



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM



DESENVOLVIMENTO DE EXPLOSIVOS UTILIZANDO COMBUSTÍVEIS NÃO-CONVENCIONAIS

Autor: **SALATIEL ASSIS RESENDE**

Orientador: **Prof. Dr. VALDIR COSTA E SILVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas

Área de concentração:

Lavra de Minas

Ouro Preto, outubro de 2011

AGRADECIMENTOS

Ao professor Valdir Costa e Silva pela orientação e conhecimentos transmitidos.

A FAPEMIG pelo apoio financeiro, fundamental para realização deste trabalho.

A companhia VALE, em especial, o Engenheiro de minas Alexandro Fortes, o blaster Alex e toda a equipe de desmonte da Mina do Capitão do Mato que possibilitaram a realização dos ensaios.

Ao meu amigo Moisés pela discussões e contribuições na área de Química

Aos meus pais e irmãos que sempre me apoiaram e o meu cunhado Lúcio, meu grande incentivador.

RESUMO

A utilização do ANFO (*amonium nitrate fuel oil*) implica num reduzido custo de desmonte. Entretanto, tais custos podem ser ainda mais baixos ao se substituir o óleo diesel por combustíveis alternativos como biomassa (biodiesel, palha de arroz, sabugo de milho, bagaço de cana-de-açúcar) e resíduo de pneu. Este artigo investiga o emprego de novos combustíveis, em substituição ao óleo diesel presente na mistura entre o nitrato de amônio e óleo diesel (ANFO) através da medição da velocidade de detonação e, verificar a importância desses combustíveis na mistura explosiva. Com exceção do biodiesel, todos os ensaios provenientes da mistura entre o nitrato de amônio e os combustíveis alternativos apresentaram desempenho insuficiente quando comparado com o resultado do ANFO. Em termos percentuais em relação à velocidade de detonação do ANFO, as misturas apresentaram os seguintes valores: NA + Casca de arroz, 55,4%; NA + Sabugo de milho, 64,9%; NA + bagaço de cana, 70,1%; NA + resíduo de pneu, 74,4% e NA + Biodiesel, 93,7%. Entretanto, este estudo, sugere que a metodologia desenvolvida neste trabalho pode ser aplicada como referência para determinação e elaboração de misturas explosivas entre agentes oxidantes e combustíveis, uma vez que na totalidade dos ensaios realizados ocorreu a detonação das cargas.

Palavras Chave: ANFO, desmonte, combustíveis alternativos, biomassa.

ABSTRACT

The use of ANFO (ammonium nitrate fuel oil) implies a low cost of blasting. However, such costs may be even lower by replacing diesel fuel with alternative fuels such as biomass (biodiesel, rice straw, corn cobs, bagasse cane sugar) and waste tire. This paper investigates the use of new fuels to replace diesel fuel in the mixture of ammonium nitrate and diesel oil (ANFO) by measuring the detonation velocity, and verifies the importance of these fuels in explosive mixture. With the exception of biodiesel, all the tests from the mixture of ammonium nitrate and alternative fuels showed poor performance when compared with the result of ANFO. In percentage terms in relation to the detonation velocity of ANFO, mixtures with the following values: NA + Rice Hull, 55.4% NA + cob of corn, 64.9% NA + bagasse, 70.1 % NA + waste tire, and 74.4% NA + Biodiesel, 93.7%. However, this study suggests that the methodology developed here can be applied as a reference for determination and preparation of explosive mixtures of fuel and oxidizing agents, since in all the tests conducted the detonation of the charges occurred.

Key words: ANFO, blasting, alternative fuels, biomass

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE SIGLAS E UNIDADES	vii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	
1. Histórico dos explosivos.....	2
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2. Propriedades e seleção de explosivos.....	3
2.1 Introdução.....	4
2.2 Classificação dos explosivos.....	5
2.3 Propriedades dos explosivos.....	6
2.3.1 Introdução.....	7
2.3.2 Densidade.....	7
2.3.3 Velocidade de detonação.....	10
2.3.4 Pressão de detonação.....	12
2.3.5 Estabilidade.....	13
2.3.6 Resistência a água.....	13
2.3.7 Sensibilidade.....	14
2.4 Balanço de oxigênio de um explosivo.....	17
2.5 Nitrato de amônio.....	19

2.6. ANFO.....	20
2.7 Acessórios de transmissão de energia.....	21
2.7.1 Estopim de segurança.....	22
2.7.2 Espoleta simples.....	23
2.7.3 Espoleta elétrica.....	24
2.7.4 Cordel detonante.....	25
2.7.5 Sistema não-elétrico de iniciação com linha silenciosa.....	26
2.7.6 Reforçador (booster).....	28
2.8 Combustíveis	29
2.8.1 Bagaço de cana.....	29
2.8.1.1 Produção e geração de resíduos.....	29
2.8.1.2 Composição química do bagaço da cana de açúcar.....	30
2.8.2 Casca de arroz.....	31
2.8.2.1 Produção e geração de resíduos.....	31
2.8.2.2 Composição química da casca de arroz.....	32
2.8.3 Sabugo de milho.....	32
2.8.3.1 Produção e geração de resíduos.....	32
2.8.3.2 Composição química do sabugo de milho.....	33
2.8.4 Resíduo de pneu.....	33
2.8.4.1 Produção e geração de resíduos.....	33
2.8.4.2 Composição química do resíduo de pneu.....	34
2.8.5 Biodiesel.....	35

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

3.1 Amostragem.....	37
3.2 Preparação de amostras.....	38

3.2.1	Quarteador Jones.....	38
3.2.2	Amostra de Biodiesel.....	40
3.3	Análise elementar.....	40
3.4	Cálculo da fórmula mínima.....	41
3.5	Determinação da reação química e balanceamento	44
3.6	Cálculo da mistura explosiva- percentual em massa.....	45
3.7	Cálculo da massa da mistura necessária para cada tubo.....	47
3.8	Equipamento para medição da VoD	49
3.9	Ensaio de campo.....	51
3.10	Localização da mina.....	53

CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1	Mistura entre o Nitrato de Amônio e Sabugo de milho.....	53
4.2	Mistura entre o Nitrato de Amônio e Casca de arroz.....	59
4.3	Mistura entre o Nitrato de Amônio e Bagaço da Cana.....	64
4.4	Mistura entre o Nitrato de Amônio e Resíduo de pneu.....	69
4.5	Mistura entre o Nitrato de Amônio e Biodiesel.....	73
4.6	ANFO.....	78

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

5	Conclusões.....	82
---	-----------------	----

	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
--	--	-----------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Classificação dos explosivos.....	6
Figura 2 Curvas de densidade da emulsão em função da profundidade em condições secas.....	9
Figura 3 Influência do diâmetro da carga sobre a velocidade de detonação.....	11
Figura 4 Estopim de segurança.....	22
Figura 5 Espoleta simples.....	23
Figura 6 Espoleta elétrica instantânea.....	24
Figura 7 Cordel detonante.....	26
Figura 8 Sistema não elétrico de iniciação com linha silenciosa.....	27
Figura 9 Reforçador (booster).....	28
Figura 10 Corte de um pneu radial de automóvel.....	34
Figura 11 Reação de transesterificação.....	36
Figura 12 Incrementos dos combustíveis que serão utilizados para compor amostra.....	37
Figura 13 Quarteamento pelo método da pilha cônica.....	38
Figura 14 Quarteador Jones.....	39

Figura 15 Amostra de biodiesel.....	40
Figura 16 Tubo de aço e reforçador com sua respectiva medidas.....	47
Figura 17 Equipamento para medição da VoD (Microtrap).....	49
Figura 18 Técnica de medição da VOD, utilizando-se cabo coaxial.....	50
Figura 19 Carregamento da mistura em tubos de aços Schedule 80...	52
Figura 20 Fotografia com os acessórios necessários à realização do ensaio.....	52
Figura 21 Microtrap preparado para registrar o evento.....	53
Figura 22 Primeiro ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e sabugo de milho.....	54
Figura 23 Segundo ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e sabugo de milho.....	55
Figura 24 Terceiro ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e sabugo de milho.....	56
Figura 25 Quarto ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e sabugo de milho.....	57
Figura 26 Gráfico comparativo entre a velocidade de detonação do ANFO e a mistura NA + Sabugo de milho.....	58
Figura 27 Primeiro ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e casca de arroz.....	59
Figura 28 Segundo ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e casca de arroz.....	60

Figura 29 Terceiro ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e casca de arroz.....	61
Figura 30 Quarto ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e casca de arroz.....	62
Figura 31 Gráfico comparativo entre a velocidade de detonação do ANFO e a mistura NA + casca de arroz.....	63
Figura 32 Primeiro ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e bagaço de cana.....	64
Figura 33 Segundo ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e bagaço de cana.....	65
Figura 34 Terceiro ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e bagaço de cana.....	66
Figura 35 Quarto ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e bagaço de cana.....	67
Figura 36 Gráfico comparativo entre a velocidade de detonação do ANFO e a mistura NA + bagaço de cana.....	68
Figura 37 Primeiro ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e resíduo de pneu.....	69
Figura 38 Segundo ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e resíduo de pneu.....	70
Figura 39 Terceiro ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e resíduo de pneu.....	71
Figura 40 Gráfico comparativo entre a velocidade de detonação do ANFO e a mistura NA + Resíduo de Pneu.....	72

