de carga. Fisicamente, este conceito não tem significado uma vez que  $\rho_{cr}$  depende do diâmetro da carga. [1]

No alcance de  $\rho_m < \rho_0 < \rho_{cr}$ , a velocidade de detonação diminui devido ao efeito de rarefação lateral à medida que o diâmetro constante da carga e o diâmetro crítico de EE se aproximam. Esta explicação implica que a relação  $D = D(\rho_0)$  como extremo para o valor constante de  $d$  é um efeito da bidimensionalidade. Esta relação não pode ser explicada adequadamente sem ter em conta o efeito do diâmetro de carga na velocidade de

detonação para uma carga de diâmetro finito. Para EE, a espessura da zona de reação deve aumentar à medida que aumenta a densidade.

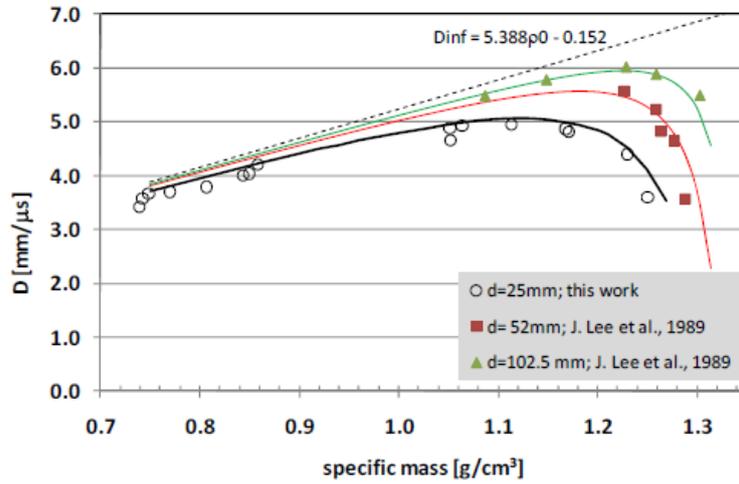


Figura 4 Velocidade de detonação versus densidade, [7].

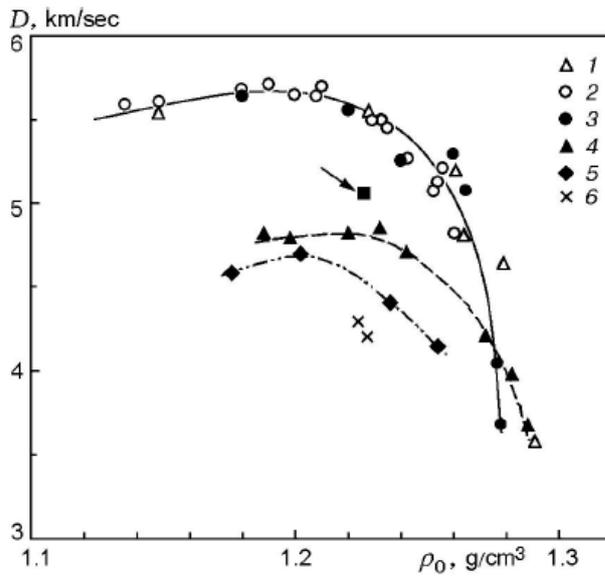


Figura 5 Velocidade de detonação versus densidade, [1].

---

## 2.3. Princípio de Funcionamento de uma Câmara Eletrônica de Varrimento Digital Ultrarrápida

### 2.3.1. Câmara Eletrônica de Varrimento Digital (CEVD)

Uma câmara eletrônica de varrimento ultrarrápida é um instrumento usado para medir a variação da intensidade de um pulso de luz com o tempo, de fenômenos óticos ultrarrápidos, permitindo a conversão de um perfil de tempo num perfil de espaço.

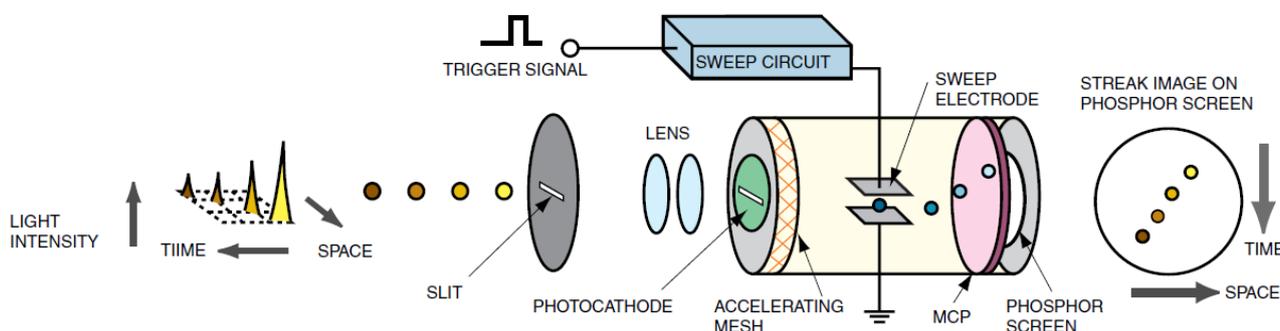


Figura 6 Diagrama dos principais componentes de uma câmara ultrarrápida de varrimento [3].

Na figura, podem ser observados quatro pontos que correspondem a quatro pulsos óticos que variam ligeiramente em termos de espaço e tempo, com diferentes intensidades óticas.

Os pulsos óticos dão entrada no *slit*, passando pela ótica de entrada, atingindo o fotocátodo que os converte, sequencialmente, num número de elétrons proporcional à intensidade da luz incidente.

Os elétrons são acelerados por meio de um par de elétrodos de aceleração, passando de seguida por um par de elétrodos de varrimento, que aplica uma corrente elétrica de alta tensão aos elétrodos, a uma temporização sincronizada com a luz incidente.

Isso inicia um varrimento de alta velocidade, desviando os elétrons, que chegam em vários tempos, em ângulos diferentes, no sentido vertical, conduzindo-os para a MCP (placa de microcanais).

Assim que os elétrons atravessam a MCP, são multiplicados vários milhares de vezes, incidindo posteriormente num ecrã de fósforo, onde são, uma vez mais, convertidos em luz.

A imagem do ecrã de fósforo, correspondente ao pulso ótico que chegou primeiro, é colocada na posição de topo, com as outras imagens sendo arranjadas

sequencialmente do topo para a base, servindo, na prática, de eixo de tempo. O brilho das imagens de fósforo é também proporcional à intensidade dos respetivos pulsos óticos incidentes. A posição na direção horizontal da imagem de fósforo corresponde à localização horizontal da luz incidente.

Deste modo, a câmara de varrimento, pode ser usada para converter mudanças na intensidade temporal e espacial da luz a ser medida numa imagem mostrando a distribuição de brilho do ecrã de fósforo. É assim possível, determinar a intensidade ótica da imagem de fósforo, assim como o tempo e a posição da luz incidente através da localização da imagem de fósforo, por meios digitais, ou analógicos. [3] [4]

### 2.3.2. CCDs (Charge Coupled Devices)

No caso de a imagem ser captada por métodos digitais, um dos componentes mais utilizados para digitalizar a localização da imagem de fósforo, são os CCDs (Charge Coupled Devices), ou dispositivos de carga acoplada. Os CCD são circuitos integrados baseados em silício, consistindo numa matriz densa de foto díodos que convertem a energia luminosa em forma de fotões, numa carga eletrónica. Os eletrões gerados pela interação de fotões com os átomos de silício são armazenados, e subseqüentemente, podem ser transferidos através do chip por meio de registos que fazem o *output* para um amplificador.

No caso específico da câmara eletrónica de varrimento ultrarrápida, a imagem ótica de fósforo com a informação de intensidade para cada pixel é convertida para uma imagem de riscas (*streak*) com informação espacial ao longo do eixo horizontal e temporal ao longo do eixo vertical. Cada ponto da imagem de riscas providencia informação representando intensidade, localização e tempo. O detetor CCD cria um mapa ponto por ponto dessa informação para posterior avaliação.



Figura 7 Fotocronograma típico obtido em ensaio estático.

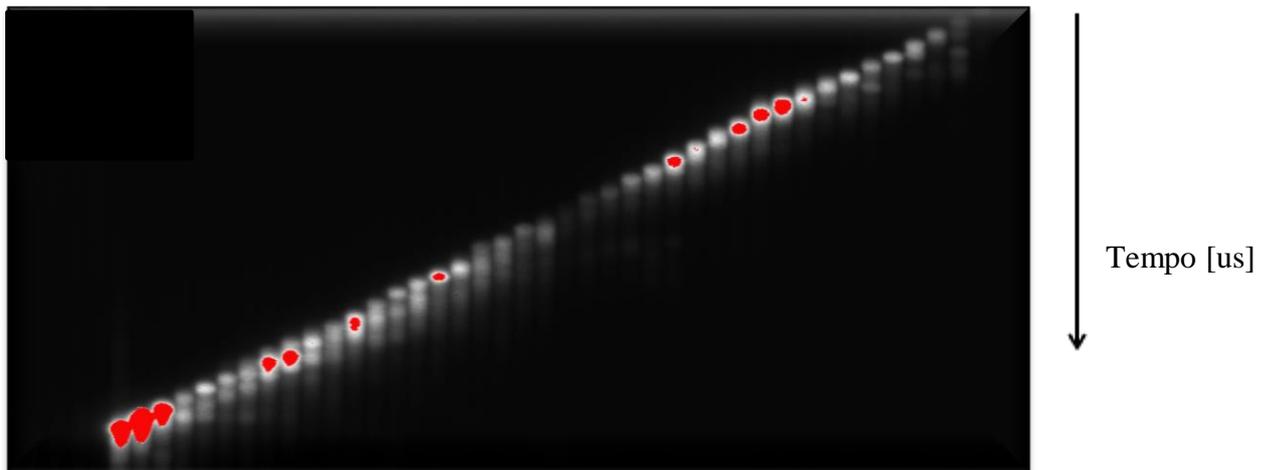


Figura 8 Fotocronograma típico obtido em ensaio dinâmico.

### 2.3.3. Trigger/Delay Unit/Frequency Divider

Para medir fenômenos óticos ultrarrápidos, usando uma câmara ultrarrápida de varrimento, é necessário configurar um *trigger*, que quando iniciado, inicia o processo de varrimento de elétrons no interior da câmara. O *trigger* deve ser ajustado, para o varrimento de elétrons se realizar no momento em que a radiação proveniente do fenômeno a observar dá entrada na câmara. Para esse efeito, usa-se uma unidade de atraso (*delay unit*), que controla a duração do sinal do trigger que inicia o varrimento, e um divisor de frequências (*frequency divider*) que divide a frequência do sinal externo do trigger caso a frequência de repetição do sinal do trigger seja demasiado elevada.

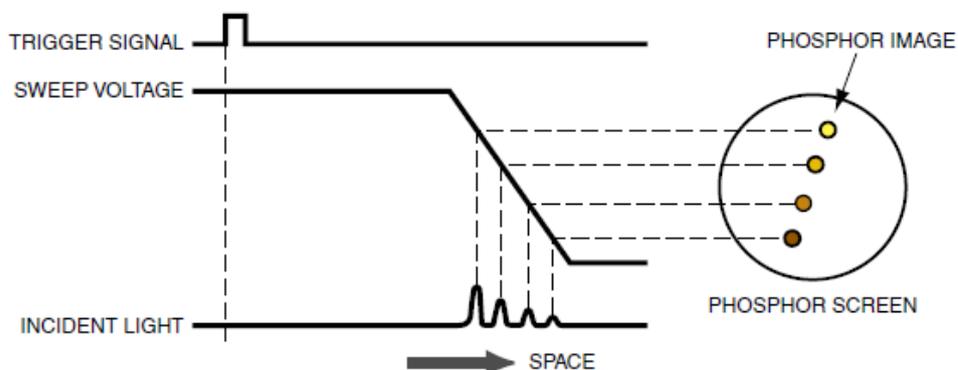


Figura 9 *Timing* do Momento de Varrimento [4].

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Preparação do Explosivo

As emulsões explosivas usadas nos ensaios foram preparadas no LEDAP, sendo a sua constituição:

Solução contínua – 6,5%		Solução descontínua – 93,5%	
Óleo	70%	Nitrato de amónio	89,5%
Emulsionante	30%	Água	10,5%

Tabela 1 Composição da emulsão explosiva.

Com a finalidade de tornar a emulsão de nitrato de amónio explosiva, em cada ensaio, a composição, foi sensibilizada com a adição de microesferas de expancel oco D30, em diferentes concentrações.

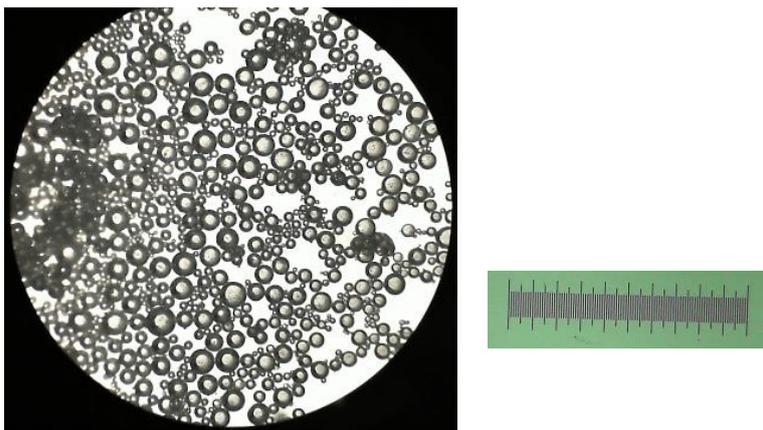


Figura 10 Microesferas oco D30 em solução aquosa, ampliadas com o microscópio.

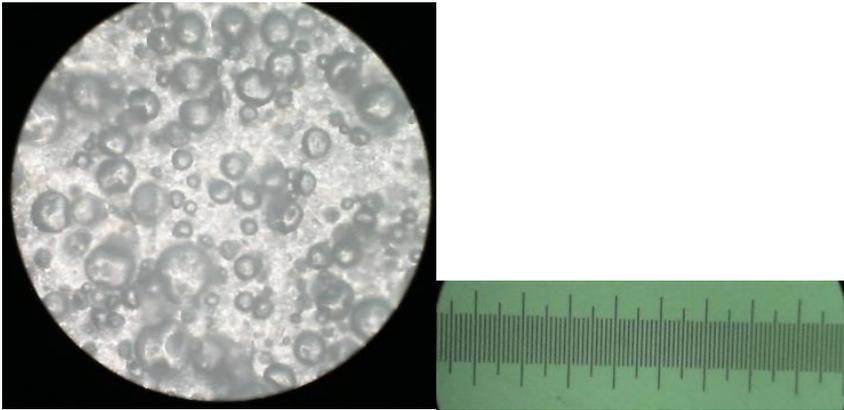


Figura 11 Emulsão sensibilizada com 0,6% microesferas D30 para 94,6% de emulsão de NA.

## 3.2. Preparação dos Ensaios

Foram realizados 9 ensaios recorrendo a fibras óticas e câmara eletrónica de varrimento e x ensaios recorrendo a sondas elétricas e um osciloscópio.

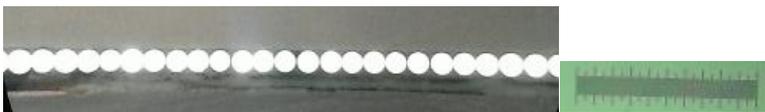
### 3.2.1. Ensaios com Recurso a Fibras Óticas e Câmara Eletrónica de Varrimento

Cada ensaio consistiu na preparação de um tubo e duas tampas de dimensões conhecidas, fabricadas em PVC, com a finalidade de confinar a emulsão explosiva sensibilizada. Ao longo do comprimento do tubo, foram conectadas fibras óticas, assim como ao longo do diâmetro de uma das tampas. As extremidades opostas das fibras óticas foram alinhadas, formando uma fita, destinada a conectar à CEVD. As cargas explosivas foram detonadas numa câmara de explosão. Pretende-se, captar a radiação emitida no momento de detonação, por meio de fibras óticas conectadas à carga e conduzir os fótons resultantes para o *slit* da CEVD onde chegam em tempos diferentes.

#### 3.2.1.1. Preparação das Fibras Óticas

Para conectar a CEVD à carga explosiva, usou-se um cabo, contendo um conjunto de fibras óticas, de 0,250mm de diâmetro.

Na extremidade do cabo que se pretende conectar à CEVD, as fibras óticas foram separadas, alinhadas, e coladas, formando uma fita.



**Figura 12** Ampliação da fita de fibras óticas.

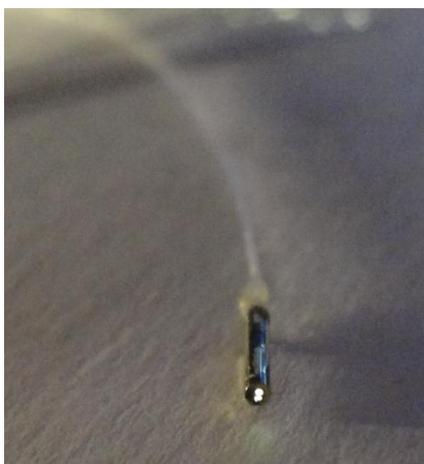
A fita de fibras óticas foi fixa no centro de uma peça de acrílico, com formato cilíndrico, e um diâmetro que possibilita a sua fixação no *slit* da CEDV. Para assegurar uma superfície regular, e obter melhores resultados, a extremidade da fita de fibras óticas foi polida.



**Figura 13** Peça em acrílico com as fibras óticas acopladas.

As fibras óticas foram ordenadas e numeradas, de acordo com a ordem de acendimento, na fita de fibras óticas.

Cada par de fibras óticas consecutivas por ordem de acendimento, na fita de fibras óticas, foi inserido em tubos de níquel com  $1.1\text{mm}$  de diâmetro e  $10\text{mm}$  de altura. De modo a eliminar irregularidades, e colocar a face das fibras óticas no plano da superfície interior do confinamento e para garantir estanquicidade entre as fibras óticas e o confinamento. As fibras óticas foram fixas com *epoxy* e polidas.



**Figura 14** Tubo de níquel com duas fibras óticas inseridas, iluminado na extremidade oposta.

---

### 3.2.1.2. Determinação do Atraso do Trigger

Antes de se proceder aos ensaios com a EE, realizaram-se ensaios com cordão detonante de PETN, com velocidade de detonação conhecida, para conhecer o atraso do varrimento de eletrões da câmara em relação ao *trigger*. Após o primeiro ensaio verificou-se que o atraso não coincidia com o tabelado pela fabricante da CEVD. Com a finalidade de determinar o atraso para um tempo de varrimento de  $10\mu s$ , realizaram-se quatro ensaios com cordão detonante de PETN, determinando-se um atraso de  $11\mu s$ . Conhecido este valor, foi possível estimar a distância de colocação do *trigger* para capturar o maior número de sinais possível, assim como a forma da frente de detonação, para este espaço de tempo.



Figura 15 Ensaio com cordão detonante PETN.

### 3.2.1.3. Construção do Confinamento Cilíndrico da Carga Explosiva

Para confinar a carga explosiva, construíram-se, nas oficinas do DEM, tubos em PVC, com diâmetros internos de  $15,5mm$ ,  $25mm$ ,  $31mm$ .