Figura 41 Primeiro ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e biodiesel.....	73
Figura 42 Segundo ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e biodiesel.....	74
Figura 43 Terceiro ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e biodiesel.....	75
Figura 44 Quarto ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e biodiesel.....	76
Figura 45 Gráfico comparativo entre a velocidade de detonação do ANFO e mistura NA +Biodiesel.....	77
Figura 46 Primeiro ensaio - velocidade de detonação do ANFO.....	78
Figura 47 Segundo ensaio - velocidade de detonação do ANFO.....	79
Figura 48 Gráfico mostrando a variação da média da VoD em função das diferentes misturas.....	80
Figura 49 Gráfico comparativo das velocidades de detonação da misturas explosivas.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Massa específica.....	8
Tabela 2 Resistência à água.....	14
Tabela 3 Sensibilidade (diâmetro crítico).....	16
Tabela 4 Cálculo da necessidade ou deficiência de oxigênio para balancear equação.....	17
Tabela 5 Massa molecular dos componentes da mistura.....	18
Tabela 6 Composição química média do bagaço de cana.....	30
Tabela 7 Composição química média da casca de arroz.....	32
Tabela 8 Composição química média do sabugo de milho.....	33
Tabela 9 Composição química média do pneu.....	35
Tabela 10 Análise elementar dos combustíveis.....	41
Tabela 11 Cálculo para determinação da fórmula mínima proposto por Feltre	42
Tabela 12 Cálculo para determinação da fórmula mínima.....	43
Tabela 13 Cálculo para determinação da porcentagem em massa de nitrato de amônio e sabugo de milho.....	45
Tabela 14 Cálculo para determinação da porcentagem em massa de nitrato de amônio e casca de arroz.....	45

Tabela 15 Cálculo para determinação da porcentagem em massa de nitrato de amônio e bagaço de cana.....	46
Tabela 16 Cálculo para determinação da porcentagem em massa de nitrato de amônio e resíduo de pneu.....	46
Tabela 17 cálculo para determinação da porcentagem em massa de nitrato de amônio e biocombustível.....	46

LISTA DE SIGLAS E UNIDADES

ANFO Ammonium nitrate fuel oil

NA Nitrato de amônio

USBM Unite State Bureau of Mine

VOD Velocidade de detonação de um explosivo (m/s)

q_1 Concentração linear de carga(kg/m)

ρ_e Densidade do explosivo (g/cm³)

D Diâmetro de carga (mm)

PF Pressão produzida no furo (GPa)

GPa Giga pascal

MPa Mega pascal

d_{cr} Diâmetro crítico

h altura (cm)

r raio (cm)

V volume (cm³)

M massa (kg)

D massa específica (g/cm³)

Mm Massa do sabugo de milho (g)

Ma Massa da casca de arroz (g)

Mc Massa do bagaço-de-cana (g)

M_p Massa do resíduo de pneu (g)

M_b Massa do biodiesel (g)

U tensão (V)

R Resistência elétrica (Ω)

I corrente elétrica (A)

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

A maioria dos bens minerais, dos quais a sociedade moderna necessita, é obtida pelo uso de explosivos nas lavras de boa parte das minas. Isso, também acontece na construção de estradas, canais e edifícios e obras de engenharia, tanto na construção civil quanto na mineração. Além disso, os alimentos abundantes, que estão disponíveis para população, não existiriam sem o emprego de explosivos, pois estes são responsáveis pela obtenção dos fertilizantes e os minérios metálicos, que são transformados em insumos e bens duráveis (National Highway Intitute, 1991). Em função da grande utilização dos explosivos pela sociedade, nos últimos 40 anos, estes vêm apresentando um acentuado desenvolvimento tecnológico, objetivando alcançar os seguintes resultados: uma melhor fragmentação das rochas; maior segurança no manuseio; maior resistência à água e menor custo por unidade de rocha desmontada (Silva, 2006).

Em meados da década de 1950, um novo produto denominado ANFO, sigla resultante dos vocábulos ingleses Ammonium Nitrate Fuel Oil, surgiu no mercado sendo uma mistura entre o nitrato de amônio e óleo diesel. Esse explosivo era mais econômico, quando comparado à dinamite. Assim, durante as décadas de 1970 e de 1980, o ANFO tornou-se o principal explosivo da indústria, e, aproximadamente, 80% de todos os explosivos usados nos Estados Unidos eram nitrato de amônio e óleo combustível (National Highway Intitute, 1991). Recentemente, estudiosos, entre eles, Rossmanith, propuseram a substituição do óleo diesel por novos combustíveis, como por exemplo a borracha, a fim de verificar as propriedades da nova mistura, tais como densidade, diâmetro crítico, energia e, principalmente, velocidade de detonação.

Assim como a borracha, a biomassa, como bagaço de cana, sabugo de milho, casca de arroz e os biocombustíveis, podem compor a mistura com o nitrato de amônio, por se tratarem de combustíveis, ou seja, liberam energia quando submetidos a uma reação de combustão na presença de oxigênio.

Sendo assim, esta pesquisa tem por objetivo verificar o desempenho destes combustíveis em separado, em termos de velocidade de detonação, quando adicionado ao nitrato de amônio.

1- Histórico dos Explosivos

O uso de explosivos nas minerações e nas construções civis remonta a 1627. No período de 1627 a 1865, o explosivo utilizado era a pólvora negra, que era diferente dos demais explosivos utilizados atualmente (National Highway Intitute, 1991). A pólvora negra era extremamente perigosa, devido à sua facilidade de iniciação diante da presença de quaisquer faíscas. Já em 1847, o químico italiano Ascanio Sobrero, desenvolveu a nitroglicerina de forma genuína. Sua intenção, no entanto, não era torná-la uma mistura explosiva, através da reação da glicerina com um concentrado de ácido nítrico e sulfúrico. Tal descoberta tornou-se a principal base para fabricação da Dinamite e da Gelatina inventadas por Alfred Nobel em 1867 e 1875. (Zucas,1997). Após intenso trabalho de laboratório, Nobel descobriu que os problemas de insegurança da NG podiam ser resolvidos por dispersão do óleo num material inerte, a chamada diatomita, argila mineral com capacidade de absorção. A mistura de NG e diatomita, na proporção de 3:1 originava um explosivo que, embora de potência inferior à NG líquida, era de manuseio mais fácil e permitia detonações de menor intensidade e previsíveis com segurança bastante superior à da nitroglicerina. Além disso, Novel inventou a Balestite ou pólvora Nobel, mistura de NG, nitrocelulose, bezeno e cânfora, cuja combustão não produz partículas sólidas, mas apenas gases. Um “pólvora sem fumo”, a chamada pólvora Nobel. Este novo tipo de explosivo permitiu a eliminação dos inconvenientes do fumo da pólvora clássica, quer para a gestão das operações militares, quer para a saúde dos artilheiros (Machado, 2006).

No início do século XX, alguns desastres envolvendo o ANFO chamaram a atenção da opinião pública para o uso deste como agente explosivo. No entanto somente a partir da utilização da tecnologia de peloteamento (*prilling*) após a I Guerra Mundial, é que esse sal foi efetivamente utilizado na forma de ANFO. Em 1953, no Estado de Indiana, USA, Robert Akre da Maumee Collieries, patenteou uma mistura de NA e carvão em pó (“carbon black”), denominada mistura de "Akremite", logo depois comercializada em larga escala pela DuPont Munarretti (apud HOPLER, 1999, SUTTON & PUGSLEY, 1964, p.10) . A partir de então, produtores da indústria de fertilizantes iniciaram a produção do nitrato de amônio em grãos (prills) para uso como explosivo, e aos poucos óleo combustível e diesel substituíram o negro do fumo. A abreviação ANFO se popularizou e também gerou novos tipos de NA, como o “prill poroso”, de menor densidade e quantidade de material anti-empedante (*anti-caking*), que absorve óleo mais rapidamente (Munarretti et al.2004)

De acordo com Munarretti et al.(2004), no Brasil, poucas companhias de explosivos dividem o mercado de mineração e construção. Aliado a essa realidade, a falta de informação sobre a utilização do ANFO pela maior parte das minas e pedreiras faz com que as mesmas tornem-se dependentes dos produtos e preços estabelecido pela indústria de explosivo. Contrariamente, as empresas que utilizam o ANFO, em geral, apresentam um custo de desmonte reduzido, porém nem sempre buscam alternativas de substituição do óleo diesel no ANFO por desconhecerem exatamente as vantagens em termos de desempenho na troca por outros combustíveis alternativos.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 - Propriedades e seleção de explosivos

2.1 - Introdução

Do ponto de vista prático, explosivos são simplesmente materiais destinados a produzir uma explosão. Apresentam facilidade de se decompor quimicamente em curto intervalo de tempo, gerando gases em alta temperatura e realizando trabalho mecânico em torno do material. Por ter uma aplicação prática, os explosivos devem apresentar alguma estabilidade química, suficientemente para não se decompor espontaneamente quando sujeitos a algum estímulo, como: atrito, impacto ou fonte de calor limite que pode ocorrer durante o manuseio e estocagem. A estabilidade térmica dos materiais energéticos e suas reações de queima são importantes fatores para classificação dos mesmos em grupos distintos de “sensibilidade” Persson et al. (1996).

2.2 - Classificação dos explosivos

A figura 1 mostra a classificação dos explosivos. Para tanto, o enfoque ficará restrito aos explosivos químicos, por serem mais utilizados nas minerações e obras civis.

Segundo Silva (2006), os explosivos comerciais podem ser classificados em três tipos:

2.1.1 - Explosivos rápidos ou detonantes (altos explosivos): explosivos caracterizados pela elevadíssima velocidade de reação, variando de 1500 a 9000 m/s e alta taxa de pressão, variando de 0,1 GPa à 150 GPa.