Em cada tubo foram feitos entre 8 a 10 furos equidistantes, alinhados ao longo do comprimento, com  $1,2mm$  de diâmetro. Para facilitar a colocação da emulsão explosiva, foram feitos entre três a cinco furos.



**Figura 16** Confinamento cilíndrico em PVC com 31mm de diâmetro e 250mm de altura.

Para cada tubo, construíram-se, no mesmo material, duas tampas diferentes. Uma, com um furo no centro, para colocação do detonador, e outra, com furos de 1,2mm de diâmetro, para colocação de fibras óticas.

Com um paquímetro, com uma resolução de 0.02mm, foram medidas as distâncias fora-fora entre os furos do tubo, e da face interior da tampa.

Cada tubo de níquel contendo um par de fibras, foi colocado, por ordem de acendimento na fita de fibras óticas, nos furos do tubo e tampa, de forma a garantir o alinhamento das fibras óticas com o eixo transversal do tubo e colocar a extremidade dos tubos de níquel à face com a superfície interior do confinamento. Para assegurar a posição correta e conferir resistência, os tubos de níquel, foram fixos com cola rápida, e *epoxy*.



**Figura 17** Fotografia do Confinamento com as Fibras Óticas Colocadas num tubo de 15,5mm.

---

#### 3.2.1.4. Colocação do Explosivo no Tubo

A colocação do explosivo no tubo foi feita de forma a evitar a presença de ar no interior, o que pode prejudicar o ensaio, podendo mesmo impedir a detonação. Para assegurar detonação foi colocado um *booster* de explosivo plástico entre o detonador e a mistura explosiva sensibilizada, e colocadas as duas tampas.



Figura 18 Carga explosiva de 31mm.

#### 3.2.1.5. Trigger

Para cada ensaio foi construído um *trigger*, que faz a ligação entre a carga explosiva e o mecanismo de início de varrimento de elétrons da CEVD. O *trigger* é conectado a um cabo coaxial que quando fecha o circuito dá início ao procedimento de varrimento de elétrons da CEVD.

O *trigger* consiste num fio de cobre, de diâmetro muito reduzido, revestido com uma película fina de verniz, o fio é entrelaçado nele próprio, não entrando em curto-circuito, devido à película de verniz, que impede o contato entre o fio, mantendo o circuito fechado. Antes de inserir o *trigger* na carga explosiva, numa posição estimada para conseguir o máximo número de sinais no tempo de varrimento pretendido, a sua extremidade é cortada, abrindo o circuito. O calor libertado no processo de detonação faz com que o verniz arda, ficando os fios de cobre em contato, fechando o circuito elétrico, e dando início ao procedimento de varrimento de elétrons da CEVD.

**Nota:** Foi determinado um atraso de  $11\mu\text{s}$  para um tempo de varrimento de  $10\mu\text{s}$ .



### 3.2.1. Configuração do Sistema

Os dispositivos encontram-se configurados segundo o esquema:

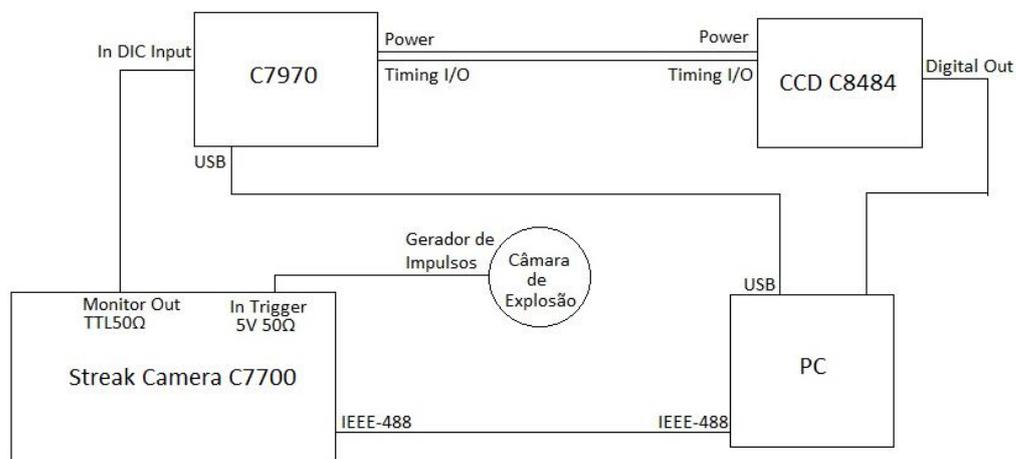


Figura 19 Configuração esquemática das ligações entre os equipamentos.

#### 3.2.1.1.1. Câmara Eletrônica de Varrimento Digital Ultrarrápida *Hamamatsu* C7700

Foi utilizada uma CEVD fabricada pela *Hamamatsu*, modelo C7700 com as seguintes especificações e dimensões:

Resposta Espectral	200 nm até 850 nm
Unidade de varrimento	Interna
Resolução temporal	<5 ps
Frequência de varrimento	Varrimento único até 1 kHz
Alcance Dinâmico	> 1:1000
Tempo de varrimento	500 ps até 1 ms
Comprimento efetivo do fotocátodo	17 mm
Fonte de alimentação	AC 100 V até AC 240 V, 50 Hz/60 Hz

Tabela 2 Especificações da CEVD *Hamamatsu* C7700.

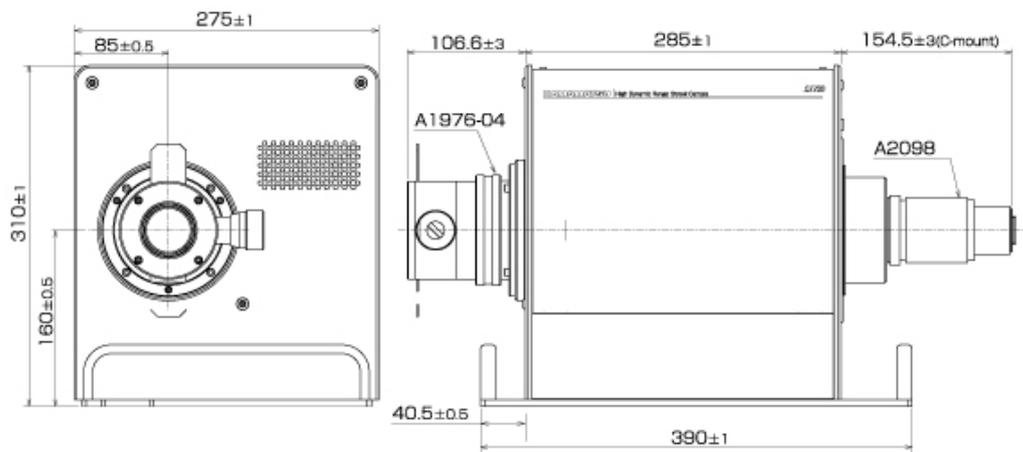


Figura 20 Dimensões da CEVD Hamamatsu C7700 [mm].



Figura 21 Câmara Eletrónica Ultrarrápida de Varrimento *Hamamatsu C7700* acoplada ao *Hamamatsu CCD C8484*.

Devido à sensibilidade da CEVD, é necessário referir alguns cuidados que se devem ter no seu manuseamento.

O principal cuidado a ter com a CEVD é a sobre-exposição a radiação, o que em certos casos pode dar origem a danos ou mesmo destruição do dispositivo. Para tal deve-se monitorizar continuamente a aquisição de imagens quando se captura radiação em tempo real, usando o modo *live display*, e ter em atenção, caso apareçam sinais fortes. Daí ser recomendado adquirir imagens *live* com o máximo de contraste possível.

---

No caso de imagens estáticas, é importante controlar o tempo de exposição para a câmara CCD. Deve-se garantir que no caso de estar a utilizar a câmara CCD o tempo de exposição é não mais que o suficiente para obter resultados.

Em caso de algum problema com a câmara, por exemplo, se o sistema estiver a ser irradiado com demasiada luz, pode-se usar o modo emergência. Desligando o *shutter*, o ganho do MCP para 0 e eventualmente fechando o *slit*. Esta função pode ser executado pressionando F8 mas não é operado em certas condições, por exemplo, se um diálogo de opções estiver a ser executado.

Função *Auto streak shutter* – Caso selecionado, o *shutter* vai sempre abrir automaticamente quando começar a aquisição e fechar quando acaba. Evitando-se assim sobre-exposição.

#### **3.2.1.1.2. CCD Hamamatsu C8484**

Como a imagem de riscas tem curta duração, usa-se uma câmara de alta sensibilidade do tipo CCD conectada à câmara eletrónica de varrimento. A análise das imagens é feita transferindo as imagens através de um placa de captura de imagem num computador.

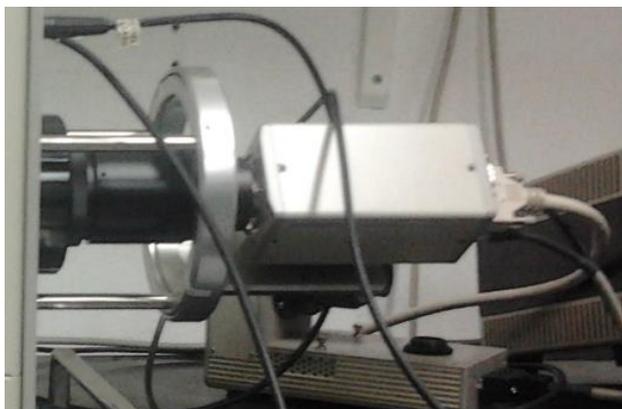


Figura 22 CCD Hamamatsu C8484

#### **3.2.1.1.3. Computador e Software HDPTA**

Para utilizar a CEVD e tratar os fotocronogramas obtidos, utilizou-se o *software* HDPTA. O seu modo de operação e principais funções encontra-se descrito no capítulo de tratamento de dados.

### 3.2.2. Montagem com Recurso a um Osciloscópio e Sondas Elétricas

Para estes ensaios, foram construídas cinco sondas elétricas e colocadas ao longo de cinco furos equidistantes alinhados com o comprimento do tubo. Não foram colocadas tampas, não sendo possível obter a forma da frente de detonação.

A principal diferença entre os resultados obtidos com este método em relação ao método recorrendo a uma CEVD e fibras óticas, está no meio de obtenção dos sinais, enquanto neste se obtém um sinal ótico por meio das fibras óticas conectadas à câmara de varrimento eletrónico ultrarrápida, com este método os sinais elétricos e obtidos por meio de sondas elétricas, conectadas a um osciloscópio.

O princípio de funcionamento das sondas elétricas, é semelhante ao do *trigger* descrito anteriormente, cada sonda consiste num fio de cobre, revestido com uma película fina de verniz, entrelaçado nele próprio, com a extremidade cortada, colocada no interior de uma agulha e posteriormente nos furos feitos ao longo de um confinamento cilíndrico. No momento de detonação, o verniz arde, e os fios de cobre contactam, fechando o circuito, transmitindo um sinal elétrico para o osciloscópio, que retribui um gráfico de diferença de potencial do sinal em função do tempo ocorrido entre a passagem de corrente elétrica por cada sonda.

Os dados foram retirados diretamente do osciloscópio, sendo também possível a obtenção de uma folha de cálculo com os mesmos dados.

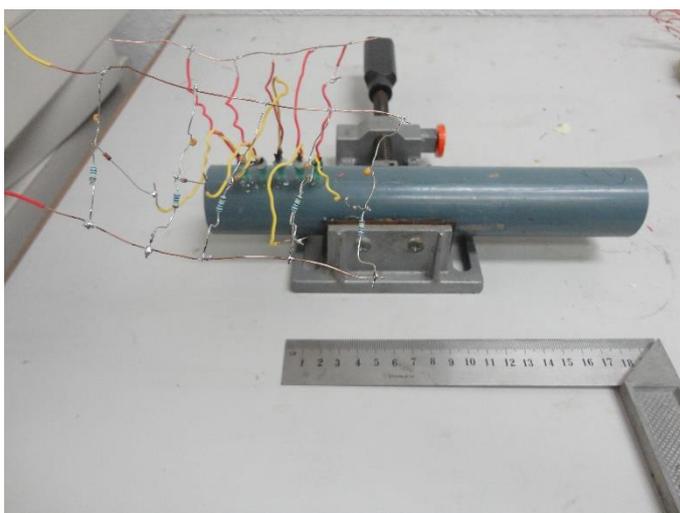


Figura 23 Confinamento cilíndrico de 31mm com as sondas elétricas colocadas nos furos.



**Figura 24** Carga explosiva pronta a detonar no interior da câmara de explosões, com cinco sondas elétricas colocadas ao longo do seu comprimento.

## 4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

### 4.1. Tratamento de Dados

#### 4.1.1. Tratamento de Dados dos Ensaios Obtidos com a CEVD

Para descrever o método de determinação de velocidade de detonação e forma de frente de onda, exemplificou-se o ensaio EX2DE30-3. Os fotocronogramas e os dados referentes a outros ensaios encontram-se em anexo.

#### EX2DE30-3

Foi utilizado um confinamento de 25mm e foram colocados 9 pares de fibras óticas no tubo e 7 pares de fibras óticas na tampa.

O explosivo foi sensibilizado com 2% de microesferas ocas de expancel D30, e foi medida uma densidade de explosivo sensibilizado  $\rho = 0,6720g.cm^{-3}$ .

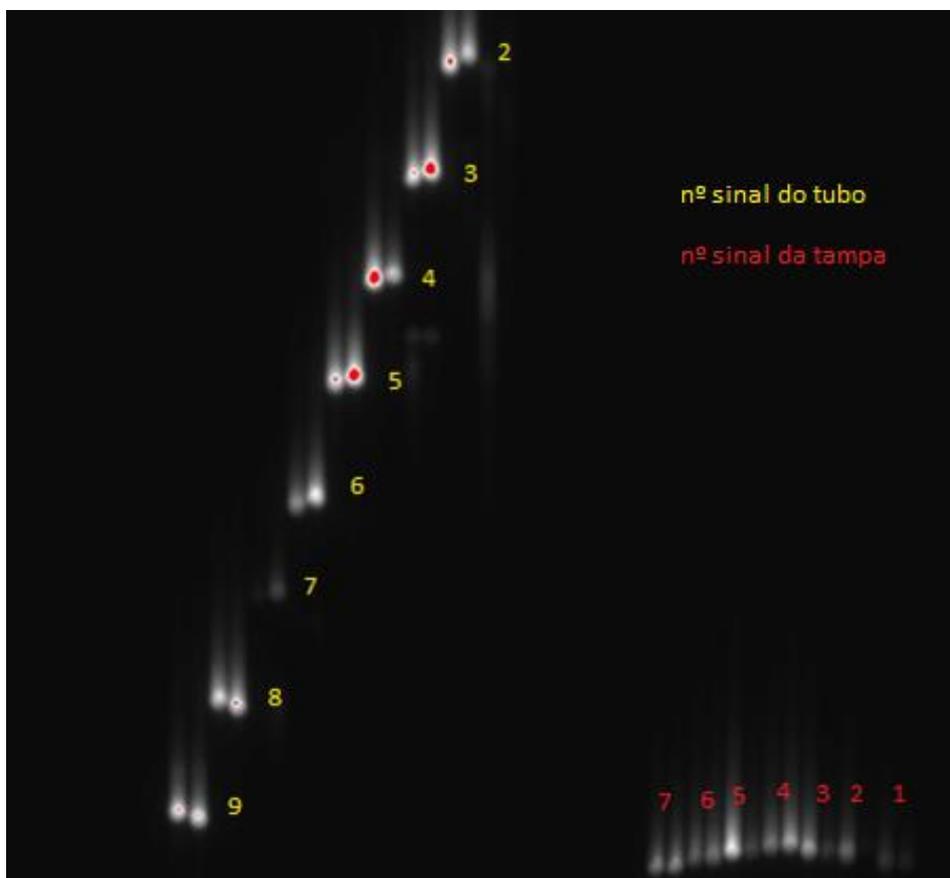
As distâncias centro-centro, entre os furos do confinamento, foram medidas com um paquímetro com uma resolução de 0,02mm. Registrando-se os seguintes valores:

Nº dos furos	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
Distâncias centro-centro [mm]	5,52	5,68	4,18	5,32	4,86	4,82	5,40	4,52

Tabela 3 Distâncias centro-centro entre os furos do confinamento.

---

Após o procedimento experimental, e selecionando um tempo de exposição de  $400\mu s$ , e um tempo de varrimento de  $10\mu s$ , obteve-se o seguinte fotocronograma:



**Figura 25** Fotocronograma do ensaio dinâmico EX2DE30-3 utilizando a CEVD.

Analisando o fotocronograma, verifica-se que:

1 – Todas as fibras óticas colocadas no tubo, à exceção do primeiro par, capturaram momento de detonação. Observam-se riscas que evidenciam luz proveniente do primeiro sinal que comprovam que não foi capturado o momento de detonação.

2 - Todas as fibras colocadas na tampa capturaram radiação.

As zonas a vermelho indicam saturação de luz na câmara eletrónica de varrimento e caso sejam predominantes é necessário reduzir o tempo de exposição no próximo ensaio, para não danificar a CEVD.

3 – No sinal 8 e 9, as fibras óticas aparecem numa ordem diferente do que nos restantes sinais. Isto deve-se à arbitrariedade do sentido em que é colocado cada par de fibras.

Com o *software*, é possível estabelecer uma linha de interesse para cada risca:

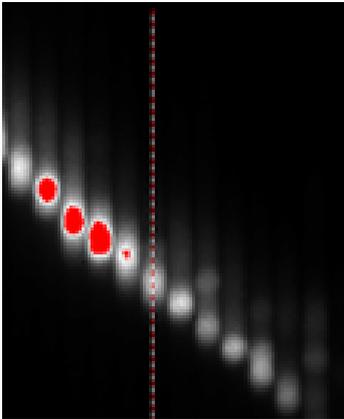


Figura 26 Definição de uma linha de interesse ao longo de uma risca.

E construir um gráfico de intensidade luminosa em função do tempo:

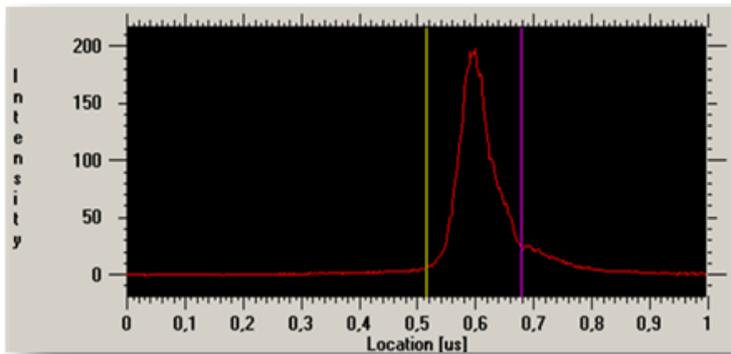


Figura 27 Gráfico intensidade luminosa versus posição, ao longo da linha de interesse.

Analisando o gráfico (figura 26), e o diálogo de análise de perfil (figura 27) é possível estabelecer um critério para o momento de entrada e saída de radiação na CEVD, utilizando os cursores, ou determinar o máximo de intensidade luminosa em cada risca.