2.1.2 - Explosivos lentos ou deflagrantes (baixos explosivos): explosivos caracterizado por uma velocidade de reação muito baixa (abaixo de 1500 m/s) e pressões em torno de 345 MPa.

2.1.3 - Agentes detonantes: são misturas cujos ingredientes não são classificados como explosivos: ANFO, ANFO/AL, Lama, ANFO Pesado, emulsões.

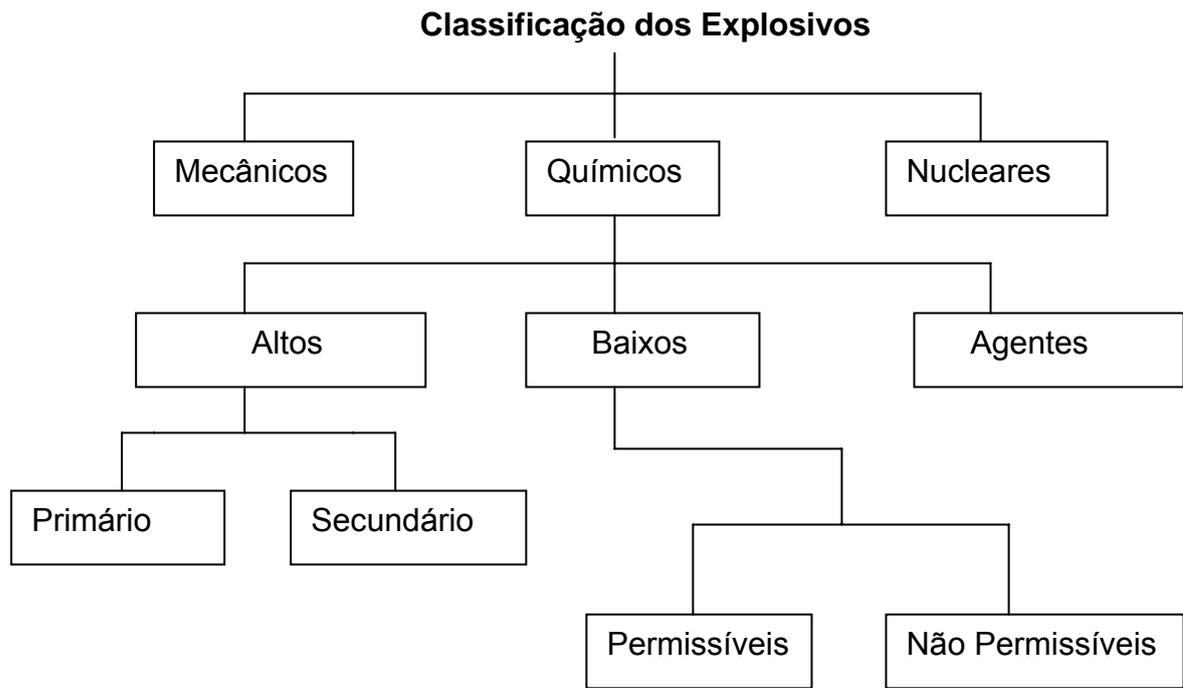


Figura 1: Classificação dos Explosivos.

Fonte: (Silva, 2006)

Os explosivos deflagrantes compreendem as pólvoras, compostos pirotécnicos compostos propulsores para artilharia e foguetes, sem nenhuma aplicação na mineração ou engenharia civil; salvo em casos de rochas ornamentais.

Os explosivos detonantes dividem-se em primários e secundários segundo sua aplicação. Os primários possuem alta energia e sensibilidade, sendo utilizados como iniciadores para detonação dos secundários, entres eles podem ser mencionados os compostos utilizados em detonadores e multiplicadores (fulminato de mercúrio, azida de chumbo etc.) Os secundários são utilizados no desmonte da rochas, e, apesar de apresentarem menor sensibilidade em relação ao primários, desenvolvem maior trabalho útil. Esses compostos podem ser misturas de substâncias explosivas ou não, tendo como finalidade um menor preço de fabricação, melhor balanço de oxigênio, além de características e propriedades que confere aos ingredientes, sensibilidade, densidade, potência, resistência a água etc. Jimeno et al.(2003).

2.3 - Propriedades de Explosivos

2.3.1 - Introdução

O desempenho de um explosivo depende de suas características intrínsecas, bem como às condições sob a qual são submetidos, uma vez que existem diferentes tipos explosivos disponíveis, apresentando diferenças em relação às suas propriedades, como: densidade, velocidade de detonação, pressão produzida, sensibilidade. Isso torna importante o conhecimento dessas propriedades a fim de garantir a melhor aplicabilidade para condições exigidas (Bhandari, 1997)

2.3.2 - Densidade

A densidade da maioria dos explosivos varia entre 0,8 e 1,6 g/cm³ e igualmente à velocidade de detonação, quanto maior, maior o efeito de ruptura do explosivo.

A densidade de um agente explosivo pode ser um fator crítico, pois se muita baixa, torna-se sensível ao cordel detonante, iniciando a carga de explosivo ao longo do furo antes que se inicie o reforçador (booster), normalmente localizado no fundo do furo. Do contrário, densidade alta, esse agente torna-se insensível e não detona.

Além disso, a densidade de um explosivo é um fator importante para o cálculo da quantidade de carga necessária em um desmonte. Como regra geral no fundo dos furos onde se necessita de maior concentração de energia para o arranque da rochas, utilizam-se explosivos mais densos como os gelatinosos e hidrogéis, enquanto que em cargas de coluna, requer explosivos menos densos, á base de ANFO. (Jimeno et al). A tabela 1 mostra valores típicos da massa específicas dos explosivos.

Tabela 1: Massa específica de vários tipos de explosivos

TIPO	MASSA ESPECÍFICA (g/cm³)
Dinamite granulada	0,8 - 1,4
Dinamite gelatina	1,0 - 1,7
Lama encartuchada	1,1 - 1,3
Lama a granel	1,1 - 1,6
ANFO	0,8 - 1,0
ANFO derramando	0,8 - 0,9
ANFO encartuchado	1,1 - 1,2
ANFO pesado	1,1 - 1,4

Fonte: National Highway Institute, 1991

A concentração linear da carga q_1 , em um furo de diâmetro D e uma densidade ρ_e , é calculada a partir da fórmula abaixo:

$$q_1 \text{ (kg/m)} = 7,854 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_e \cdot D^2 \quad (1)$$

onde:

ρ_e = densidade do explosivo (g/cm³)

D = Diâmetro de carga (mm)

De acordo com Jimeno et al.(2003), quando os furos apresentam uma grande profundidade, um fenômeno que pode estar presente é a variação da densidade do explosivo ao longo desses furos como consequência do aumento de pressão. A figura 2 mostra as curvas correspondentes à densidade de carregamento ou efetiva em função da altura para uma emulsão com uma densidade de $1,02 \text{ g/cm}^3$ e uma densidade básica de $1,35 \text{ g/cm}^3$, carregada em furos de 250 mm de diâmetro. Além disso, segundo Silva (2006), explosivos com densidade igual ou inferior a 1 não devem ser utilizados em furos que contenham água. Em detonações, em que uma fina fragmentação é desejada, recomenda-se um explosivo de maior densidade. Para rochas fragmentadas “in situ”, ou onde não é requerida uma fragmentação demasiada, um explosivo de baixa densidade será suficiente.

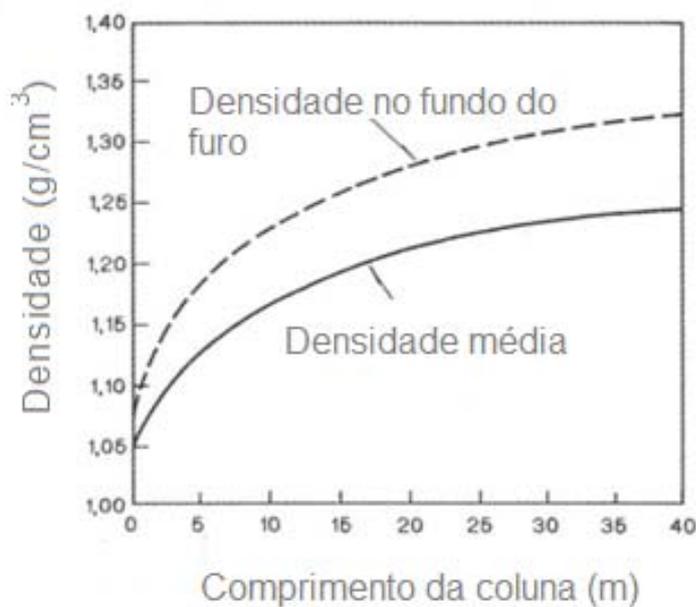


Figura 2: Curvas de densidade da emulsão em função da profundidade dos furos, que não contém água.

Fonte: Jimeno et al.(2003)

2.3.3 - Velocidade de detonação

A velocidade da onda de detonação que se propaga através do explosivo é um parâmetro que define o ritmo de liberação de energia. Os parâmetros que afetam a velocidade de detonação são: a densidade da carga, o diâmetro, o confinamento e o tempo de validade do explosivo. Para os três primeiros, conforme aumentam os seus valores, a velocidade de detonação cresce significativamente, conforme mostra a figura 3. Jimeno et al.(2003).