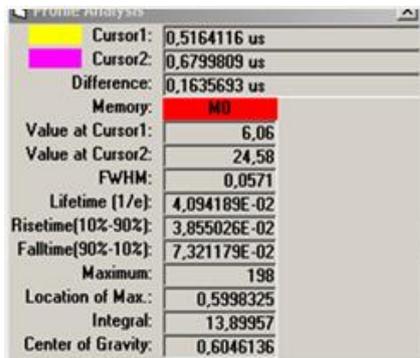


Figura 28 Análise de perfil da linha de interesse.

---

## Determinação da velocidade de detonação:

Pretende-se construir um gráfico  $(x, t)$  em que  $x$  corresponde à distância percorrida pela luz e  $t$  corresponde ao tempo em que a intensidade de luz é máxima para cada fibra ótica.

A posição de cada fibra ótica esquematizou-se conforme representado na figura 28.

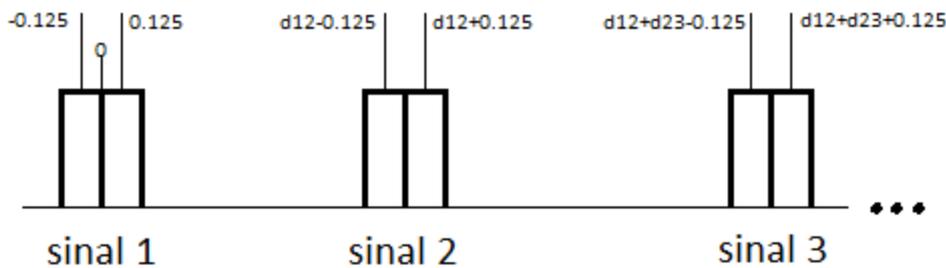


Figura 29 Posição das fibras óticas em relação ao comprimento.

Onde  $d12$  e  $d13$  correspondem respetivamente às distâncias centro-centro entre os sinais 1-2 e 2-3.

Cada risca corresponde ao momento de iluminação de uma fibra, e cada par de riscas adjacentes corresponde a um par de fibras inseridas num dos furos do tubo.

Com o auxílio do *software*, seleciona-se o *pixel* em que a intensidade luminosa é máxima para cada risca.

Considerando que o primeiro *pixel* se encontra na linha de topo, e que o número de pixels na direção vertical para um *binning* de  $1 \times 1$  é 1023 e que o tempo de varrimento dos eletrões é  $10\mu s$ , através da expressão:

$$t_{m\acute{a}x} = px_{m\acute{a}x} * \frac{t_{varr}}{px_{total}} \text{Equa\c{c}\~{a}o 1}$$

$t_{varr}$  – Tempo de varrimento [ $\mu s$ ]

$px_{total}$  – Resolução vertical [*pixel*]

$px_{m\acute{a}x}$  – *Pixel* onde a intensidade é máxima numa risca [*pixel*]

$t_{m\acute{a}x}$  – Tempo onde a intensidade é máxima numa risca [ $\mu s$ ]

É possível determinar, o tempo após início do varrimento de elétrons em que a intensidade de radiação em cada fibra ótica é máxima.

Construindo uma tabela com os valores obtidos:

nº sinal	nº da fibra ótica	nº pixel intensidade máxima	Tempo intensidade máxima [ $\mu s$ ]	Posição da fibra ótica
1	22	riscas	---	
	23	riscas	---	
2	24	51	0,498	-0,125
	25	62	0,606	0,125
3	26	187	1,827	5,555
	27	192	1,876	5,805
4	28	309	3,020	9,735
	29	314	3,069	9,985
5	30	428	4,183	15,055
	31	433	4,232	15,305
6	32	568	5,552	19,915
	33	576	5,630	20,165
7	34	678	6,627	24,735
	35	683	6,676	24,985
8	36	811	7,927	30,135
	37	803	7,849	30,385
9	38	941	9,198	34,655
	39	935	9,139	34,905

Tabela 4 Valores obtidos no ensaio EX2DE30-3 para cálculo da velocidade de detonação.

Construindo um gráfico  $(x, t)$  com os valores tabelados e adicionando uma linha de tendência:

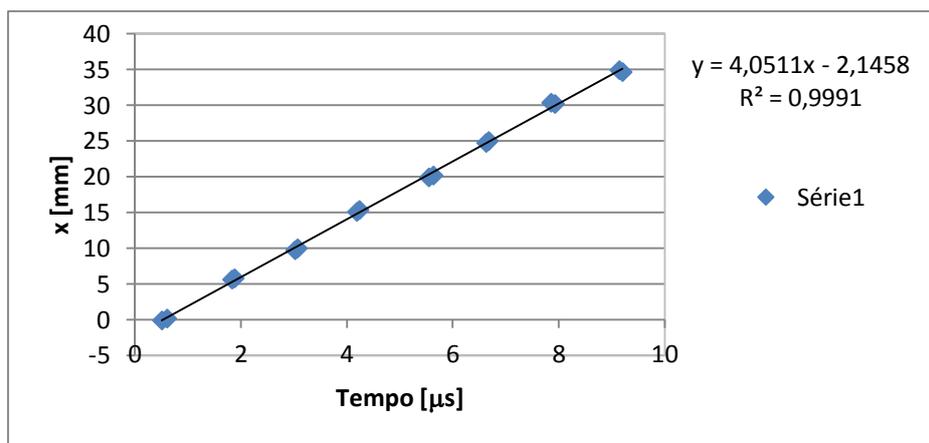


Figura 30 Tempo ocorrido entre intensidade máxima de radiação em cada fibra ótica.

Derivando a expressão da linha de tendência obtém-se a velocidade de detonação do explosivo:

$$\frac{d}{dt}(4,0511x - 2.1458) \rightarrow D = 4,0511 \times 10^3 \text{ m.s}^{-1}$$

### Determinação da frente de onda de detonação

Como em todas as bases foram feitos 7 furos, estando o quarto furo localizado no centro da base, esquematizou-se a posição de cada fibra ótica do seguinte modo:

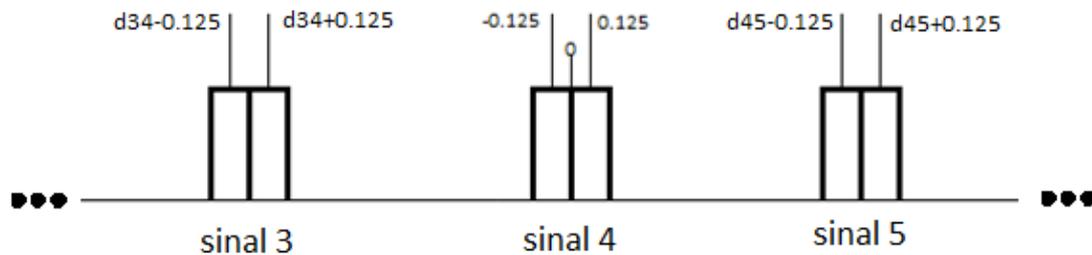


Figura 31 Posição das fibras óticas em relação à tampa.

Conhecidas as distâncias centro-centro entre os furos, construiu-se um gráfico  $(x, t)$

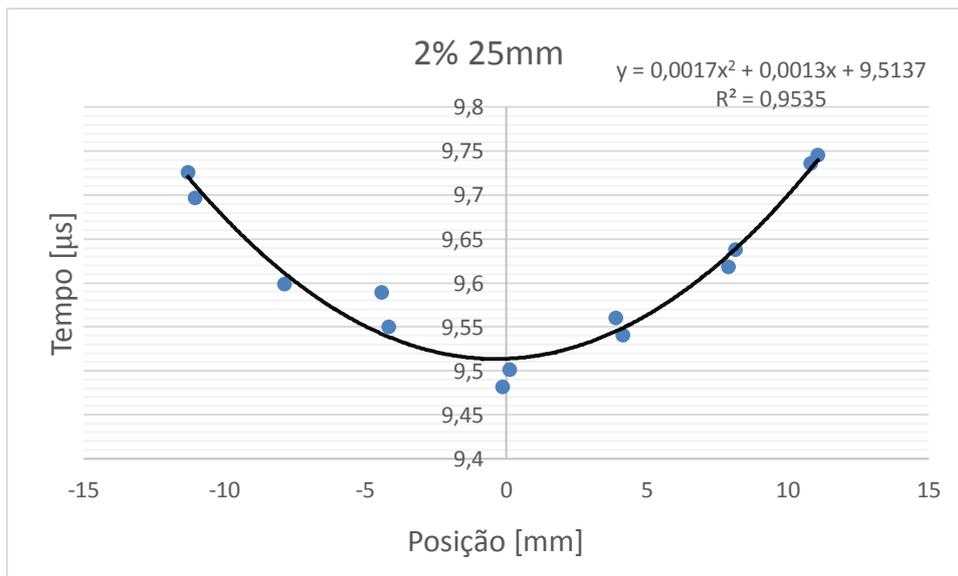


Figura 32 Frente de onda obtida no ensaio.

Fazendo uma interpolação polinomial de segundo grau, com os pontos do gráfico 25, obtém-se a seguinte expressão:

$$y = 0,0017x^2 - 0,0013x + 9,5137$$

$$R^2 = 0,9535$$

Acertando a interpolação polinomial para o seu mínimo coincidir com o ponto (0,0) obtém-se o gráfico da frente de onda:

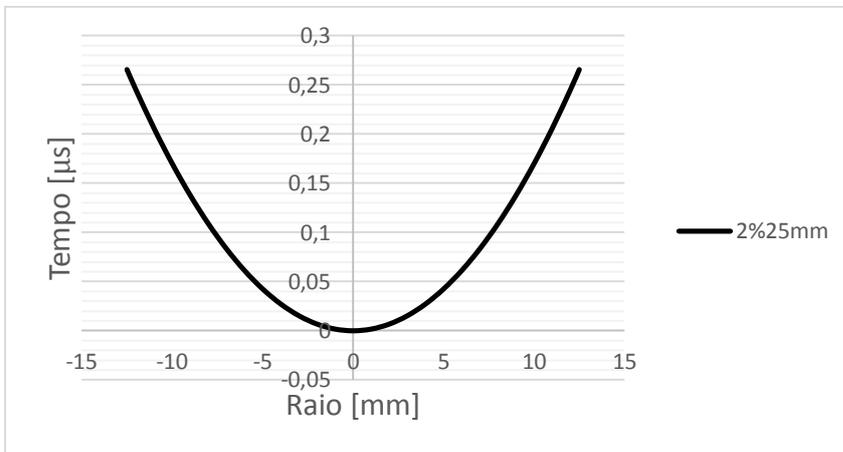


Figura 33 Frente de onda para uma carga de 25mm sensibilizada com 2% de esferas D30.

#### 4.1.2. Tratamento de Dados dos Ensaio Obtidos com Osciloscópio

O método de determinação de velocidade de detonação encontra-se exemplificado com o ensaio EX05DE30-11osc, os resultados de outros ensaios encontram-se em anexo.

Neste ensaio a emulsão foi sensibilizada com 0,5% de microesferas de expancel oco D30 confinadas por um tubo de PVC com diâmetro de 31mm.

Após o ensaio, o osciloscópio devolve as diferenças de tempo entre os sinais elétricos.

Conhecendo as distâncias centro-centro entre os furos é possível construir uma tabela:

Nº dos furos	Distância centro-centro entre os furos [mm]	Diferença de tempo entre os sinais [ $\mu s$ ]
1-2	9,9	1,79
1-3	19,7	3,66
1-4	29,65	5,57
1-5	39,9	7,32

Tabela 5 tabela do ensaio EX05DE30-11osc.

Construindo um gráfico  $x, t$  com os dados tabelados:

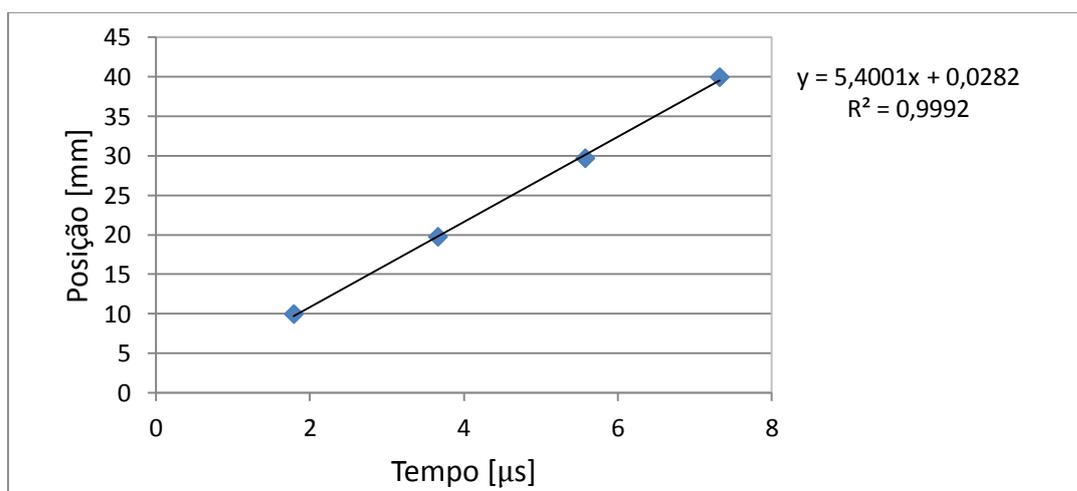


Figura 34 Relação Posição/Tempo Obtida com Sondas Elétricas e Osciloscópio EX05DE30-11osc.

Derivando a expressão para a aproximação linear, obtém-se a velocidade de detonação:

$$y = 5,4001x + 0,0282 \rightarrow D = 5,400 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} .$$

## 4.2. Resultados Obtidos

Concretizados os ensaios registaram-se os seguintes valores para a densidade da emulsão explosiva e velocidade de detonação:

Concentração de Microesferas D30 [%]	$d = 15,5mm$		$d = 25mm$		$d = 31,1mm$	
	$D [mm/\mu s]$	$\rho [g.cm^{-3}]$	$D [mm/\mu s]$	$\rho [g.cm^{-3}]$	$D [mm/\mu s]$	$\rho [g.cm^{-3}]$
2	4,021	0,734	4,051	0,672		
1	4,552	0,908	4,754	0,911		
0,99					4,908	0,928
0,75	4,944	0,896	4,944	0,986		
0,5	4,827	1,087	5,294	1,092	0,000	1,108
0,32			4,476	1,166		
0,3			5,558	1,061		
0,2			Não detonou	1,231		

Tabela 6 Velocidade de detonação e densidades obtidas para várias concentrações de esferas D30 e diâmetros de carga.

### Determinação da densidade teórica:

Para conhecer a exatidão das densidades medidas e validar os resultados, calcularam-se as densidades esperadas teoricamente.

Conhecidas as densidades das microesferas ocas de expancel D30 e da emulsão sem sensibilizador:

$$\rho_{esferas} = 0,025 g.cm^{-3}$$

$$\rho_{emulsão} = 1,380 g.cm^{-3}$$

---

Sabendo que o volume específico de uma mistura é dado pela soma dos volumes específicos dos seus constituintes:

$$v_{mistura} = v_{esferas} + v_{emulsão}$$

E que a relação entre o volume específico e a densidade é:

$$v = \frac{1}{\rho}$$

O volume específico da mistura é dado por:

$$v_{mistura} = \frac{1}{\rho_{esferas}} + \frac{1}{\rho_{matriz}}$$

Traçando uma reta com os valores da densidade teórica em função da concentração de esferas D30 e colocando os pontos da densidade medida em função da percentagem de microesferas de expancel oco D30 adicionadas à emulsão é possível traçar um gráfico e conhecer o erro de medida da densidade.

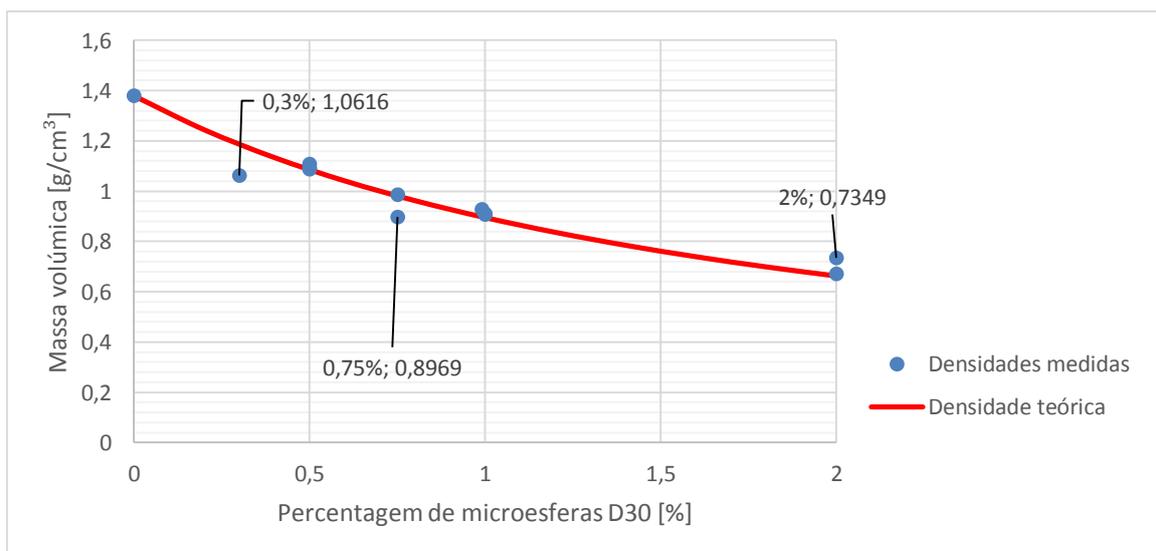


Figura 35 Comparação das densidades medidas com a densidade teórica.

Analisando o gráfico verifica-se que as densidades medidas das amostras encontram-se próximas das densidades teóricas, excetuando os valores assinalados na tabela 6:

Concentração de esferas D30 [%]	Densidade da emulsão explosiva [g/cm <sup>3</sup> ]	Diâmetro do confinamento da carga [mm]
0,3	1,061	25
0,75	0,896	15,5
2	0,734	15,5

Tabela 7 Densidades da emulsão explosiva medidas para os quais existe discrepância com os valores teóricos.