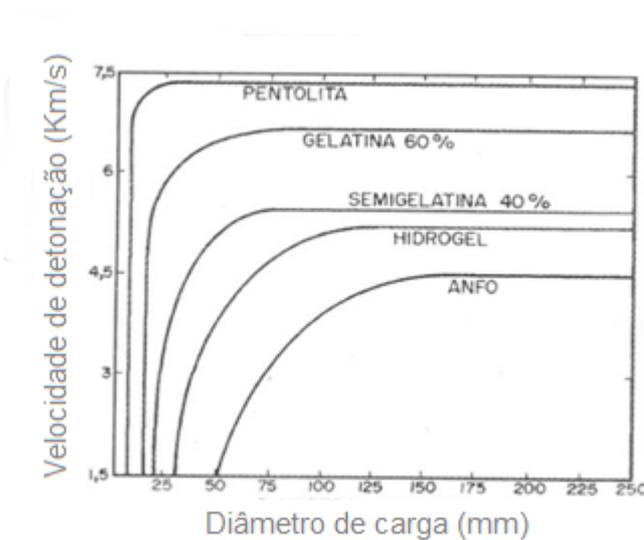


Fig. 3: Influência do diâmetro da carga sobre a velocidade de detonação.

Fonte: Jimeno et al.(2003)

Atualmente, a velocidade de detonação (VoD) é única propriedade de detonação que pode ser determinada facilmente nos furos. Provavelmente, por essa razão, tem-se atribuído uma grande importância a essa velocidade (Rossmanith,1993).

De acordo com (Silva, 2006) a medição da velocidade de detonação dos explosivos tem os seguintes objetivos:

- determinar a velocidade de detonação do explosivo, para que, a partir da mesma, seja calculada a pressão produzida no furo durante a detonação;
- comparar o desempenho do explosivo quando iniciado com diferentes escorvas, acessórios e diferentes materiais utilizados para o confinamento do tampão;
- verificar se os explosivos e acessórios estão detonando de acordo com o valor fornecido pelos fabricantes.

2.3.4 - Pressão de detonação

A pressão de detonação de um explosivo é expressa em função da densidade e do quadrado da velocidade de detonação desse explosivo. É medida através da passagem da onda quando se propaga através da coluna de explosivo. Embora a pressão de detonação deste dependa da densidade e da velocidade de detonação, o diâmetro, o grau de confinamento e o tamanho dos grãos dos ingredientes que compõem o explosivo influenciarão diretamente na velocidade de detonação Jimeno et al. (2003)

As pressões podem ser calculadas usando a seguinte equação:

$$PF = \rho \frac{VOD^2}{4} \times 10^{-6} \quad (2)$$

sendo:

PF = pressão produzida no furo, quando o explosivo está completamente acoplado ao furo (GPa);

ρ = densidade do explosivo (g/cm³);

VOD = velocidade de detonação de um explosivo confinado (m/s).

De acordo com Silva, 2006, uma das formas de se verificar o desempenho de um explosivo é comparar a pressão produzida no furo com a resistência dinâmica do maciço rochoso. Caso a pressão produzida no furo durante a detonação não supere a resistência dinâmica da rocha, esta não será fragmentada, fazendo com que a energia não utilizada no processo de fragmentação e deslocamento da rocha, propague-se no terreno sob a forma de vibração.

2.3.5 - Estabilidade

Os explosivos devem ser quimicamente estáveis e não podem se decompor em condições ambientais normais. Um dos métodos para verificar a estabilidade é o de Abel, que consiste no aquecimento da amostra durante um tempo determinado a uma temperatura específica, observando-se a decomposição dessa amostra. Por exemplo, a nitroglicerina a 80°C decompõe-se em 20 minutos Jimeno et al. (2003)

A estabilidade dos explosivos é uma das propriedades que está relacionada com o tempo máximo de armazenamento das substâncias que o compõem. De acordo com Jimeno et al. (2003), essa propriedade influenciará diretamente no desempenho do desmonte.

2.3.6 - Resistência à água

É a capacidade de um explosivo resistir à uma prolongada exposição à água, sem que comprometa o seu desempenho. Os explosivos, em geral, apresentam dois tipos de resistência à água: resistência interna e resistência externa. A resistência interna é proveniente da própria composição química do explosivo que já possui água na sua formulação e que não sofre nenhuma interferência em meio aquoso. É o caso das emulsões e explosivos à base de água e gel, que podem ser bombeadas para furos com presença de água. Já a resistência externa não é fornecida pela composição do explosivo em si, mas pela embalagem em que o material é colocado, como é o caso do ANFO que apresenta baixa resistência interna à água. Entretanto, quando embalado, o furo é encamisado com material impermeável e poderá ser utilizado em furos contendo água (National Highway Intitute, 1991)

Segundo Jimeno et al. (2003), a resistência do explosivo à água varia de acordo com a proporção de nitroglicerina, ou aditivos especiais, como: gomas, hidrogéis, emulsões que são muito resistentes a água. Os sais oxidantes, como nitrato de amônio e o ANFO, diminuem intensamente as suas resistência, pois são muito higroscópicos. A tabela 2 mostra a resistência à água de alguns explosivos industriais.

Tabela 2- Resistência à água dos principais explosivos.

TIPO	Resistência
Dinamite Granulada	Ruim à boa
Dinamite Gelatina	Boa à excelente
Lama encartuchada	Muito boa
Lama a granel	Muito boa
ANFO	Ruim
ANFO derramando	Ruim
ANFO encartuchado	Muito boa
ANFO pesado	Ruim à boa

Fonte: National Highway Institute, 1991.

2.3.7 - Sensibilidade

A sensibilidade de um explosivo é determinada como a susceptibilidade do explosivo à iniciação, ou seja, se o explosivo é sensível à espoleta, cordel, reforçador etc (Silva,2006).

Jimeno et al.(2003) classificam a sensibilidade de um dado explosivo da seguinte forma: sensibilidade à iniciação, sensibilidade ao choque, sensibilidade à fricção, sensibilidade ao calor e ao diâmetro crítico.

Os explosivos devem ser suficientemente sensíveis para serem detonados por um iniciador adequado. Essa capacidade varia segundo o tipo de produto. Desse modo, para a grande maioria do explosivos gelatinosos, são empregados detonadores; enquanto que, para agentes detonantes, utilizam-se em geral, um cartucho de explosivo ou um reforçador com maior velocidade de detonação Jimeno et al.(2003).

Este ensaio de sensibilidade à iniciação realiza-se através de um prato de chumbo em que se encontra um cartucho de explosivo com dimensões previamente determinadas. Para iniciação do cartucho utiliza-se espoleta com numeração distinta a fim de determinar a energia mínima necessária para iniciação da carga Persson et al. (1996).Com base nesse teste, os estudiosos

classificam os explosivos como sensíveis a espoleta número 8 e explosivos não sensíveis à espoleta número 8.

Certos explosivos podem detonar sob efeito de estímulos como: o choque e fricção. Por questões de segurança, é importante conhecer o grau de sensibilidade, especialmente durante a manipulação e transporte. Jimeno et al.(2003).

O ensaio de resistência é realizado deixando um martelo com massa variando de 0,5 a 10 kg cair sobre uma amostra de massa igual 0,1g que se encontra sobre um prato. A sensibilidade do explosivo é testada variando a massa do martelo e alterando a altura de queda.

Os explosivos, ao serem gradualmente aquecidos a uma dada temperatura, decompõem-se de forma repentina, com desprendimento de gases, ou seja, uma deflagração seguida de uma pequena explosão. A essa temperatura, denomina-se ponto de ignição.

A pólvora varia entre 300° a 350 °C e para os explosivos industriais entre 180 e 230 °C.

As cargas de explosivo com forma cilíndrica têm um diâmetro pelo qual a onda de detonação não se propaga ou se propaga com velocidade muito baixa. A essa dimensão é denominada diâmetro crítico. Os principais fatores que influenciam o diâmetro crítico de um explosivo são: o tamanho das partículas, a reatividade dos seus constituintes, a densidade e o confinamento das mesmas Jimeno et al.(2003). A variação da velocidade de detonação em função do diâmetro da carga do explosivo é expressa pela equação (3):

$$VD = VD_i \times e^{\frac{b}{d^2}}$$

(3)

Onde:

b = Constante relacionada com as propriedades do explosivo

VD_i = Velocidade de detonação ideal

d = diâmetro da carga de explosivo, d > d_{cr}, sendo que d_{cr}, diâmetro crítico da carga de explosivo

A tabela abaixo mostra a faixa de diâmetro crítico para os explosivos relacionados.