### Relação da velocidade de detonação com a densidade da emulsão explosiva:

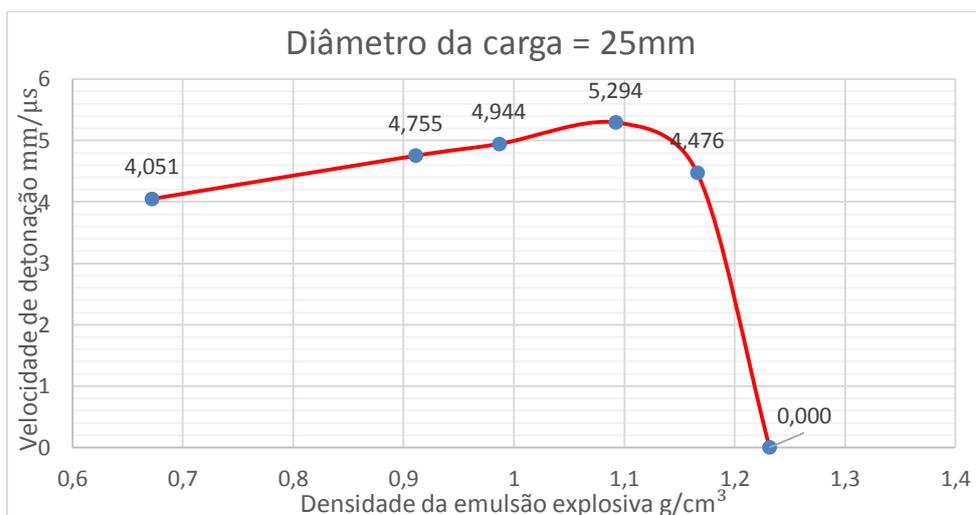
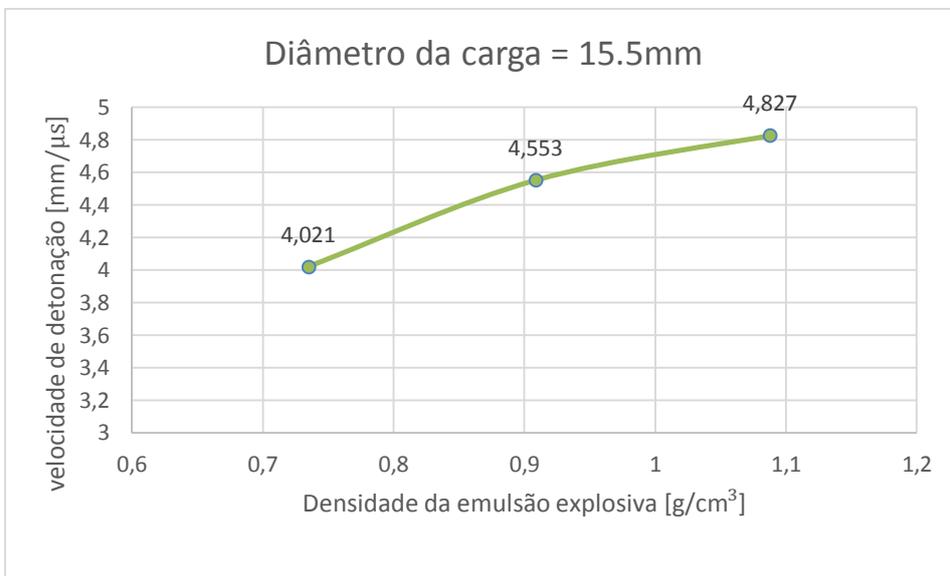


Figura 36 Relação da densidade do EE com a velocidade de detonação para um diâmetro de 25mm.

Com a análise da figura 36, verifica-se que a velocidade de detonação aumentou desde  $D = 4,051\text{mm}/\mu\text{s}$  com  $\rho = 0,672\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  até um máximo de  $D = 5,294\text{mm}/\mu\text{s}$  com  $\rho = 1,092\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  a partir do qual a velocidade de detonação desceu abruptamente, não detonando para  $\rho = 1,231\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

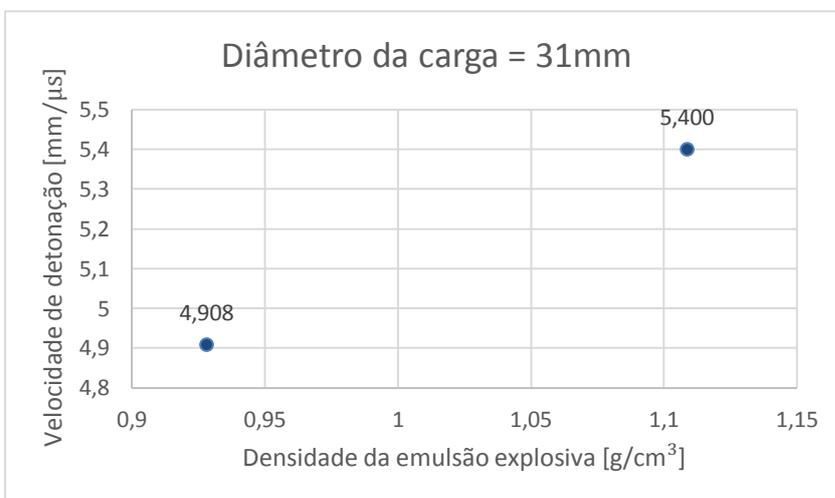
O ensaio no qual foi medida uma densidade de explosivo sensibilizado de 1,0616 com 0,3% de sensibilizador não foi considerado por se afastar significativamente do valor teórico.



**Figura 37** Relação da densidade do EE com a velocidade de detonação para um diâmetro de 15,5mm.

Para uma carga de 15,5mm registou-se uma velocidade de detonação  $D = 4,021 \text{ mm}/\mu s$  para  $\rho = 0,734 \text{ g. cm}^{-3}$  aumentando até  $D = 4,827 \text{ mm}/\mu s$  para  $\rho = 0,911 \text{ g. cm}^{-3}$ .

O ensaio em que se mediu uma densidade de explosivo sensibilizado de  $0,8969 \text{ g. cm}^{-3}$  para 0,75% de esferas D30 não foi considerado devido à densidade medida se afastar significativamente do valor teórico.



**Figura 38** Relação da densidade do EE com a velocidade de detonação para um diâmetro de 31mm.

Para um diâmetro de carga de 31mm, registou-se uma velocidade de detonação mínima  $D = 4,908 \text{ mm}/\mu\text{s}$  para  $\rho = 0,928 \text{ g.cm}^{-3}$  e uma velocidade de detonação máxima de  $5,400 \text{ mm}/\mu\text{s}$  para  $\rho = 1,109 \text{ g.cm}^{-3}$ .

Comparando os resultados obtidos para a velocidade de detonação versus densidade da emulsão explosiva, conclui-se que a velocidade de detonação aumenta com o aumento da densidade da emulsão explosiva, até um pico, decrescendo abruptamente e que a velocidade de detonação aumenta para a mesma densidade, com o aumento do diâmetro da carga.

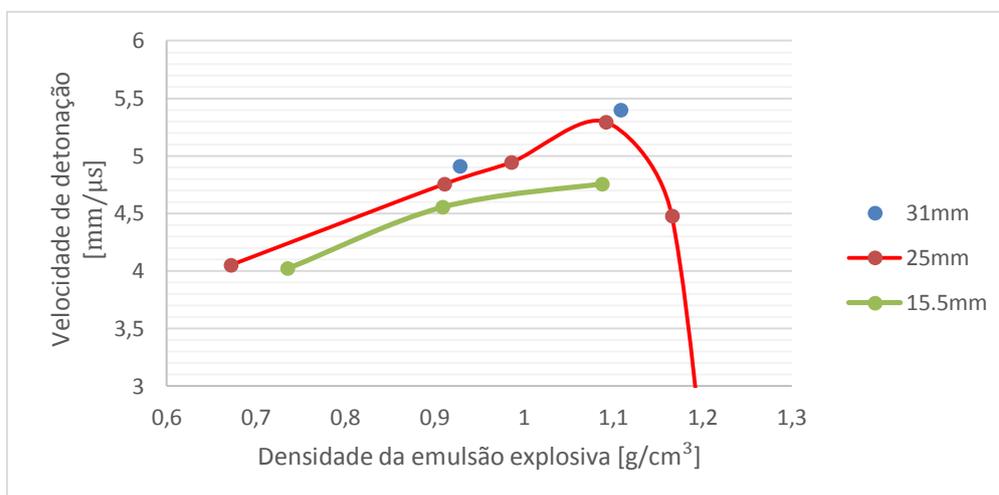
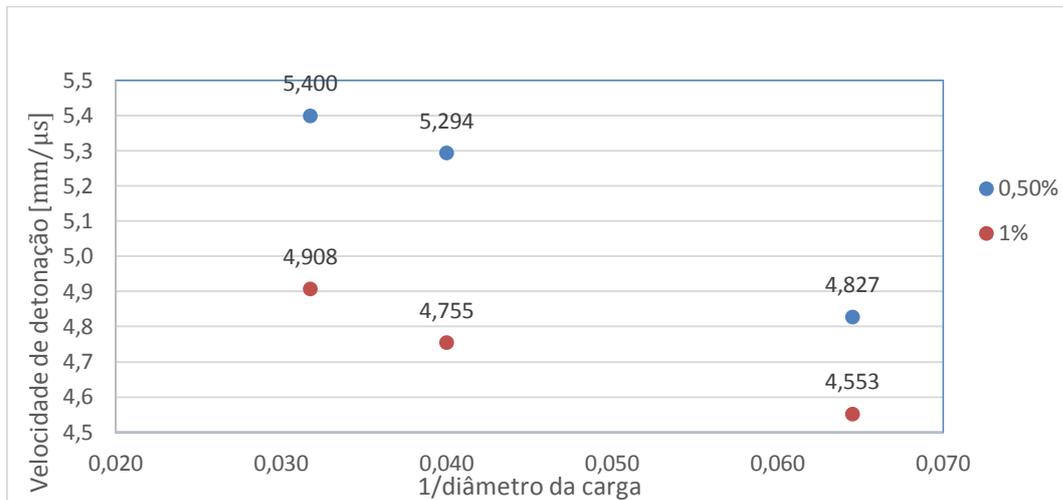


Figura 39 Comparação dos resultados obtidos para densidade versus velocidade de detonação para cargas de 15,5mm; 25mm; 31mm.

## Relação da velocidade de detonação com o inverso do diâmetro de carga



**Figura 40** Relação da velocidade de detonação com o inverso do diâmetro de carga.

Com análise do gráfico da figura 40, verifica-se que com a diminuição do diâmetro da carga, aumenta a velocidade de detonação e que com o aumento da porosidade (diminuição da densidade), aumenta a velocidade de detonação.

É também perceptível que com os valores de detonação tendem para um máximo, para conhecer esse máximo deveriam ser realizados mais ensaios para determinar o diâmetro crítico, abaixo do qual não se dá detonação, assim como o diâmetro infinito, a partir do qual o comportamento da detonação é considerado ideal, sendo negligenciável a dependência da velocidade de detonação com o diâmetro e a velocidade de detonação é máxima para um dado valor de densidade.

### Relação da densidade com a forma da frente de onda de detonação

Verifica-se que a frente de onda tem um formato parabólico, e que a sua curvatura aumenta com a densidade.

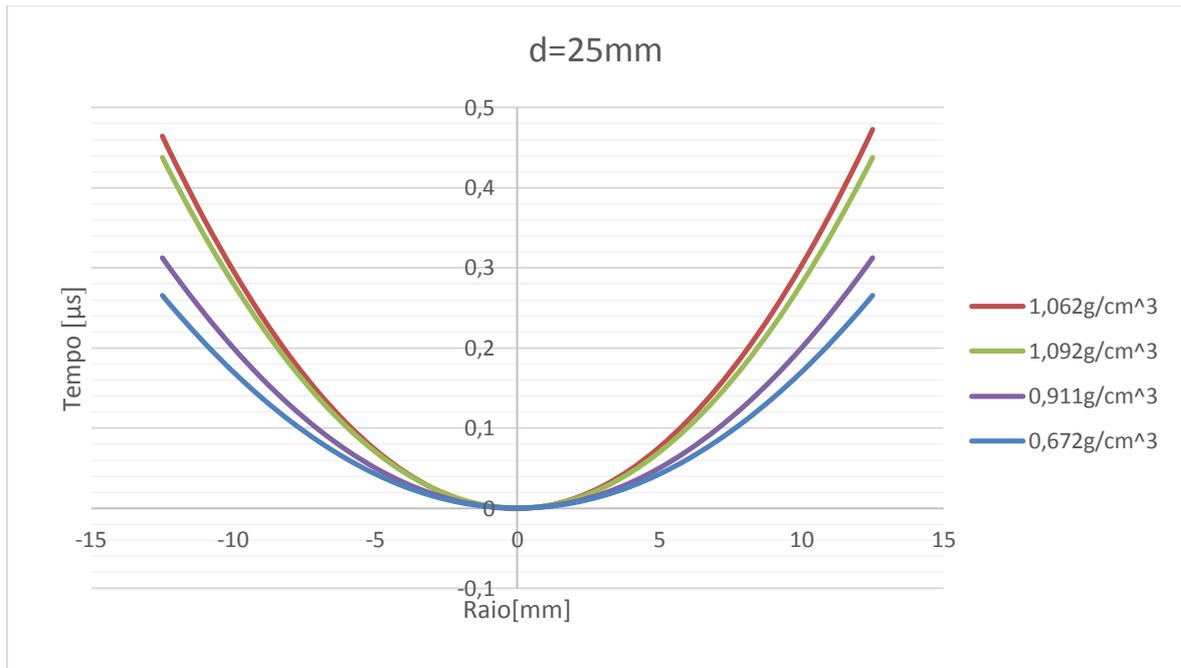


Figura 41 Frente de detonação de cargas de 25mm de diâmetro para várias densidades de carga.

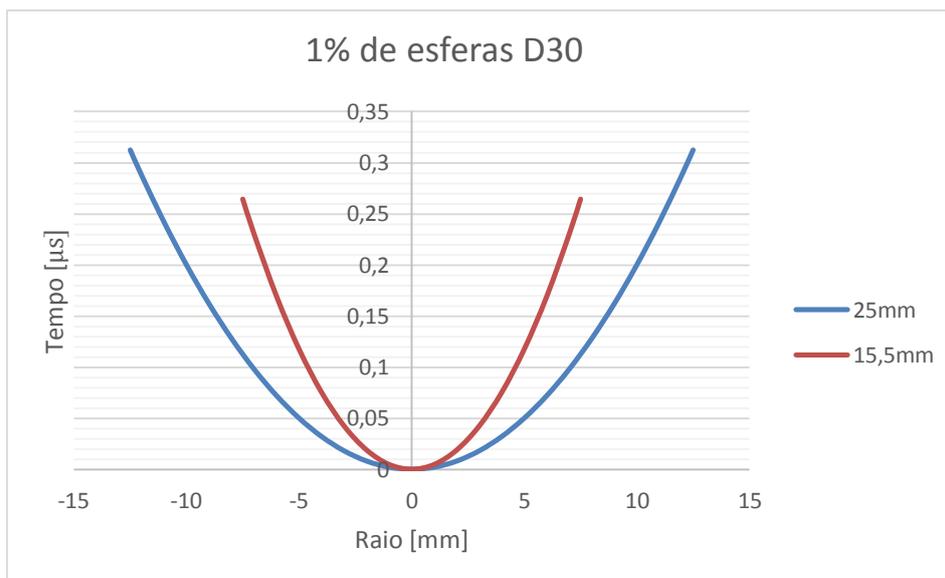
---

## Relação do diâmetro de carga com a forma da frente de onda de detonação

Para observar esta relação, selecionou-se os dados de dois ensaios de cargas com densidades próximas,

Concentração de esferas [%]	Diâmetro [mm]	Densidade [ $g \cdot cm^{-3}$ ]
1	25	0,911
1	15,5	0,909

**Tabela 8** Ensaios com diferentes diâmetros de carga para densidades semelhantes.



**Figura 42** Frente de onda de cargas com diâmetros de 15,5mm e 25mm sensibilizadas com 1% de esferas.

Por observação do gráfico da figura 35, verifica-se que a curvatura da frente de onda diminui com o aumento do diâmetro de carga.

## 5. CONCLUSÕES

Com o trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação, tornou-se claro que a utilização de técnicas cinematográficas ultrarrápidas utilizando a CEVD e fibras óticas, tem potencial para obtenção de resultados mais rápidos e precisos de velocidades e frente de detonação, tendo vantagens em relação ao método recorrendo ao osciloscópio e sondas elétricas, principalmente por se usarem sinais óticos ao invés de sinais elétricos, o que torna o sistema menos sensível a interferências elétricas, para além de não ser necessária a construção de sondas elétricas, que ficam destruídas com cada ensaio. É também possível, com esta técnica, obter simultaneamente a velocidade e curvatura da frente de detonação. No entanto será necessário otimizar a técnica para o método ser implementado com maior sucesso em ensaios posteriores. Deverá ser desenvolvido um sistema mais eficiente para colocação das fibras óticas no confinamento, para se conseguirem ensaios mais rigorosos e acelerar a sua preparação, uma vez que a minuciosidade necessária para construir os ensaios manualmente foi demorada e permissiva de erros

Para um tempo de varrimento de  $10 \mu s$  determinou-se um atraso de funcionamento da CEVD de  $11 \mu s$ .

Verificou-se que as EX sensibilizadas com esferas D30 apresentam um comportamento não monótono com a densidade, conforme é observado quando são sensibilizadas com esferas de expancel. A densidade de extinção é igual a  $1,21 g.cm^{-3}$  em cargas com 25mm diâmetro. Para EX com 0,5% e 1% de esferas D30 conclui-se que o diâmetro crítico é inferior a 15mm. Os resultados obtidos permitem afirmar que a curvatura da frente de detonação diminui com o aumento do diâmetro de carga para cargas sensibilizadas com 1% de esferas D30 e que a curvatura da frente de detonação aumenta com a densidade da carga.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A.G. Anshits, N. N. Anshits, A.A. Deribas, S. M. Karakhanov, N.S. Kasatkina, A.V. Plastinin, A. Yu. Reshetniak, V.V. Sil'vestrov Detonation Velocity of Emulsion Explosives Containing Cenospheres 2005
- [2] Hamamatsu <http://209.73.52.252/assets/pdf/hpspdf/Guidetostreak.pdf> Guide to streak cameras
- [3] Hamamatsu [http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/sys/e\\_streakh.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/sys/e_streakh.pdf) Guide to streak cameras
- [4] I.F. Kobylkin Critical Detonation Diameter of Industrial Explosive Charges: Effect of the Casing 2011
- [5] J. Akhavan The Chemistry of Explosives 2004
- [6] Jimmie C. Oxley The Chemistry of Explosives 1997
- [7] R. Mendes, J. Ribeiro, I. Plaksin, J. Campos, R. Farinha Non monotonic detonation velocity and pressure behaviour of emulsion explosive 2010
- [8] Ya. V. Alymova, V. É. Annikova, N. Yu. Vlasova, and B. N. Kondrikov Detonation Characteristics of Emulsion Explosives 1994
- [9] Yoshikazu Hirosaki, Kenji Murata, Yukio Kato and Shigeru Itoh Effect of Void Size on the Detonation Pressure of Emulsion Explosives 2001
- [10] Hamamatsu Photonics Deutschland GmbH HPD-TA users manual
- [11] R.S Egly and A.E. Neckar, "Water-resistant sensitizers for blasting agents" U.S. Patent No. 3,161,511 (1964)
- [12] J. Lee, F. W. Sandstrom, B. G. Craig, P. A. Persson, "Detonation and shock initiation properties of emulsion explosives," in: Proc. Of the 9<sup>th</sup> Int. Symp. On Detonation 1989 pp. 263-271
- [14] J. Lee, L. W. Sandstrom; B. G. Craig and P. A. Persson, Detonation and shock initiation properties of emulsion explosives, in proc. 9<sup>th</sup> Int. Symp. on Detonation, USA, pp.573-584, 1989
- [15] M. Yoshida, M. Iida, K. Tanaka, S. Fujiwara, M. Kusakabe and K. Shino, Detonation behavior of emulsion explosives containing glass microballoons; in proc. 8<sup>th</sup> Int. Symp. On Detonation, Albuquerque, USA, pp. 993-1000, 1985.
- [16] Plaksin, I., "Characterization of the Detonation wave parameters and its stability in the process of X-cladding," the LEDAP report, March 2002.
- [17] Plaksin, I., J. Campos, J. Ribeiro, R. Mendes, J. Direito, D. Braga, and R. Pruemmer. 2003. Novelties in physics of explosive welding and powder compaction. *J. Phys. IV France* 110 797-802.