Tabela 3: Sensibilidade (diâmetro crítico)

Tipo	Diâmetro Crítico		
	< 1"	1 - 2"	> 2"
Dinamite Granulada	x		
Dinamite Gelatina	x		
Lama encartuchada	x	x	x
Lama a granel		x	x
ANFO	x		
ANFO derramado		x	
ANFO encartuchado		x	x
ANFO pesado			x

Fonte: National Highway Institute, 1991

2.4 - Balanço de oxigênio de um explosivo

A maioria dos ingredientes dos explosivos é composto de oxigênio, nitrogênio, hidrogênio e carbono. Boa parte dos explosivos apresenta uma deficiência de oxigênio, ou seja, não possui oxigênio suficiente para converter cada átomo de carbono e hidrogênio presente na molécula em dióxido de carbono e água Jimeno et al. (2003). Dessa forma, torna-se necessário o balanço de oxigênio. Para misturas explosivas, a liberação de energia é otimizada quando o balanço de oxigênio é zero. Balanço zero de oxigênio é definido como o ponto no qual uma mistura tem suficiente oxigênio para oxidar completamente todos os combustíveis (óleo diesel, casca de arroz, bagaço de cana etc.) presentes na reação (Silva, 2006). O excesso de oxigênio na mistura combina com o nitrogênio presente na reação formando gases, como NO e NO₂; e a deficiência de oxigênio gera CO e todos os gases tóxicos Persson et al. (1996). Os gases gerados, além de serem altamente tóxicos para o ser humano, provocam a redução da temperatura da reação e, conseqüentemente, diminuem o potencial energético e a eficiência do explosivo. Teoricamente, os gases produzidos na detonação a balanço zero de oxigênio são: CO₂, H₂O e N₂; e, na realidade pequenas quantidades de NO, CO, NH₂, CH₄ e outros gases. A tabela 4 apresenta o cálculo referente ao excesso ou deficiência de oxigênio dos componentes da mistura explosiva. Como exemplo, a mistura ideal do nitrato de amônio (N₂H₄O₃) com o óleo diesel (CH₂):



Tabela 4: Cálculo da necessidade ou deficiência de oxigênio para balancear a equação

Composto	Fórmula	Produtos desejados na reação	Necessidade (-) ou excesso (+) de oxigênio
Nitrato de amônio	N ₂ H ₄ O ₃	N ₂ , 2H ₂ O	+3 -2 = +1
Óleo diesel	CH ₂	CO ₂	-2 -1 = -3
Necessidade de oxigênio: -3			

O resultado é uma deficiência de três átomos de oxigênio por unidade de CH₂. Desde que cada molécula do nitrato de amônio apresente excesso de um átomo de oxigênio, três unidades de nitrato de amônio serão necessárias para o balanço de cada unidade de óleo diesel na mistura de AN/FO.

Equilibrando a equação:



Cálculo das percentagens de N₂H₄O₃, CH₂ por massa de mistura de AN/FO:

Usando as massas moleculares da tabela 5, calcula-se a soma das massas moleculares dos produtos a partir das massas atômicas: C = 12; O = 16; H = 1; N = 14.

Tabela 5: Massa molecular dos componentes da mistura

Fórmula	Massa molecular (g)
N ₂ H ₄ O ₃	3 x 80 = 240
CH ₂	14
TOTAL	254

A percentagem do nitrato de amônio na mistura será:

$$(240 : 254) \times 100\% = \mathbf{94,5\%}$$

Desta forma, 240 g de nitrato de amônio reagem com 14 g de carbono quando o balanço é perfeito, quer dizer, o óleo deve representar, em massa:

$$(14 : 254) \times 100\% = \mathbf{5,5\%}$$

2.5 - Nitrato de amônio

O nitrato de amônio (NH_4NO_3) é um sal inorgânico de cor branco cuja temperatura de fusão é 160,6 °C. Isoladamente, não é um explosivo, pois só adquire tal propriedade quando se mistura uma pequena quantidade de combustível.

Embora o nitrato de amônio possa ser encontrado em diversas formas, a sua fabricação concentra-se na produção de partículas esféricas e porosas, uma vez que essa partículas apresenta melhores características para absorver e reter os combustíveis líquidos que são facilmente manipulado sem causar compactação e aderência.

O Nitrato de amônio (NA) foi primeiramente sintetizado em 1659, quando J. R. Glauber combinou ácido nítrico e carbonato de amônio. Durante os séculos XVIII e XIX, foi utilizado como medicamento e, finalmente, como fertilizante no início do século XX. O NA tem sido um ingrediente de agentes explosivos desde 1870, quando numerosas patentes mostrando misturas de nitrato de amônio e combustíveis foram registradas (Hopler, 1993). Em 1867, dois cientistas suecos, C. J. Ohlsson e J. H. Norrbín patentearam um explosivo chamado de Ammoniakkrut, o qual consistia de NA misturado a carvão vegetal, serragem, naftaleno, ácido picrítico, nitroglicerina (NG) ou nitrobenzeno. Mais tarde, devido ao alto custo de produção de nitroglicerina para as Dinamites, Alfred Nobel pesquisou diversos candidatos a substituto dessa substância, quando então comprou a patente do uso de nitrato de amônio (cristalino) como explosivo em 1870, e o utilizou como substituto de parte da NG da Dinamite (Davis, 1943).

2.6 - ANFO

ANFO é uma abreviatura que representa mistura entre o nitrato de amônio (“ammonium nitrate”) e óleo combustível (“fuel oil”). Para o preparo do ANFO, é necessário 5,5% em massa de combustível e 94,5% de nitrato de amônio no formato de grão ou (*prill*) do tipo agrícola industrial. Esta proporção assegura o balanço de oxigênio da reação e libera uma quantidade de calor 0,93 kcal/g. Um agente explosivo é definido como qualquer material ou mistura constituída de combustível e oxidante, empregado em desmonte cujos ingredientes não são classificados como explosivos e que podem ser misturados e empacotados para uso ou transporte sem serem detonado por uma espoleta do tipo 8 em ambiente não confinado Dick et al (2005). No entanto, antes de se tornar importante agente explosivo, alguns acidentes chamaram a atenção da opinião pública mundial. Dentre eles, uma explosão que ocorreu na fábrica da BASF em Oppau na Alemanha, em 1921. A detonação da carga ocorreu quando funcionários da empresa tentaram, com emprego de bananas de dinamite, desagregar blocos de nitrato de amônio cristalizados que haviam bloqueado a passagem de um silo. Com a detonação da carga explosiva, a energia liberada foi suficiente para inciar 9000 t da NA estocado, o que destruiu 75% dos prédios em torno da empresa e matou quinhentos e sessenta e uma pessoas. Um outro acidente de grande repercussão internacional ocorreu em 16 de abril de 1947, na cidade de Texas City, Texas, USA, quando o navio Grandcamp carregado com NA recoberto com parafina explodiu após o incêndio a bordo. Uma planta de poliestireno da empresa Monsanto, que se localizava ao lado do porto, foi atingida por fragmentos da explosão, o que provocou o rompimento dos dutos de benzeno e propano. Algumas horas, após a primeira explosão, uma segunda ocorreu em outro navio próximo, o Harvey Keene. A cidade foi parcialmente destruída e, aproximadamente, 600 pessoas perderam a vida (Worsey, 1997; Monsanto, 2002).

2.7 - Acessórios de transmissão de energia

De acordo com (Silva, 2006), os explosivos industriais apresentam certo grau de estabilidade química que os tornam perfeitamente manuseáveis, dentro de condições normais de segurança. Para desencadear a reação, faz-se necessário comunicar ao explosivo uma quantidade inicial de energia de ativação, suficientemente capaz de promover reações internas para sua transformação em gases. Essa energia inicial é comunicada sob a forma de choques moleculares oriundos, principalmente, de calor, chispas, atrito e impacto. Dessa forma, os acessórios de detonação são destinados a provocar esses fenômenos iniciais de forma segura.

2.7.1 - Estopim de segurança

Esse tipo de acessório foi desenvolvido para mineração por William Bickford, na Inglaterra, no ano de 1831. É constituído de um núcleo de pólvora negra envolvida por matérias têxteis, bem como são revestidos por um tipo de plástico resistente, visando a sua proteção e impermeabilização. Conduz chama com segurança em um tempo de queima constante, 140s (± 10 s) por metro, para iniciação de cargas de pólvora ou detonação de espoleta simples.

O manuseio do estopim não oferece riscos, porém devem-se evitar dobras e torções que venham produzir danos (Reis,1997). É encontrado no mercado com diâmetro aproximado de 5 mm, razão linear de carga 5,5 g/m, massa total de 21 g/m, comprimento mínimo da chispa 50 mm, resistente ou não na presença de água. São fornecidos enrolados em carretéis, possibilitando ao usuário um corte no mesmo de acordo com a metragem desejada. A velocidade de queima do estopim pode ser influenciada por fatores ambientais, como: o tipo de clima, umidade local, altitude e condições de armazenagem. A figura 5 mostra uma representação esquemática de um estopim de segurança

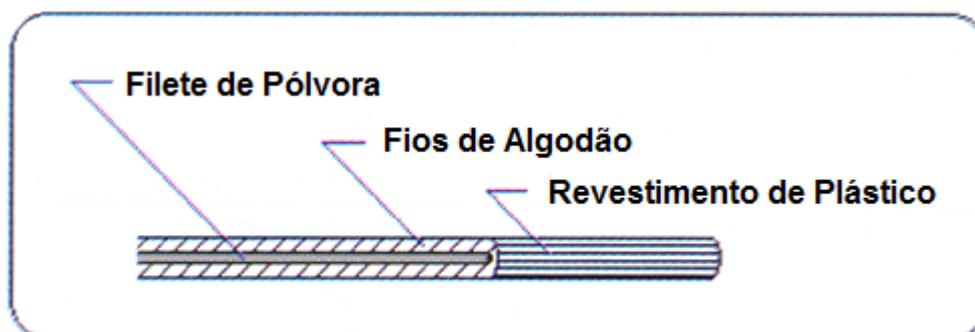


Figura 4: Estopim de segurança

Fonte: Catálogo da Explo

2.7.2 - Espoleta Simples

A primeira espoleta simples foi patenteada em 1865 por Alfred Nobel. O precursor dos detonadores disponíveis no mercado era constituído por uma cápsula de cobre com uma de suas extremidades fechada e preenchida por uma pequena quantidade de explosivo primário, fulminato de mercúrio ($\text{HgC}_2\text{N}_2\text{O}_2$), escorvado por um pedaço de stopim, almagamado na extremidade aberta (Person et al, 1996). Passou a ser fabricada em escala industrial, dando origem aos novos detonadores. Atualmente, as espoletas simples constam de um tubo de alumínio ou cobre, com uma extremidade aberta e outra fechada, contendo em seu interior uma carga detonante constituída por carga primária, ou de ignição, cujo explosivo é a azida de chumbo $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ e uma carga básica de PETN-Tetranitrato de pentaeritritol ($\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_6$), figura 5. A utilização dessas duas cargas reside no fato de que a azida de chumbo é um explosivo fulminante que se inicia à custa de uma fagulha provocando a detonação da carga de PETN. No mercado, os tipos mais comuns são classificadas como nº 6, cuja massa é composta por 0,325 g de PETN e 0,3 g de misto iniciador e nº 8, composta por uma massa de 0,5 g de PETN e 0,3 g de misto iniciador (Silva, 2006)

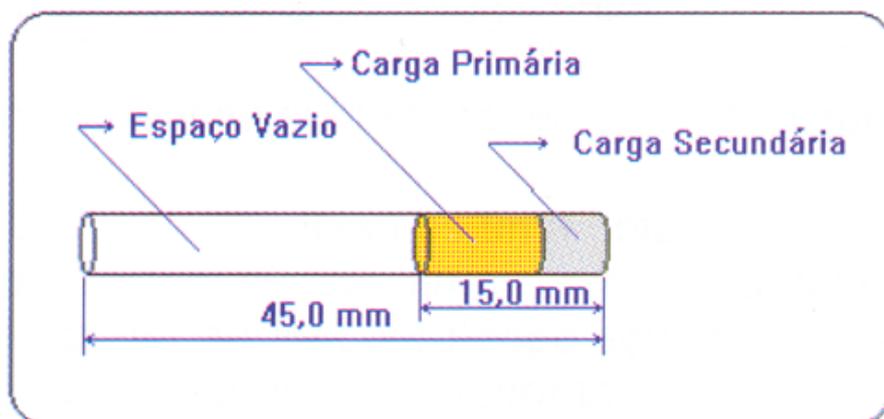


Figura 5: Espoleta simples

Fonte: Catálogo da Explo

2.7.3 - Espoleta elétrica

As exigências de mercado com relação à necessidade de um acessório, que oferecesse um maior controle da detonação, levaram H. Julius Smith a inventar o detonador elétrico, em 1876. A grande idéia que esse cientista teve foi a de utilizar a lâmpada e a espoleta simples para criar a espoleta elétrica. Essa novidade, que poderia ser chamada de um cruzamento entre os dois acessórios, tinha como princípio de funcionamento uma fonte de energia elétrica que criava um aquecimento por efeito *joule*, em uma ponte de fio altamente resistente e incandescente, capaz desencadear a detonação da carga explosiva de ignição da cápsula, formada por uma pequena substância pirotécnica, com o formato de uma cabeça de fósforo (Hemphill, 1981)

A espoleta elétrica instantânea, figura 6, foi um avanço para segurança dos sistemas de iniciação, quando comparados ao estopim. No entanto, inicialmente seu uso, ficou restrito apenas a uma fila. Os primeiros esforços para utilização em vários furos gerou grande vibrações e ultra-lançamentos de rocha, devido à iniciação simultânea das cargas. Evidentemente, o problema poderia ser resolvido retardando o tempo para cada espoleta. A inserção de uma carga pirotécnica de retardo de queima lenta, entre a cabeça do fósforo e a carga secundária, retardaria o tempo entre o pulso da corrente elétrica e a iniciação da detonação. A elaboração de cargas pirotécnicas de diferentes comprimentos resultaria em tempo de retardos diferentes, uma vez que a queima dessas cargas processa-se de forma linear. Com isso, foi possível a fabricação de espoletas elétricas de retardos com curto tempo de retardos da ordem de frações de segundos. O uso da nova espoleta tornou-se uma importante ferramenta nas operações de desmonte de rocha para controle de fragmentação e seus efeitos (Persson et al 1996).



Figura 6: Espoleta elétrica instantânea

Fonte: Catálogo da Órica

2.7.4 - Cordel detonante

O cordel detonante é um poderoso acessório de iniciação. Desenvolvido na década de 50, tinha como propósito substituir a espoleta elétrica de retardo. Possui um núcleo central formado pelo explosivo PETN $C_5H_8(NO_3)_4$ (tetrinitrato de pentaeritritol), envolvido por fios de algodão que oferecem melhor confinamento e resistência mecânica. Seu núcleo é revestido por um plástico resistente à prova de água e atrito. É iniciado por uma espoleta simples ou elétrica, sendo que a última deve ser evitada em desmonte em céu aberto sob a presença de temporais com raios, a fim de evitar uma detonação prematura. A velocidade de detonação do cordel é aproximadamente 7000 m/s, capaz de desencadear a detonação da dinamite ou do reforçador. Também é responsável pela iniciação dos agentes de detonação de baixa sensibilidade, por exemplo, o ANFO (Persson et al 1996).

O cordel apresenta muitas vantagens quando comparado à espoleta elétrica. Não detona sob a presença de corrente elétrica parasita; inicia um grande número de furos simultaneamente; não exige que a mão de obra seja especializada; pode ser armazenado por um período de tempo superior a 10 anos, mesmo sob variação de temperatura; não detona quando submetido a temperatura inferior a 80 °C, ou por choques naturais. No entanto, mesmo apresentando essa série de vantagens, não significa que deva ser usado sem

as devidas precauções (Reis,1997). Atualmente, os tipos de cordéis mais comuns no mercado são os gramatura de 3 g/m, 5 g/m e de 10 g/m de PETN. O cordel detonante, figura 7, foi o principal responsável pela substituição da espoleta elétrica do mercado. Entretanto, ultimamente, esse produto vem sendo substituído, cada vez mais, pelo sistema não elétrico de iniciação, a exemplo do Nonel (Persson *et al* 1996)



Figura 7: Cordel detonante

Fonte: Catálogo Britanite

2.7.5 - Sistema não elétrico de iniciação com linha silenciosa

O sistema não elétrico de iniciação, figura 8, foi desenvolvido por P. A. Person, nos laboratórios da Empresa Nitro Nobel, na Suécia, entre 1967 e 1968. Consiste basicamente de uma espoleta comum, não elétrica, conectada a um tubo de plástico transparente, altamente resistente, com diâmetro externo de 3,0 mm e interno de 1,5 mm. Caracteriza-se basicamente, por ser revestido internamente, por uma película explosiva de tipo PETN cuja carga pulverizada é menor que 20 mg/m de tubo, que, ao ser iniciado, reage quimicamente ao suporte de uma onda de choque no ar, causada pelo calor e expansão dos gases dentro do tubo, a uma velocidade aproximada de 2000 m/s. Isso desencadeia o processo final de detonação. Entretanto, a reduzida

carga explosiva, geradora da onda de choque que se desloca através do tubo, não chega a afetar o lado externo do mesmo, mantendo-o intacto. (Persson et al, 1996). O sistema oferece inúmeras vantagens quando comparado a outros acessórios. Entre essas vantagens, o seu baixo custo; o barulho causado pelo cordel é, em grande parte, eliminado; é insensível a correntes elétricas parasitas; é de fácil checagem do sistema, geralmente visual; não destrói parte da coluna de explosivo dentro do furo; diferentemente do cordel, seu tubo não detona nenhum tipo de explosivo comercial, e permite a iniciação pontual. Entre as possíveis desvantagens citam-se a possibilidade de corte do tubo, no momento em que for feito o tamponamento do furo; a baixa velocidade de detonação do tubo, quando comparado ao do cordel, exige cuidados no momento de ser conectado á linha tronco, para que os tubos de choque formem um ângulo reto, evitando, assim, que sejam cortados pelo cordel, e ocasionem a falha, haverá interrupção na detonação da coluna de explosivo, caso ocorra *gap* da mesma.



Figura 8: Sistema não elétrico de iniciação com linha silenciosa

Fonte: Catálogo Britanite

2.7.6 - Reforçador (booster)

Para planos de fogo constituído de furos de grandes diâmetros, é necessário utilizar uma carga explosiva especial, denominada reforçador, para iniciação de explosivos insensíveis e agentes detonantes como ANFO, lamas e emulsões. Por outro lado, o reforçador deve possuir uma sensibilidade suficiente para ser iniciado por uma espoleta ou cordel detonante e uma carga capaz de iniciar o explosivo insensível. Para a escolha de um reforçador, é necessário levar em consideração o diâmetro do furo, o explosivo a ser iniciado e o grau de confinamento (Persson *et al* 1996). A figura 9 mostra um reforçador (booster) de 250 g.



Figura 9: Reforçador (booster)

Fonte: Catálogo MAXAM

2.8 - Combustíveis

O bagaço de cana, casca de arroz, sabugo de milho, resíduo de pneu e biodiesel são materiais combustíveis, ou seja, materiais que são capazes de reagir com um comburente, em geral, o oxigênio, numa reação de combustão. No entanto, em uma reação de detonação, qual seria a importância desses combustíveis na mistura explosiva?