- 
- [18] A.R. Farinha, R. Mendes, J. Baranda, R. Calinas, M.T. Vieira, J. Alloys  
Compd.483 (2009) 235-238.
- [19] R.P. Prümmer, 4<sup>th</sup> International Conference on Center for High Energy Forming;  
1973; Colorado, USA (1973) 9.2.1-9.2.27.

## ANEXO A

### **Resultados obtidos com a CEVD e fibras óticas:**

Todos os ensaios foram realizados usando uma exposição luminosa de  $400\mu s$  e um tempo de varrimento de elétrons de  $10\mu s$ .

Foi usado o seguinte código para organização dos ensaios:

Exemplo: **EX05DE30-1**

EX05DE30 : emulsão explosiva (EX) com 0,5% de microesferas de expancel oco D30

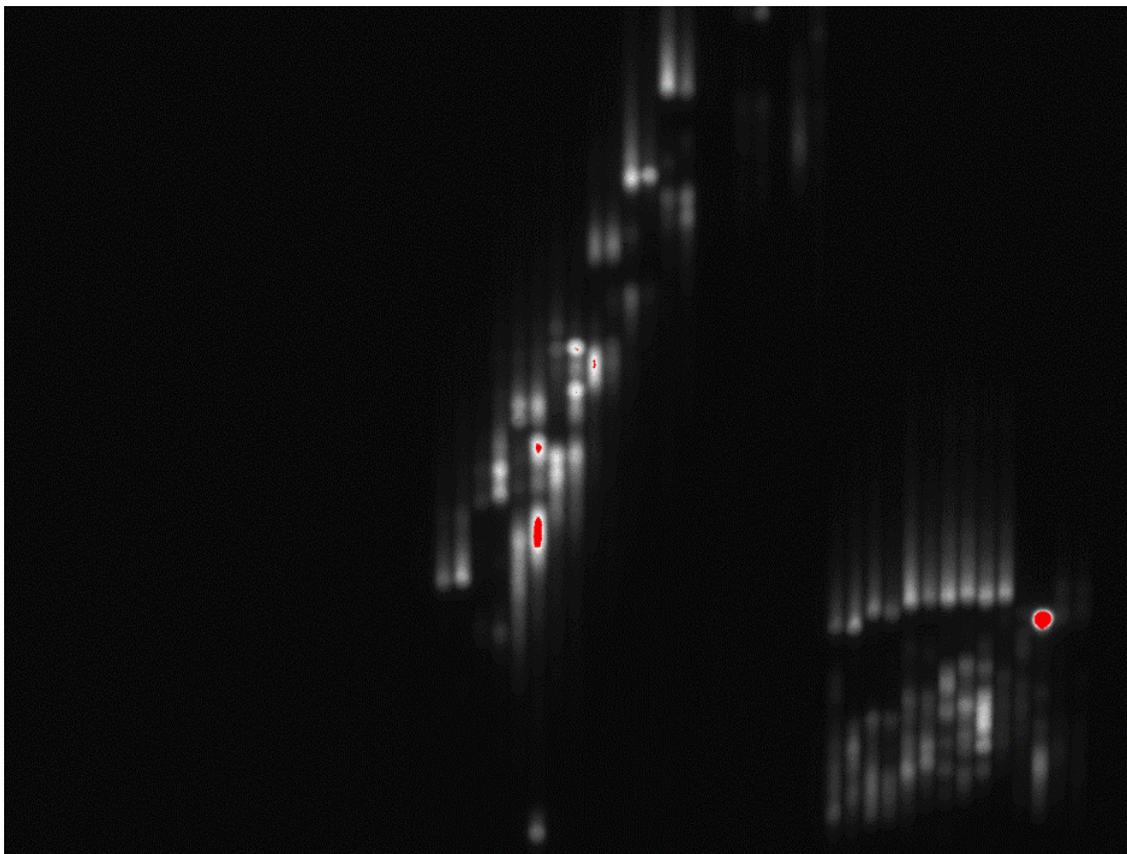
1 : número do ensaio

---

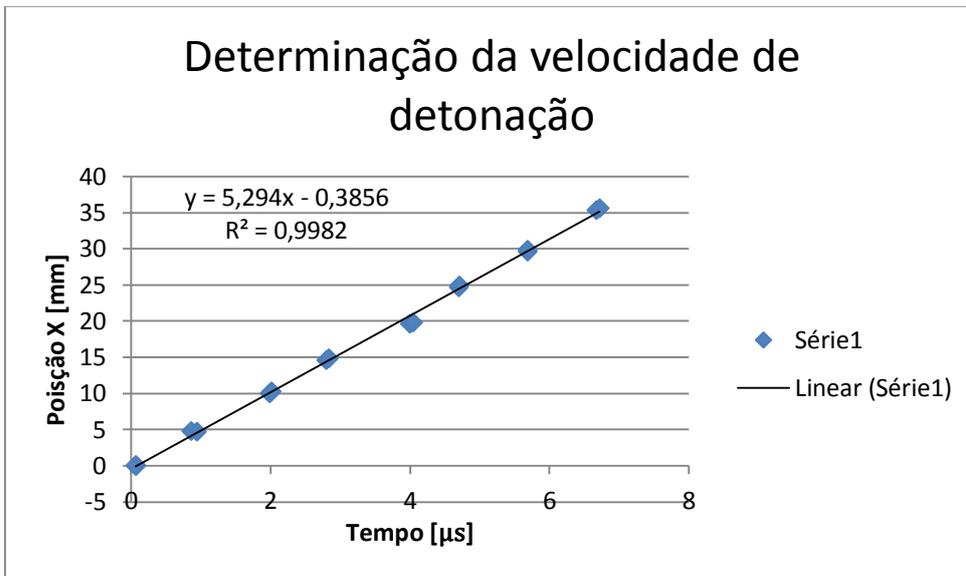
EX05DE30-1	[%]
Microesferas de expancel	0,5
emulsão	99,5

Diâmetro do Tubo [mm]	25
-----------------------	----

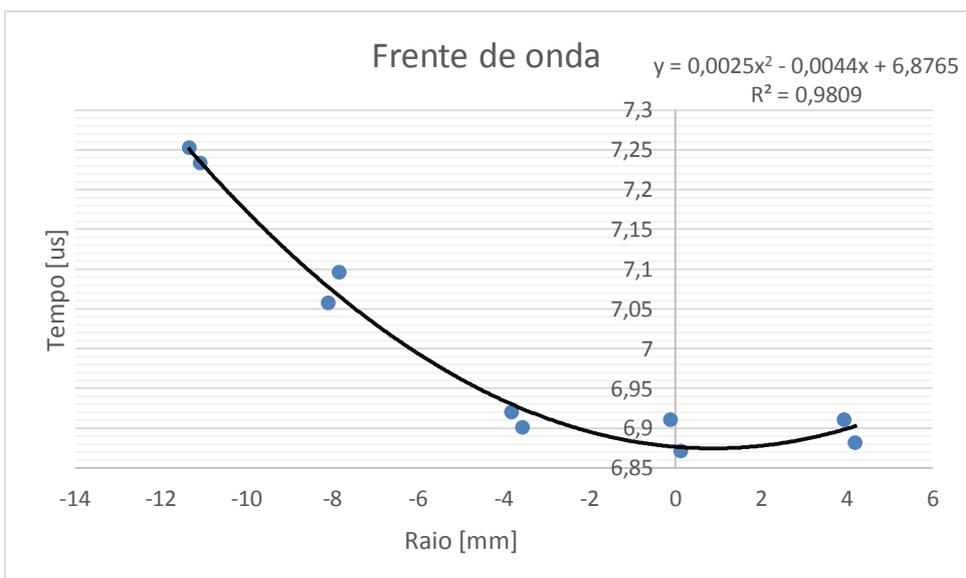
Densidade do Explosivo [ $g \cdot cm^{-3}$ ]	1,0921
---	--------



Observações: Neste ensaio não foi utilizada *epoxy* para preencher o espaço entre o confinamento e cada par de fibras, o que permitiu a formação de bolhas de ar, tornando a determinação do máximo de intensidade luminosa mais difícil.



$$D = 5,294\text{mm}/\mu\text{s}$$

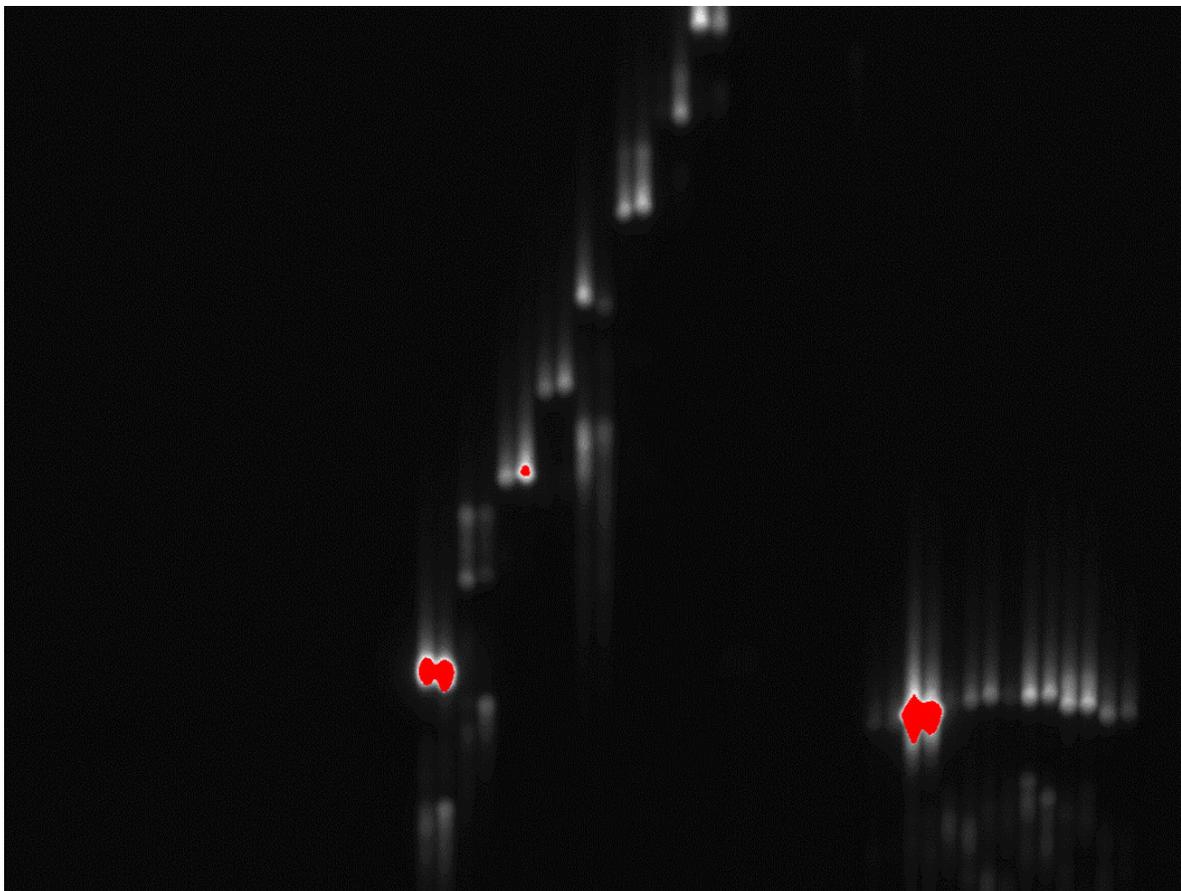


---

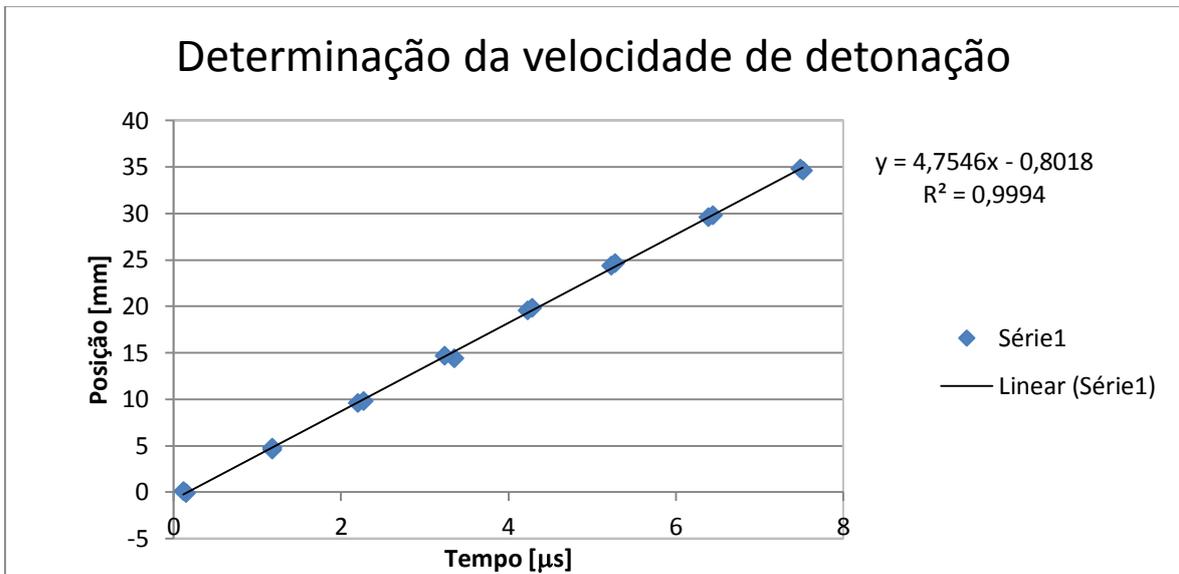
EX1DE-2	[%]
microesferas de expancel	1
emulsão NA	99

diâmetro tubo [mm]	25
--------------------	----

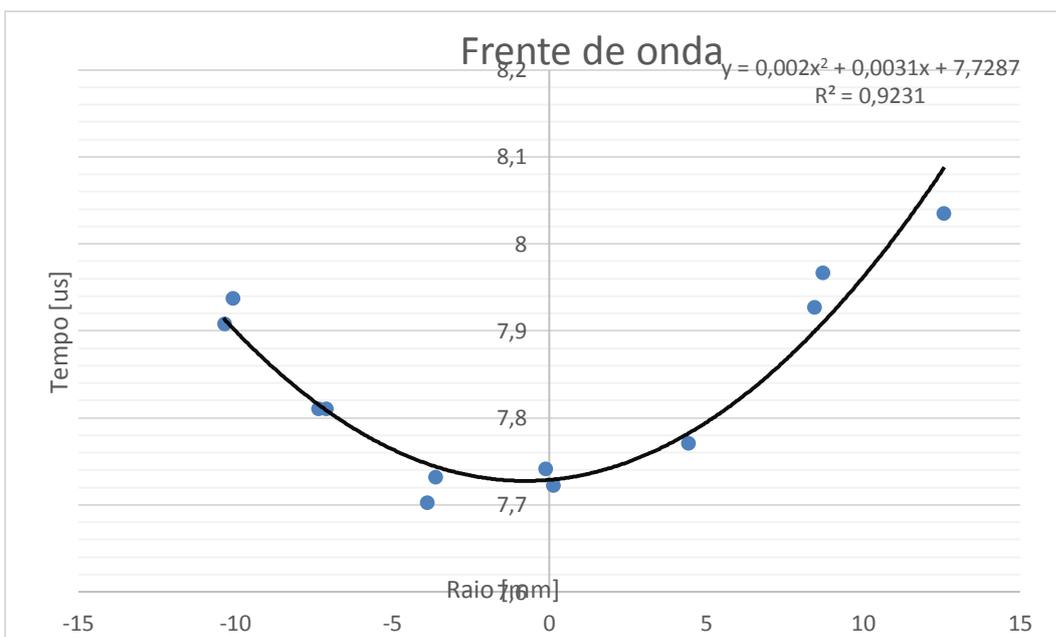
Densidade do Explosivo [ $g \cdot cm^{-3}$ ]	0,9110
---	--------



Observações: Neste ensaio, um par de fibras óticas da tampa e um par de fibras óticas do tubo não se encontravam à face com a superfície interior da tampa e tubo respetivamente, permitindo a formação de bolhas de ar.