De acordo com Silva (2006), esses materiais combinam com excesso de oxigênio da mistura explosiva e previnem a formação de NO e NO₂, além de tóxicos, reduzem a temperatura da reação “ladões de calor”. Por outro lado, o agente oxidante da mistura explosiva (nitrato de amônio, nitrato de cálcio, nitrato de potássio, nitrato de sódio, etc) assegura a oxidação do carbono, prevenindo a formação do CO. Segundo Dick *et al*, para misturas explosivas, a energia liberada é otimizada para balanço de oxigênio igual a zero. A fim de determinar a reação de detonação, julga se necessário conhecer previamente a composição química destes combustíveis.

2.8.1 - Bagaço de cana

2.8.1.1 - Produção e Geração de Resíduos

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo (UNICA,2006) e o país com maior potencial de expansão em área plantada. Segundo o levantamento oficial pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) da safra nacional 2007/2008, o país produziu cerca de 475,07 milhões de toneladas em uma área cultivável de aproximadamente 6,96 milhões de hectares. O aumento das áreas plantadas no Brasil e no mundo faz com que se eleve a quantidade de subprodutos e resíduos da agroindústria. O bagaço ocupa lugar de destaque nos resíduos produzidos, quando há processamento e industrialização da cana-de-acúcar. Em média, 280 kg de bagaço de cana-de-açúcar, que contém 50% de umidade, são produzidos por tonelada de cana-de-açúcar, o que equivale a 2,1 gigajoules de energia por tonelada; 90% é queimado para produzir vapor que, por sua vez, pode ser utilizado para co-

gerar eletricidade e potência mecânica para os motores da usina, o que gera um grande impacto ambiental.

Estima-se que, além da quantidade de bagaço processado e utilizado para abastecer as caldeiras, haja um excedente de bagaço de cana-de-açúcar correspondente a 8% nas destilarias anexas e 12% nas autônomas, que poderia ter outros destinos, inclusive ser empregado de forma a melhorar a qualidade do meio ambiente. (Goldemberg, 2000).

2.8.1.2 - Composição química do Bagaço da Cana-de-açúcar

O bagaço de cana é o resíduo obtido após a moagem da cana de açúcar. Após a sua passagem em um terno de moendas para retirada do caldo, apresenta-se como material fibroso representando aproximadamente 30% da massa da cana e umidade em torno de 50% Silva *et al* (2007). Constitui-se por três frações distintas, celulose, hemicelulose, e lignina; e varia de acordo com diversos fatores, dentre eles, o tipo de cana, o tipo de solo, as técnicas de colheita e até o manuseio. A tabela 6 apresenta a composição química elementar média proveniente de várias regiões do mundo.

Tabela 6 – Composição química em massa do bagaço de cana

Composição Química Elementar Média	
Carbono	39,7 - 49%
Oxigênio	40 -46%
Hidrogênio	5,5 -7,4%
Nitrogênio e cinzas	0 -0,3%

Fonte: Adaptada e modificada de Silva *et al* (2007).

2.8.2 - Casca de arroz

2.8.2.1 - Produção e Geração de Resíduos

Desde a antiguidade, o arroz tem sido o principal cereal utilizado na alimentação humana. Em torno de 90% de todo o arroz produzido é consumido no continente asiático. Atualmente, a China contribui aproximadamente com 37% da produção mundial; a Índia com 20%; e América Latina, 3,5% Ribeiro et al.(2008)

No Brasil, existem duas linhas de produção de arroz; Sequeiro, utilizado em Goiás, Mato Grosso do Sul e São Paulo, estados que detêm 70% da área de produção; e Irrigado, presente no Estado de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, com 30% da área restante. O Estado do Rio Grande do Sul responde por 40% da produção brasileira.

O beneficiamento do arroz consiste na secagem dos grãos, limpeza, descascagem e polimento. Segundo o Instituto Rio Grandense do Arroz, a técnica convencional de beneficiamento de arroz gera para cada 100 kg de arroz, 68 kg de grãos (50 kg de grãos intactos e 18 kg de grãos quebrados), 10 kg de pó de arroz e 22 kg de casca de arroz.

Ponderando que, para cada tonelada de arroz, existe uma tonelada de palha e 220 kg de casca, anualmente considerando a produção de 2007, foram gerados 19,9 milhões de toneladas de palha de arroz e 2,4 milhões de casca no Brasil.

2.8.2.2 - Composição química da Casca de arroz

A tabela 7 mostra análise elementar de uma amostra de casca de arroz *in natura* para fabricação de briquetes de uso em alto forno

Tabela 7– Composição química média da casca de arroz

Casca de arroz	Elemento (% em massa)					
	H	C	N	O	S	Cinzas
In natura	4,29	32,37	Nd	43,28	nd	20,06
Dados da literatura * para amostra em <i>in natura</i>	4,3	40,96	Nd	35,98	0.02	18,34

nd: Não determinado pelo equipamento (<0.002% em peso)

Fonte: Souza *et al*(Apud Souza, et al, 2005; [*] Fonte: Cortez e Lora (1997))

2.8.3 - Sabugo de milho

2.8.3.1 - Produção e Geração de Resíduo

O aproveitamento de resíduos agrícolas e agroindustriais constitui um importante passo para reduzir o desperdício e contribuir para a economia de uma nação.

De um modo geral, qualquer tipo de vegetação produz o seu próprio resíduo, o qual é quase sempre, sub-utilizado. O milho, por exemplo, é um importante nutritivo alimento, consistindo em um dos cereais mais produzidos e consumidos no mundo inteiro, seja para alimentação humana, seja para alimentação animal. De acordo com a CONAB, o Brasil figura entre os maiores produtores de milho do planeta, com uma produção recorde na safra 2007/08 de 58,7 milhões de toneladas.

O milho é produzido, principalmente, para alimentação; e o grão proporciona uma serie de produtos industrializados. No entanto, algumas partes da planta não possuem um uso direto, e, nesse caso, são subutilizadas. O sabugo, por exemplo, parte central da espiga, na qual os grãos estão presos, é o resíduo gerado após ser debulhado o milho. Para cada 100 kg de espigas de milho, aproximadamente 18 kg (70% base úmida), são formados pelo sabugo. Ziglo *et al*(2007) (apud FOLEY e VANDER HOOVEN, 1981)

2.8.3.2 - Composição química do Sabugo de milho

Tabela 8: Composição química média do sabugo de milho

	Elemento (% em peso)			
	C	H	N	O
Sabugo de milho	47,6	5,0	0,0	44,6

Fonte: Rocha, 2002

2.8.4 - Resíduo de pneu

2.8.4.1 - Produção e Geração de resíduo

Há mais de um século, a humanidade tem desfrutado de um útil e necessário invento que proporciona desempenho, economia e conforto à rodagem de veículos terrestres automotores e outros. O pneumático, simplifadamente denominado de pneu, é um tubo de borracha cheio de ar, ajustado ao aro da roda do veículo, permitindo a tração deste e, ao mesmo tempo, absorvendo os choques com o solo sobre o qual o veículo trafega (Andrieta, 2002). O norte-americano Charles Goodyear foi quem produziu a borracha vulcanizada, misturando-a com enxofre e, em seguida, aquecendo o material no fogo. Desta forma, esse material que compõe o pneu foi descoberto Assis et al.(2006)

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a indústria brasileira de pneus produziu, em 2009, o total de 61,3 milhões de unidades, sendo descartados desse total, anualmente, cerca de 50 milhões.

No entanto, à medida que aumenta o consumo de pneus, surgem problemas relacionados com o meio ambiente, uma vez que leva um longo tempo após sua vida útil a ser decomposto. Deve-se mencionar ainda que, quando isso ocorre, as substâncias tóxicas são liberadas, o que degrada o meio ambiente.

2.8.4.2 - composição química do pneu

Um pneu é construído, basicamente, por uma mistura de borracha natural e de elastômeros (polímeros com propriedades físicas semelhantes às da borracha natural), também chamados de "borrachas sintéticas". A adição de negro de fumo, um pó escuro, produzido pela fuligem ou pela combustão de certas substâncias, como o marfim, resíduos do alcatrão e outras resinas que compõem a graxa, confere à borracha propriedades de resistência mecânica à ação dos raios ultra-violeta, durabilidade e desempenho. A mistura é espalmada num molde e, para a vulcanização - feita a uma temperatura de 120-160°C - utilizam-se o enxofre, compostos de zinco como aceleradores e outros compostos ativadores e anti-oxidantes. Um fio de aço é embutido no talão, que se ajusta ao aro da roda e, nos pneus de automóveis do tipo radial (Figura 10), uma manta de tecido de nylon reforça a carcaça. Assim a mistura de borracha/elastômeros é espalmada, com uma malha de arame de aço entrelaçada nas camadas superiores. A tabela 9 mostra a composição química média de um pneu.