$$D = 4,755 \text{ mm}/\mu s$$

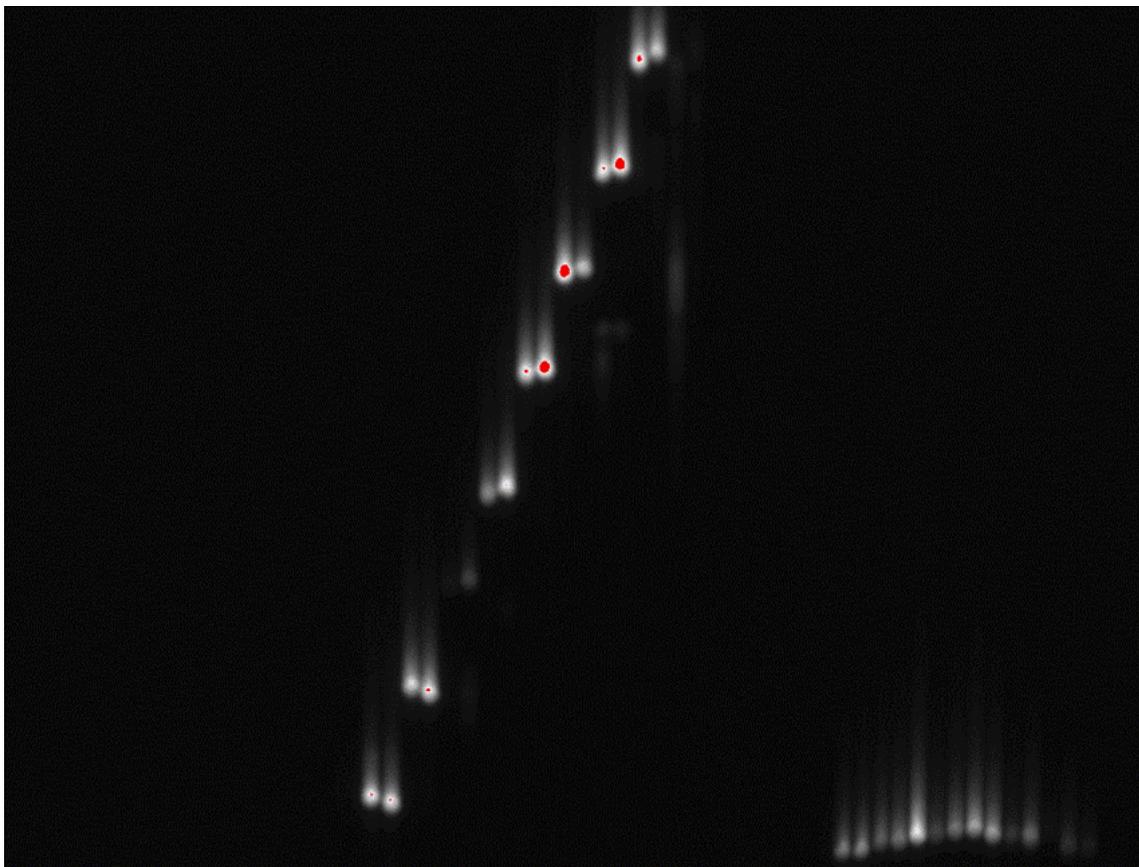


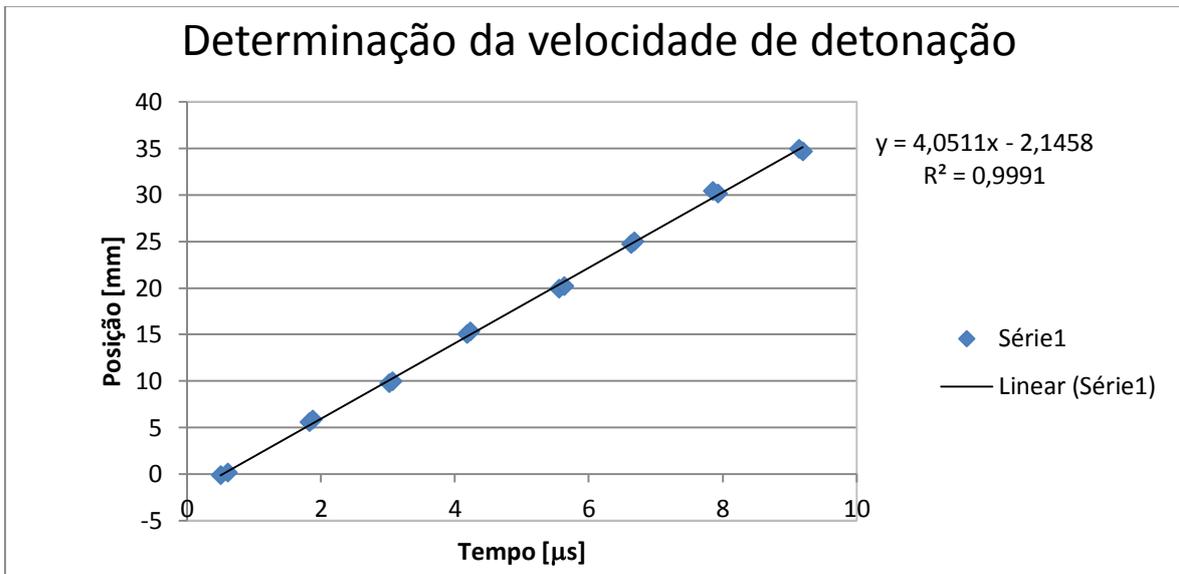
---

<b>EX2DE-3</b>	<b>[%]</b>
microesferas de expancel	2
emulsão NA	98

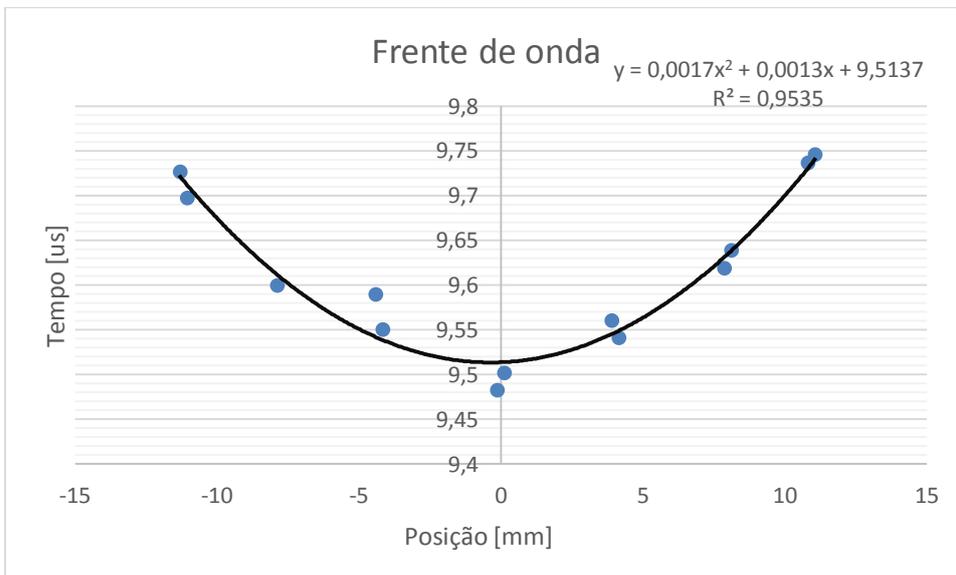
diâmetro tubo [mm]	25
--------------------	----

Densidade do Explosivo [ <i>g.cm<sup>-3</sup></i> ]	0,6720
--	--------





$$D = 4,051\text{mm}/\mu\text{s}$$

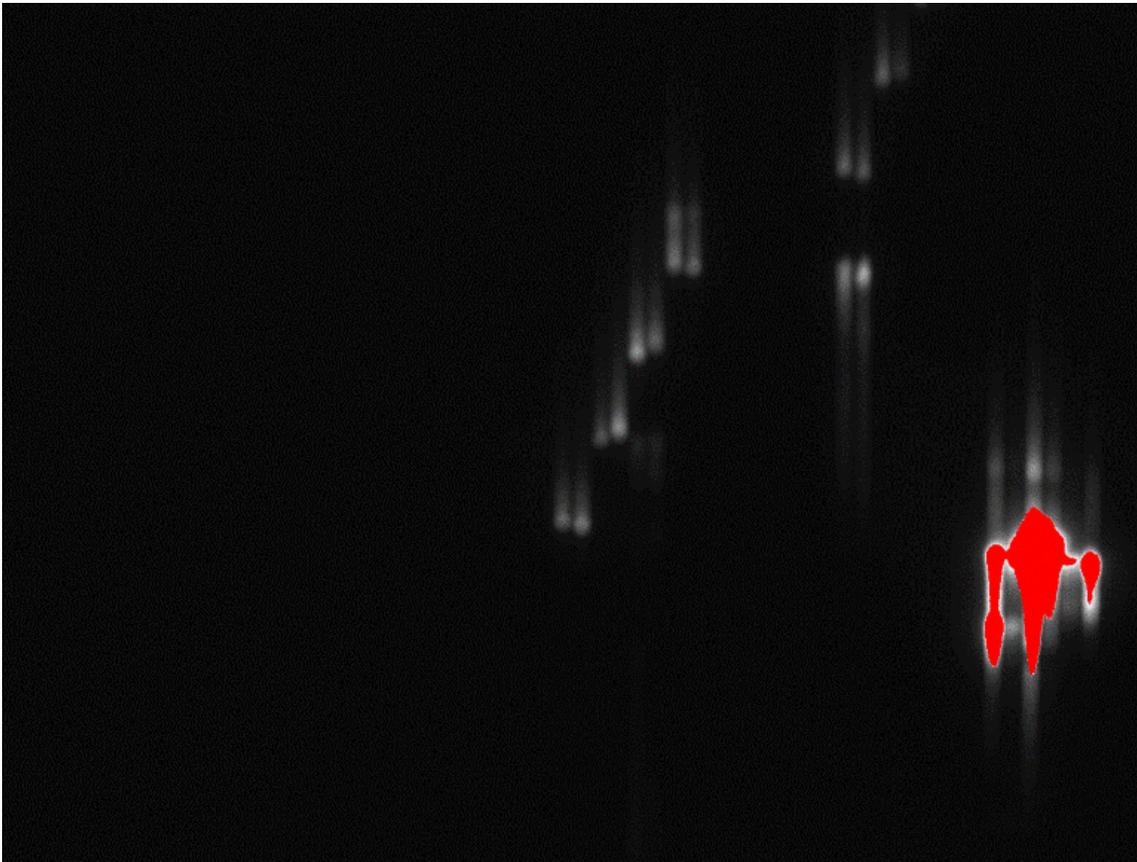


---

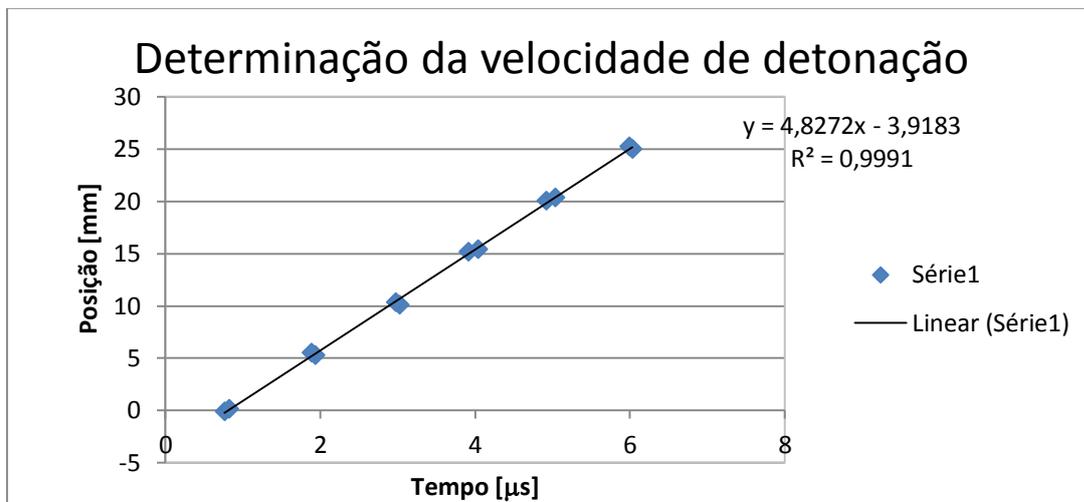
EX05de-4	[%]
microesferas de expancel	0,5
emulsão NA	99,5

diâmetro tubo [mm]	15,5
--------------------	------

Densidade do Explosivo [g.cm <sup>-3</sup> ]	1,0879
---	--------



Observações: Neste ensaio perdeu-se a frente de onda, devido ao excesso de luminosidade, isto deve-se a um mau polimento da superfície da tampa, o que permitiu a formação de bolhas de ar.



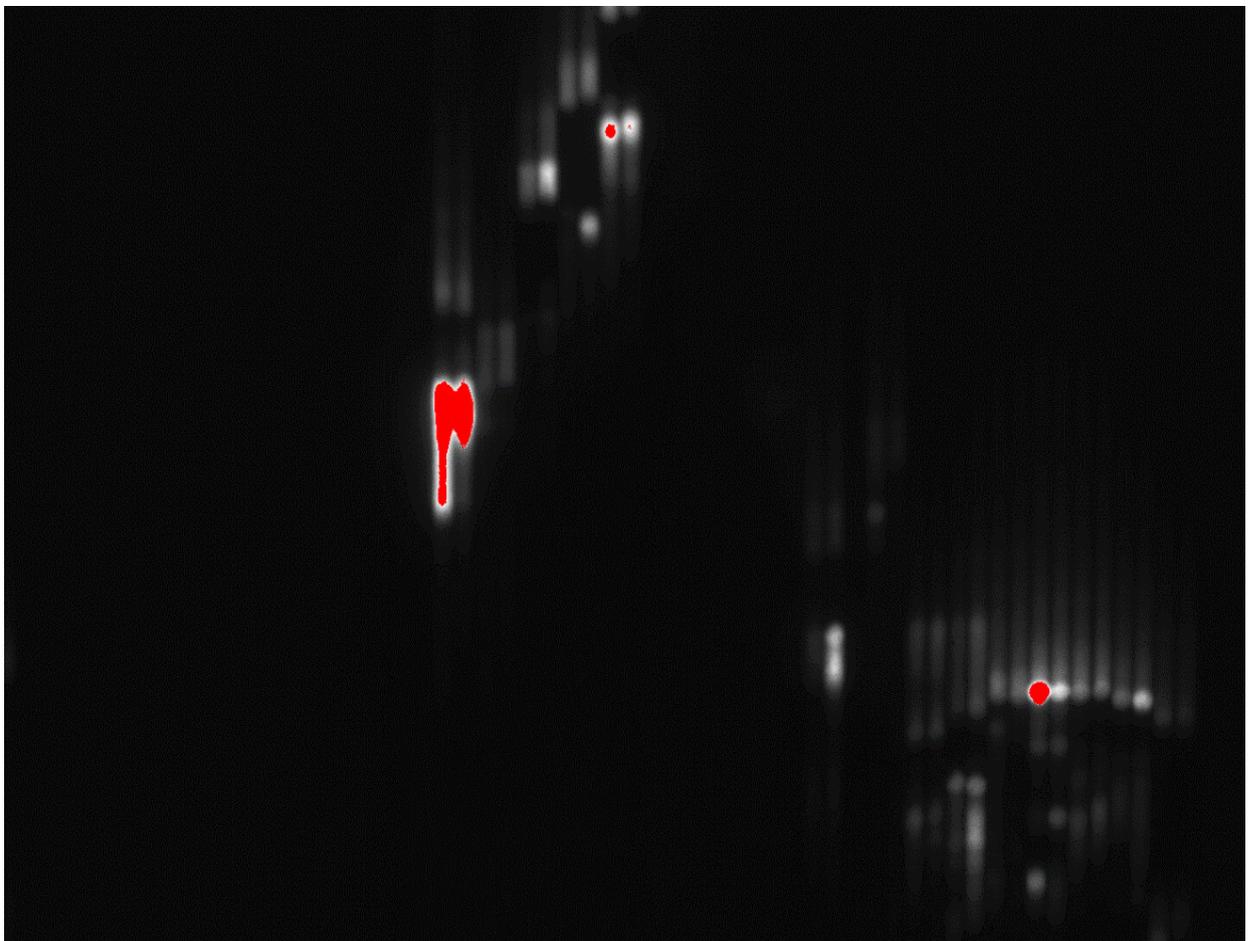
$$D = 4,827\text{mm}/\mu\text{s}$$

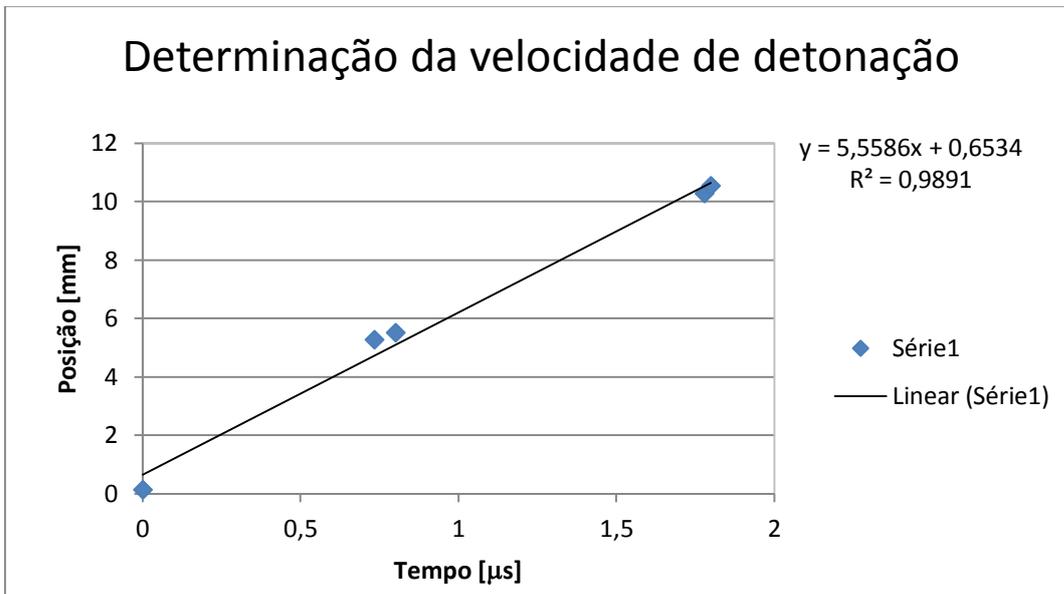
---

EX03DE-5	[%]
microesferas de expancel	0,3
emulsão NA	99,7

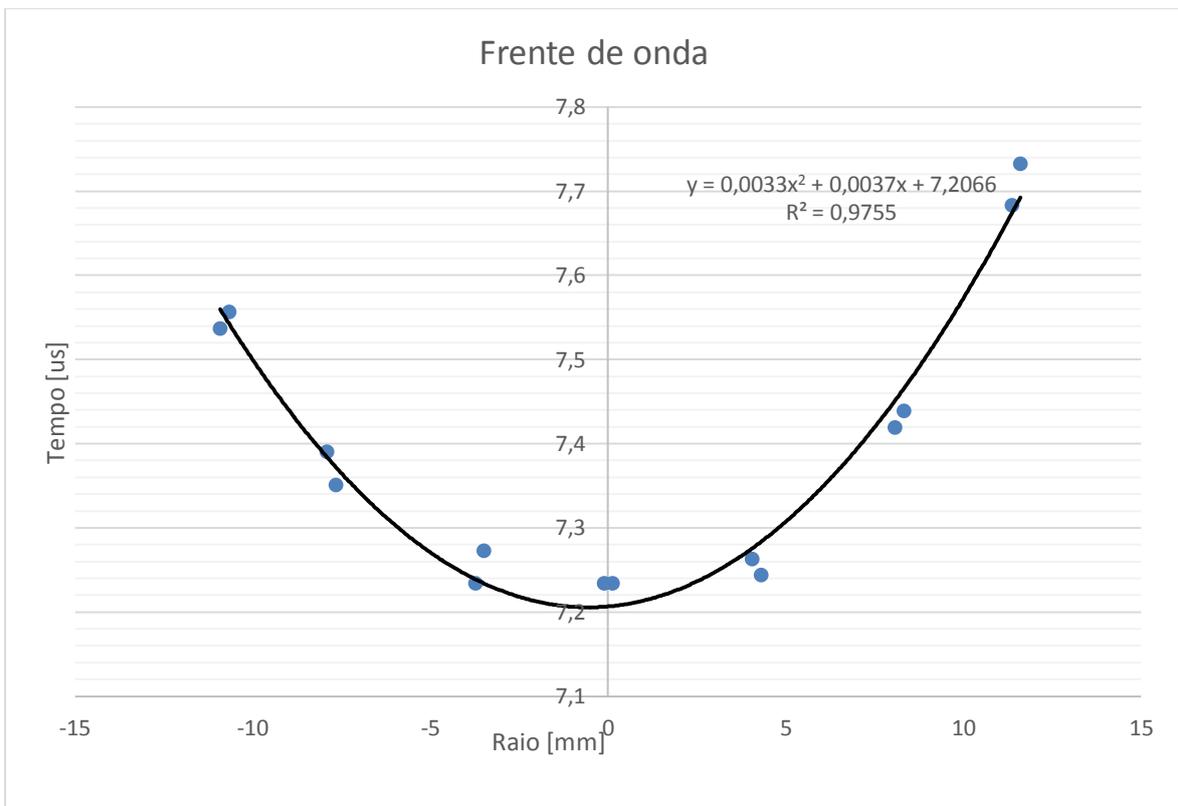
diâmetro tubo [mm]	25
--------------------	----

Densidade do Explosivo [ <i>g. cm</i> <sup>-3</sup> ]	1,0616
--	--------





$$D = 5,5586\text{mm}/\mu\text{s}$$



---

EX02DE-6	[%]
microesferas de expancel	0,2
emulsão NA	99,8

diâmetro tubo [mm]	25
--------------------	----

Densidade do Explosivo [ $g \cdot cm^{-3}$ ]	1,2316
---	--------

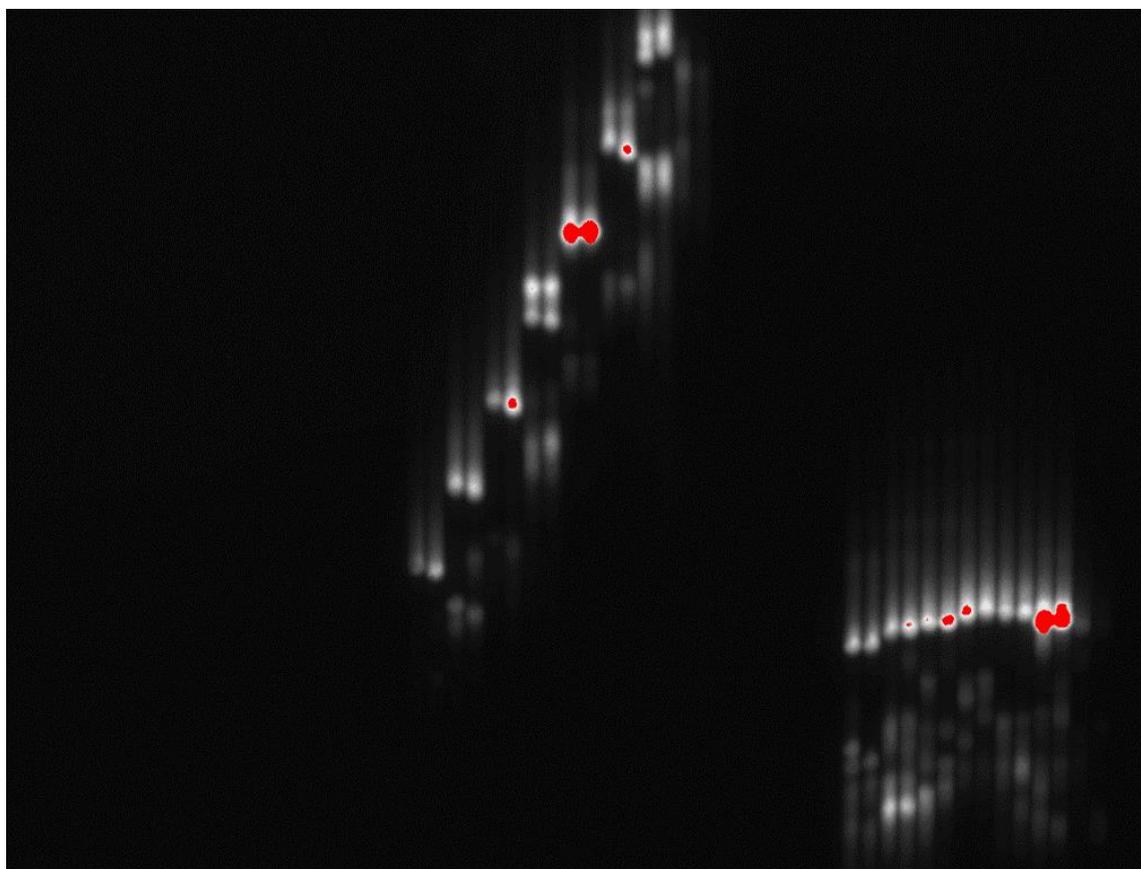


Observações: Esta carga deflagrou, mas não detonou, concluindo-se que  $\rho = 1,232 g \cdot cm^{-3}$  deve estar próximo da densidade crítica, acima da qual não ocorre detonação, para um diâmetro de carga de  $25mm$ .

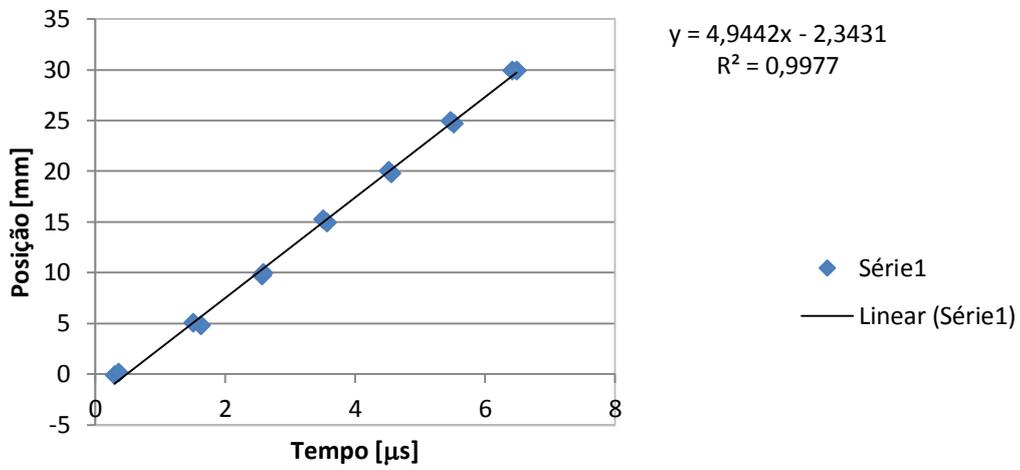
<b>EX075DE-7</b>	[%]
microesferas de expancel	0,75
emulsão NA	99,25

diâmetro tubo [mm]	25
--------------------	----

Densidade do Explosivo [ $g \cdot cm^{-3}$ ]	0,9863
---	--------

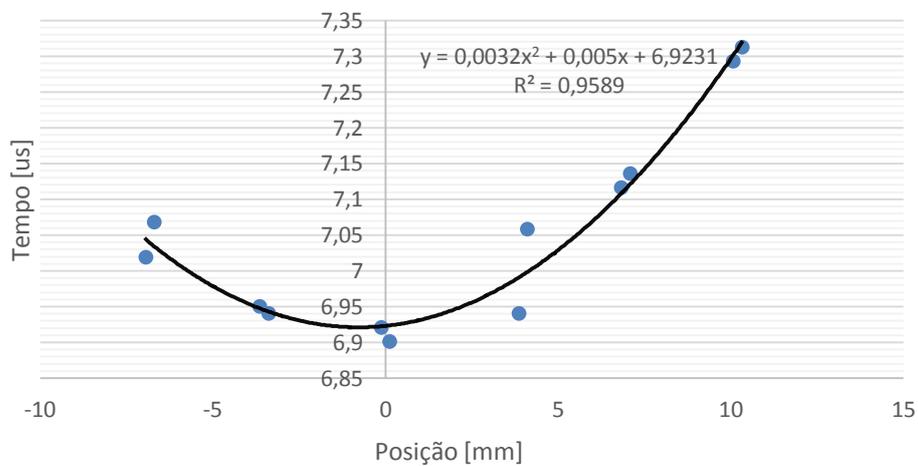


## Determinação da velocidade de detonação



$$D = 4,944 \text{ mm}/\mu s$$

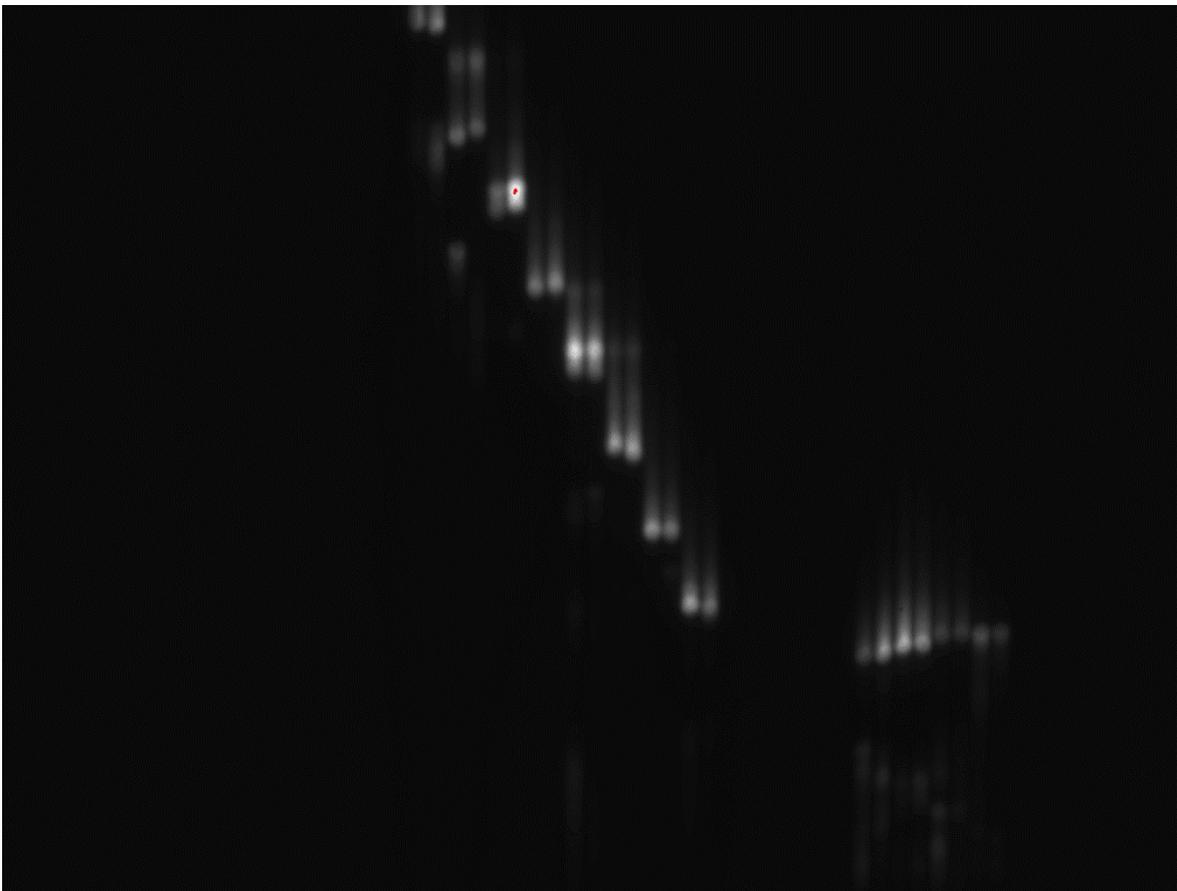
## Frente de onda

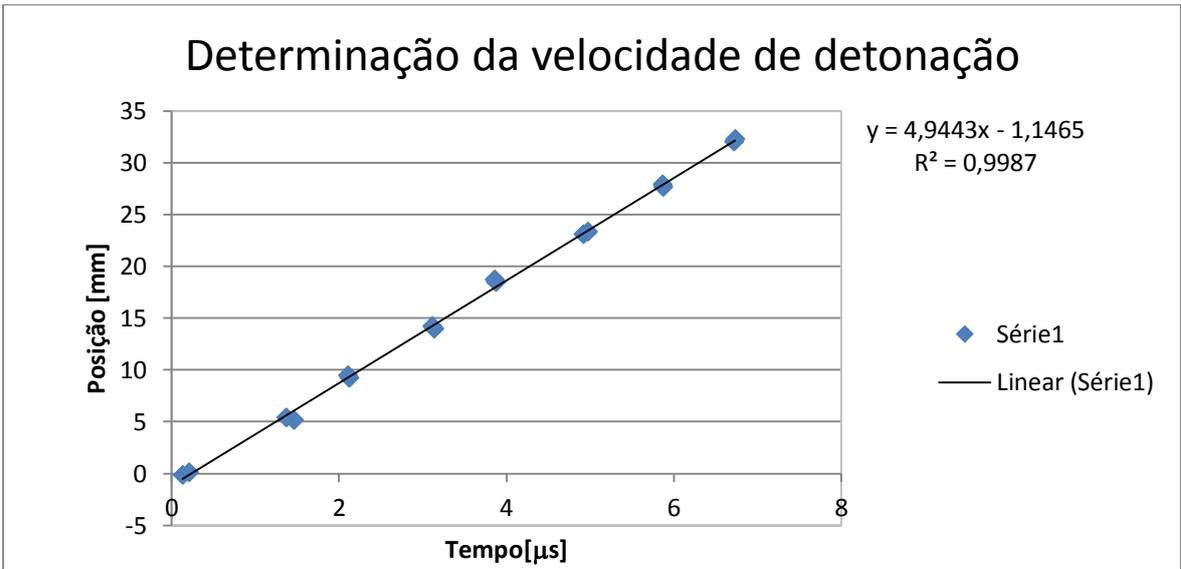


<b>EX075de-8</b>	[%]
microesferas de expancel	0,75
emulsão NA	99,25

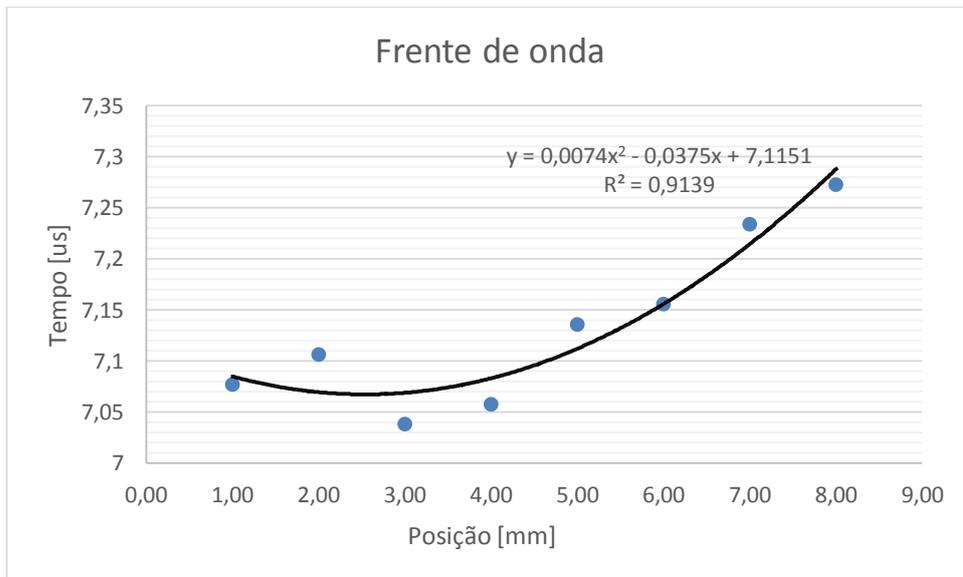
diâmetro tubo [mm]	15,5
--------------------	------

Densidade do Explosivo [ $g \cdot cm^{-3}$ ]	0,8969
---	--------





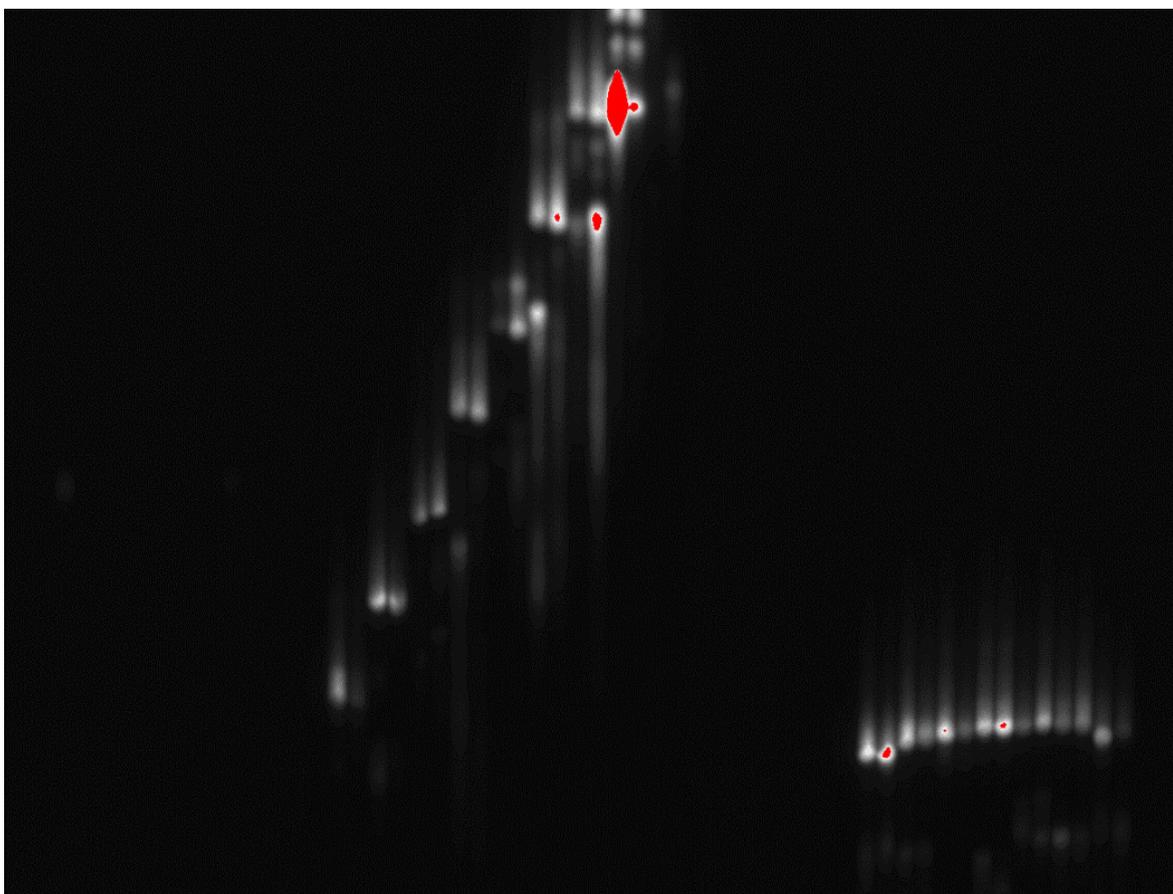
$D = 4,944 \text{ mm}/\mu s$

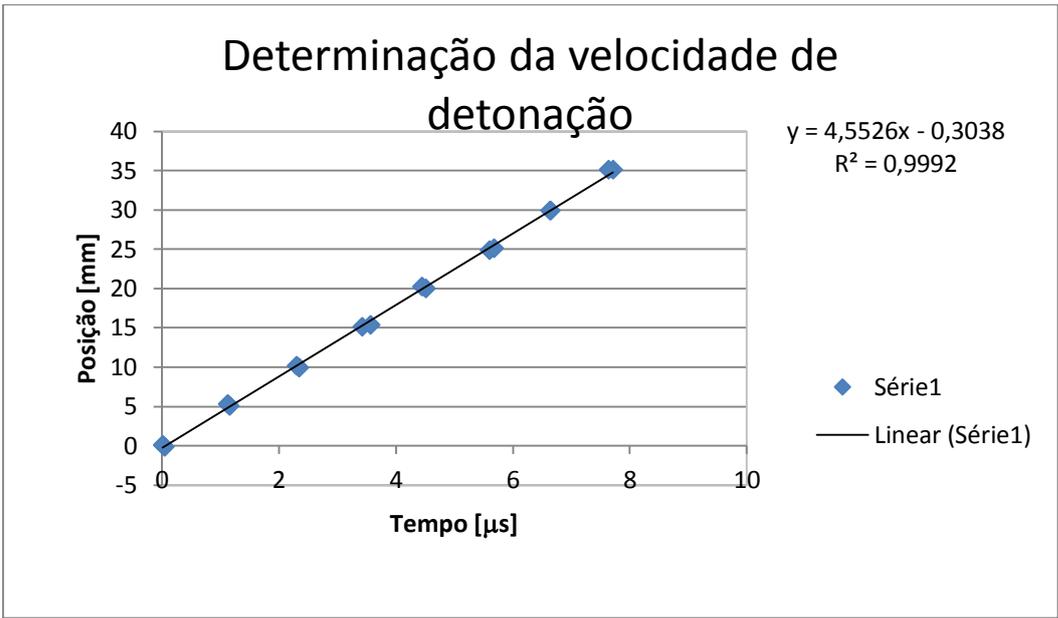


<b>EX1de30-9</b>	[%]
microesferas de expancel	1
emulsão NA	99

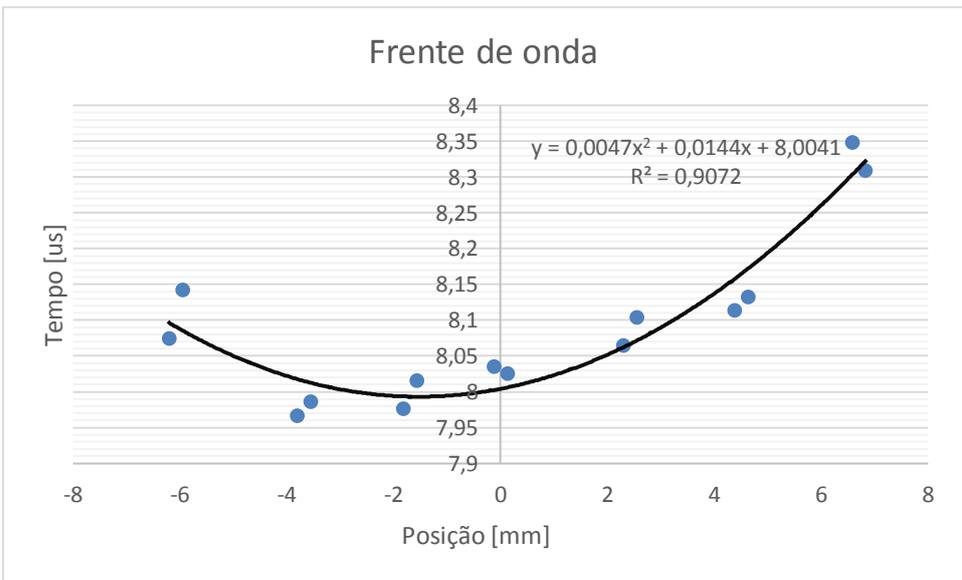
diâmetro tubo [mm]	15,5
--------------------	------

Densidade explosivo [ $g \cdot cm^{-3}$ ]	0,9086
--	--------





$D = 4,553\text{mm}/\mu\text{s}$



Observações: A curva da frente de detonação apresenta inclinação devido a não ter sido colocada de forma correta no confinamento. A correção da frente de onda elimina este erro.

## ANEXO B

### **Resultados obtidos com o osciloscópio e sondas elétricas:**

EX03DE30-10osc	[%]
microesferas de expancel	0,3
emulsão NA	99,7

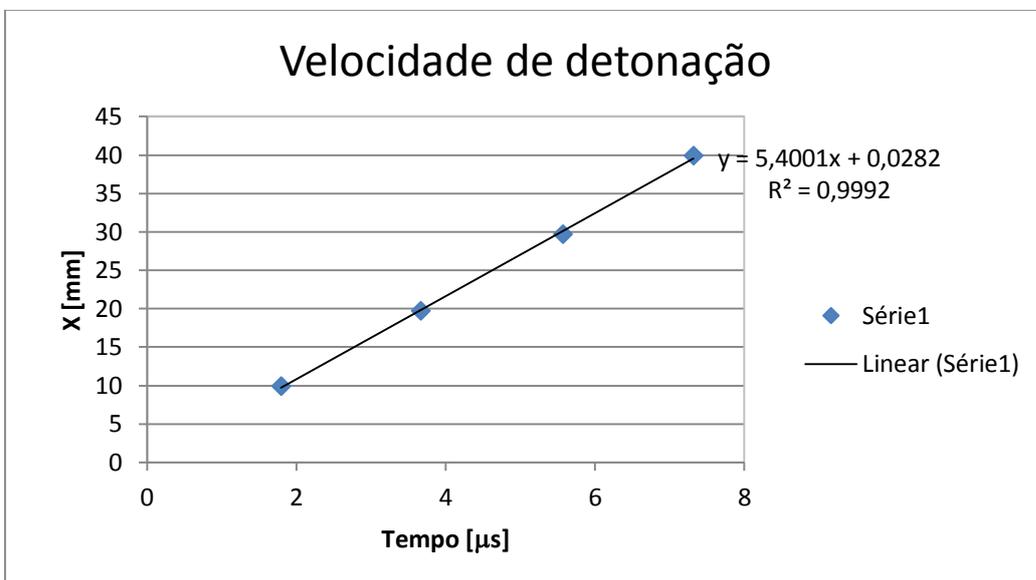
diâmetro da carga [mm]	31
------------------------	----

Esta carga detonou, mas o equipamento não registou dados, provavelmente devido a interferência no sistema elétrico ou falha na fonte de alimentação.

<b>EX03DE30-10osc</b>	[%]
microesferas de expancel	0,5
emulsão NA	99,5

diâmetro da carga [mm]	31
------------------------	----

Densidade do Explosivo [ $g \cdot cm^{-3}$ ]	1,1085
---	--------



$$D = 5,400mm/\mu s$$

Foram também realizados os seguintes ensaios:

	Diâmetro 15,5mm	Diâmetro 31mm
Concentração esferas D30 [%]	2	0,99
Densidade medida [ $g \cdot cm^{-3}$ ]	0,735	0,928
Velocidade detonação [ $mm/\mu s$ ]	4,021	4,908

## ANEXO C

Exemplos em CAD de um confinamento cilíndrico em PVC com 25mm de diâmetro interior e respectivas tampas fabricado nas oficinas do DEM:

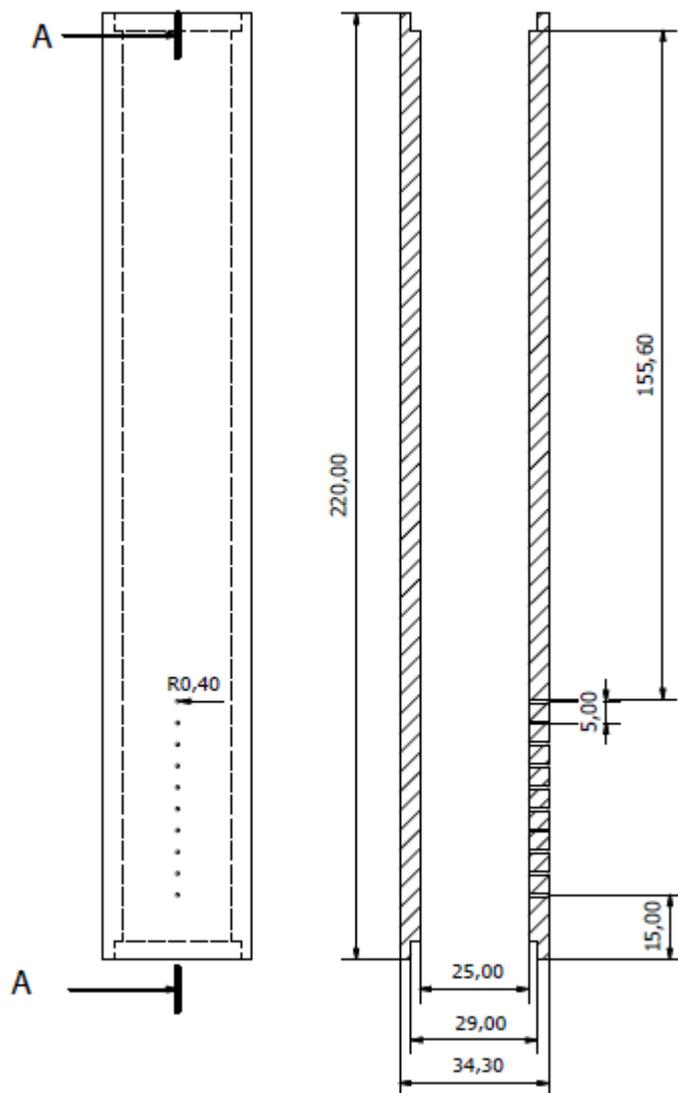


Figura 43 Confinamento cilíndrico de 25mm, e corte ao longo do seu comprimento.

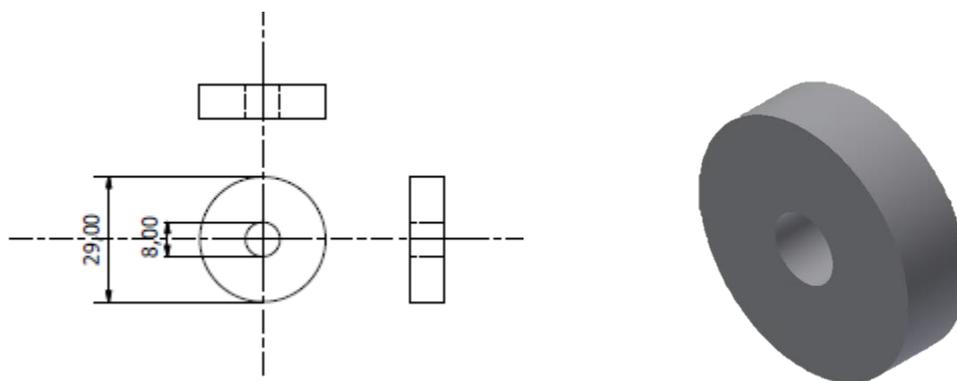


Figura 44 Tampa do confinamento cilíndrico destinada a inserção do detonador.

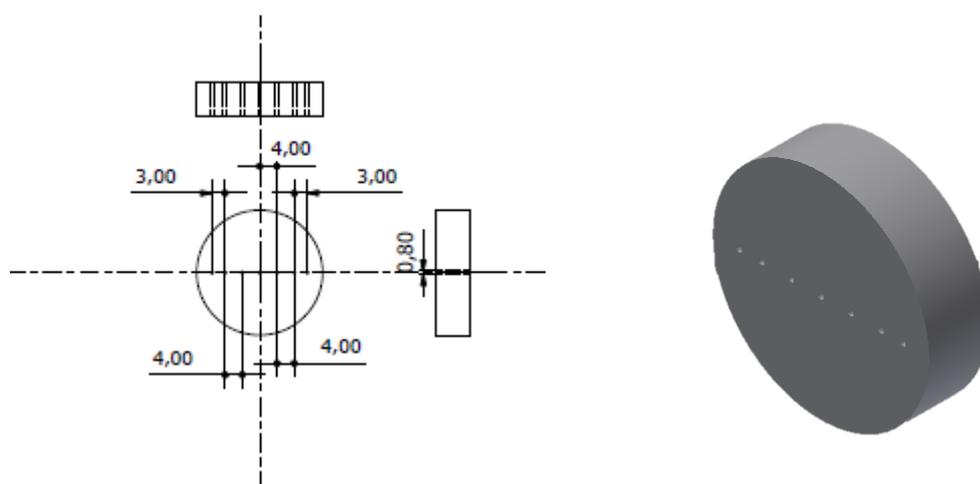


Figura 45 Tampa do confinamento destinada a medição da frente de onda de detonação.



**Figura 46 Montagem integral do confinamento com as tampas colocadas em posição.**



## ANEXO D

### Procedimento de utilização da CEVD e *software*:

- 1 – Ligar o computador;
- 2 – Executar *IIControler*;
- 3 – Selecionar o modo de ligação DIC;
- 4 – Executar HPDTA. Nota: Caso o programa apresente uma janela de erro na abertura, poderá ser necessário verificar se os *drivers* estão presentes, usando o gestor de *drivers* do *Microsoft Windows*.

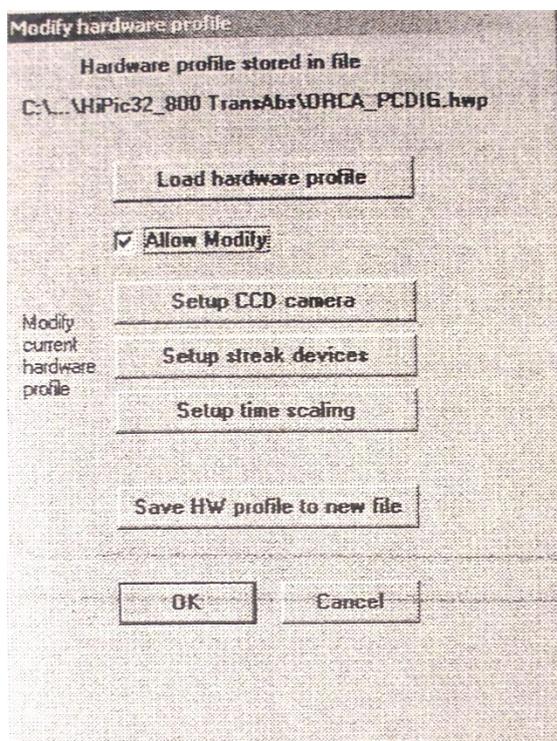


Figura 47 do diálogo de abertura do HPDTA.

---

5 – Calibrar tempo de abertura do *slit*, por exemplo, 10us e definir qual o espaçamento a que vai corresponder cada *pixel*, dividindo o número de pixéis pelo tempo.

Assinalar a caixa *allow modify*;

*Load hardware profile*;

*Streak time calibration setup*;

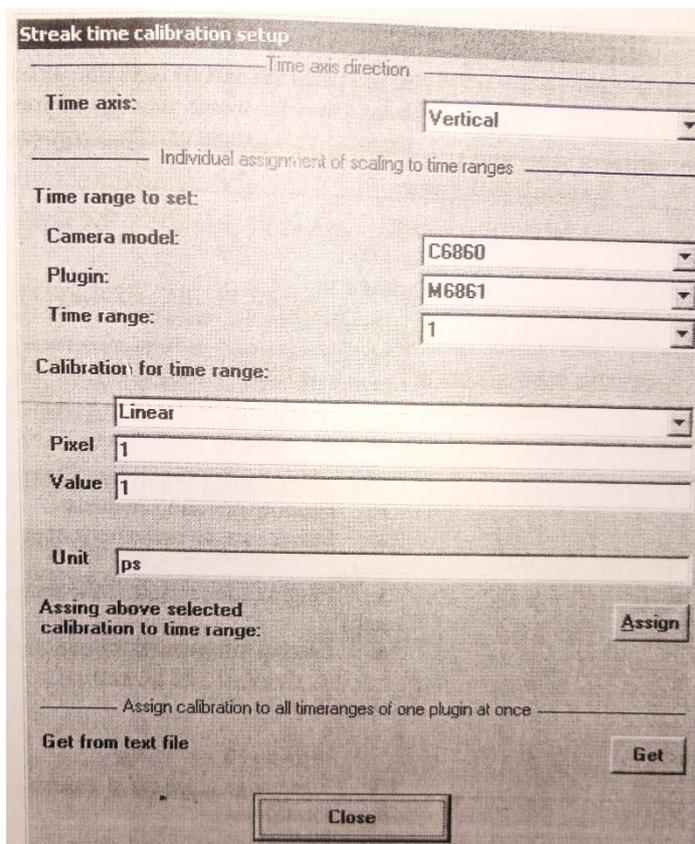


Figura 48 Calibração da escala de tempo.

6 – Abrir o programa e verificar em se as ligações estão corretas e o *sequential mode* está ativado seleccionando as opções da câmara;

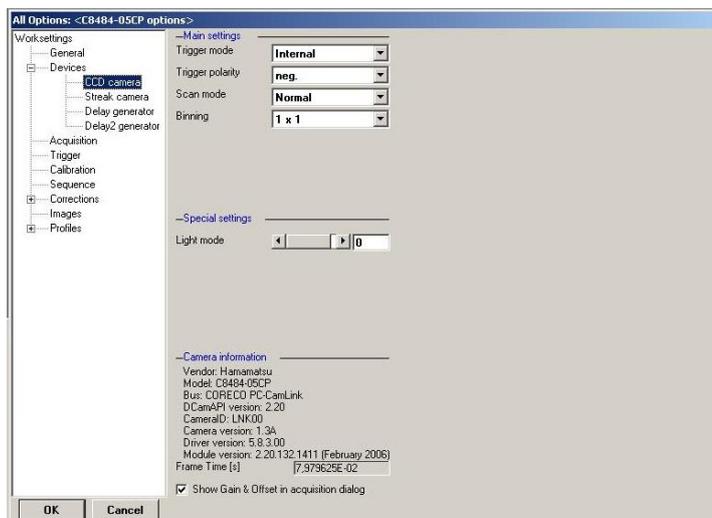


Figura 49 Condições de operação do CCD.

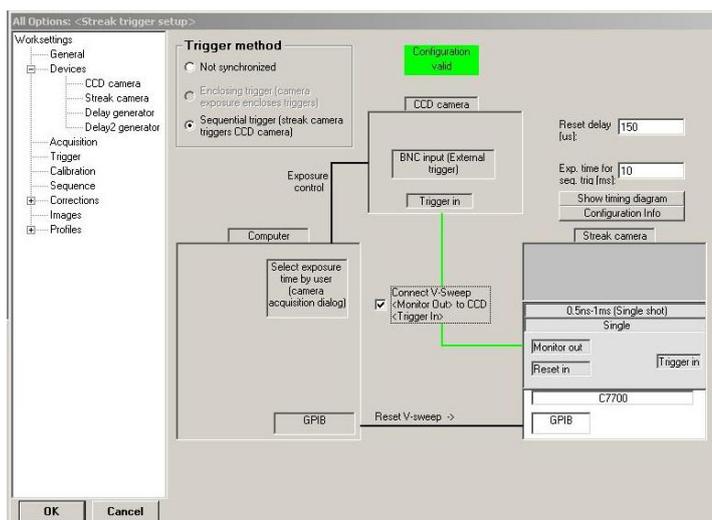


Figura 50 Condições de operação do *trigger*.

7 – Após colocação da fita de fibras óticas no *slit* e com uma fonte luminosa no interior da câmara de explosões, com o modo *Live* do *software*, alinhar e com o *Focus* focar em tempo real as fibras óticas com a câmara de varrimento.



Figura 51 Fotocronograma capturado em modo estático após focagem e alinhamento das fitas

Na figura 17, a cor vermelha de algumas fibras deve-se à saturação provocada pelas fibras óticas luz no interior da câmara de explosão que não foram

---

colocadas na carga. Para capturar a imagem estática usou-se o modo *focus* função *acquire*, e *binning* 1x1.

8 – Simulação de ensaios sem detonador para verificar se o circuito está fechado, caso fechado;

9 – Nesse caso, é colocado o detonador no tubo, ligado ao cabo do detonador, e encerrada a câmara de explosão;

10 – A câmara é colocada no modo *operate*, o *shutter* em modo *Open* e o *binning*  $2 \times 2$ , para os ensaios utilizou-se um tempo de exposição de 400us.

11 – Detonação da carga;

12 – O fotocronograma resultante é obtido de imediato e é gravado em formato TIF, que pode ser trabalhado com qualquer editor de imagem, ou em IMG, que apenas permite o tratamento com o *software* HPDTA;