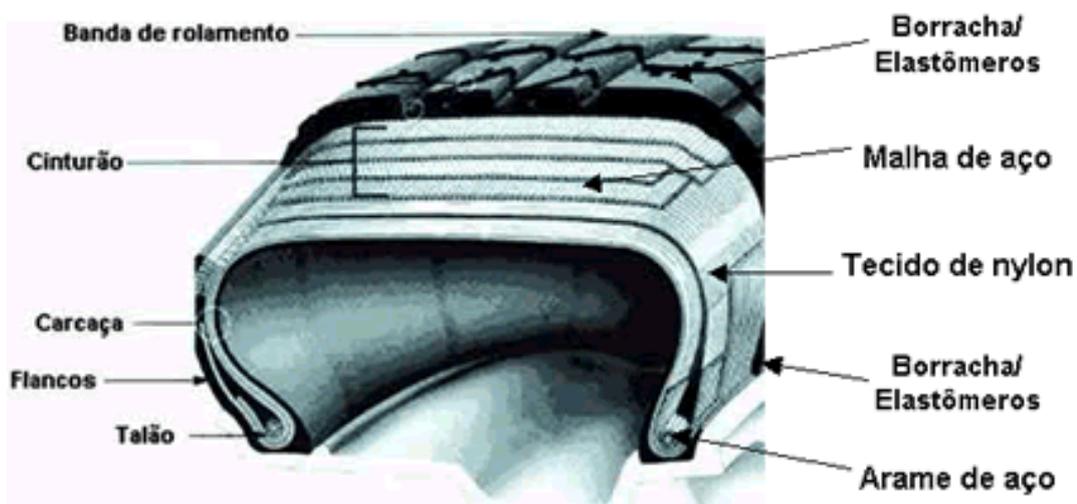


Figura 10: Corte de um pneu radial de automóvel

Tabela 9: Composição química média de um pneu

Elemento/composto	(% em masa)
Carbono	70,0
Hidrogênio	7,0
Óxido de Zinco	1,2
Enxofre	1,3
Ferro	15,0
Outros	5,5

Fonte: Andrieta, 2002

2.8.5 - Biodiesel

Biodiesel é um combustível biodegradável derivado de fontes renováveis, que pode ser obtido por diferentes processos tais como o craqueamento, a esterificação ou pela transesterificação. Pode ser produzido a partir de gorduras animais ou de óleos vegetais, existindo dezenas de espécies vegetais no Brasil que podem ser utilizadas, tais como mamona, dendê, girassol, babaçu, amendoim, pinhão manso e soja, dentre outras. O biodiesel substitui total ou parcialmente o óleo diesel de petróleo em motores ciclodiesel automotivos (de caminhões, tratores, camionetas, automóveis etc) ou estacionários (geradores de eletricidade, calor etc). Pode ser utilizado na forma pura ou misturado ao diesel em diversas proporções. A mistura de 2% de biodiesel ao diesel de petróleo é chamada de B2 e assim sucessivamente, até o biodiesel puro, denominado B100.

Como combustível o biodiesel possui algumas características que representam vantagem sobre os combustíveis derivados do petróleo, tais como, virtualmente livre de enxofre de compostos aromáticos, alto número de cetano; teor médio de oxigênio, maior ponto de fulgor, menor emissão de partículas, HC, CO e CO₂; caráter não tóxico e biodegradável, além de ser proveniente de fontes renováveis Ferrari et al.(2004)

De acordo Hameed e Chin (2008), o processo mais utilizado atualmente para a produção de biodiesel é denominado transesterificação, figura 11. Consiste numa reação química dos óleos vegetais ou gorduras animais (triglicerídios) com o álcool comum (etanol) ou o metanol, estimulada por um catalisador (hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio), obtendo-se como produto o biodiesel (éster metil) e glicerina conforme a reação abaixo:

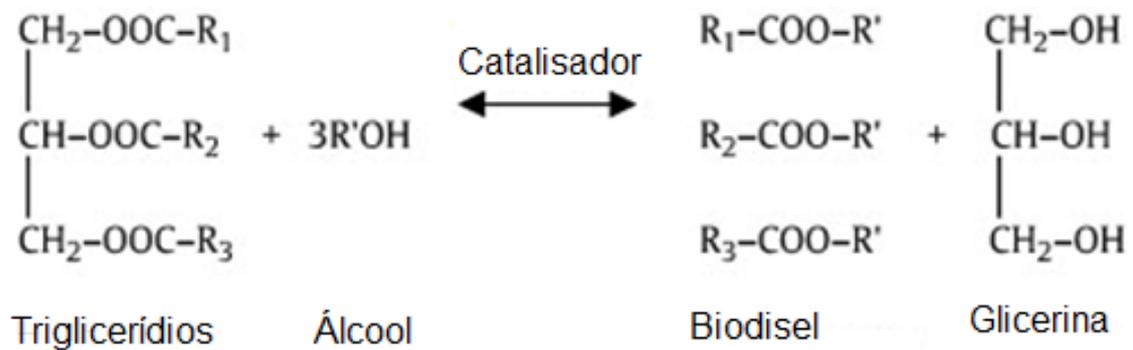


Figura 11: Reação de transesterificação

Fonte: adaptado Hameed e Chin (2008)

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

3.1 - Amostragem

Para retirada da amostra primária, realizou-se uma amostragem aleatória, ou seja, os incrementos foram escolhidos de forma fortuita, em campo, fazendo, dessa maneira, com que todas as partes tenham a mesma possibilidade de serem selecionadas. Com objetivo de diminuir a granulometria e aumentar a superfície específica, as amostras de sabugo de milho e bagaço de cana foram trituradas, respectivamente, em um desintegrador de milho (moinho de martelos) e em uma siladeira, equipamentos empregados no preparo de rações para gado em propriedades rurais. A amostra de resíduo de pneu foi adquirida através de uma empresa que atua no ramo de recapagem de pneus. Os resíduos de pneus gerados são provenientes da raspagem da banda de rolamento do pneu (Figura 10)

Todos os incrementos (Figura 12) foram submetidos à técnica de homogeneização e quarteamento para obtenção de uma alíquota suficiente para análise elementar.



Figura 12: Incrementos dos combustíveis que serão utilizados para compor amostra.

3.2 - Preparação de amostras

Partindo-se de uma amostra primária de massa igual a 2 kg para cada composto, realizou-se a secagem em estufa de cada composto com objetivo de reduzir a umidade. A homogeneização dos mesmos foi realizada na lona; e, para o quarteamento, utilizou-se o método da pilha cônica e o quarteador Jones (figura 13)



Figura 13: Quarteamento pelo método da pilha cônica, casca de arroz

3.2.1 - Quarteador Jones

Equipamento constituído por uma série de calhas inclinadas, ora para um lado, ora para outro. Quanto maior o número de calhas mais confiáveis são as amostras obtidas. As calhas devem ser de aço inoxidável, com inclinação $> 45^\circ$ e não devem possuir ângulos vivos. O número de calhas deve ser par e todas devem ter largura maior que $2d+5\text{mm}$ (d = diâmetro da maior partícula).

O operador deve colocar a amostra sobre o quarteador de maneira lenta e contínua, evitando, assim, a obstrução das calhas e a emissão de partículas. Para tal operação, pode ser utilizado uma pá cuja largura tenha a mesma

dimensão da seção longitudinal do quarteador. É necessário que as amostras a serem quarteadas estejam praticamente secas. Para obtenção de amostras de menor massa, deve-se repetir a operação, retornando-se a uma das amostras na alimentação do quarteador (figura 14)



Figura 14: Quarteador Jones.

O quarteamento foi executado até que se atingisse uma alíquota de 5 gramas. As alíquotas foram encaminhadas para o laboratório químico da Universidade de Viçosa, para realização de uma análise elementar quantitativa e qualitativa capaz de determinar os percentuais de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio presente na amostra.

3.2.2 - Amostra de biocombustível

Uma amostra de 4 litros de biodiesel, composta por 96% de óleo diesel e 4% de biocombustível em massa, foi coletada de forma aleatória na bomba de postos de abastecimento. A amostra foi colocada em um becker e agitada. Uma alíquota de 5 ml foi retirada e encaminhada para análise elementar, figura 15.



Figura 15: amostra de biodiesel

3.3 - Análise elementar

A análise elementar dos combustíveis tem como objetivo determinar a composição química dos mesmos para elaboração de uma fórmula mínima, o que possibilita estabelecer uma reação entre o combustível e o agente oxidante (nitrato de amônio). A análise foi realizada utilizando-se o analisador elementar da Perkin Elmer do Departamento de solos da Universidade Federal de Viçosa.

A tabela 10 apresenta o resultado da análise elementar dos combustíveis selecionados.

Tabela 10 – Percentual em massa de cada elemento presente nas amostras de combustíveis

Análise Química Elementar				
	% C	% H	% N	%O
Sabugo de milho	42,87	6,2	0,61	50,32
Casca de arroz	34,02	4,73	0,41	60,84
Bagaço de cana	43,28	6	0,94	49,78
Resíduo de pneu	85,38	6,68	0,5	7,44
	85,81	6,78	0,4	7,01
Biocombustível	59,27	8,65	0,21	31,87
	61,62	9,23	0,1	29,05
	61,69	9,47	0,15	28,69

3.4 - Cálculo da fórmula mínima

A fórmula mínima, também chamada de fórmula empírica ou estequiométrica, indica os elementos formadores da substância, bem como a proporção em número de átomos desses elementos, expressa em números inteiros e os menores possíveis (Feltre, 2005)

A partir da análise elementar quantitativa e qualitativa de um determinado combustível, é possível obter a fórmula mínima do mesmo, conforme exemplo a seguir:

Cálculo da fórmula mínima de um composto que apresenta 43,4% de sódio, 11,3% de carbono e 45,3% de oxigênio. A tabela 11 mostra a resolução dos cálculos:

Tabela 11: Cálculo para determinação da fórmula mínima

Dados	Divisão das porcentagens pelas respectivas massas atômicas	Divisão pelo menor dos valores encontrados (0,94)	Fórmula mínima
43,4% de Na	$43,4/23 = 1,88$	$1,88/0,94 = 2$	Na ₂ CO ₃
11,3% de C	$11,3/12 = 0,94$	$0,94/0,94 = 1$	
45,3 % de O	$45,3 /16 = 2,82$	$2,82/ 0,94 = 3$	

Fonte: (Feltre, 1995).

Utilizando-se da mesma metodologia proposta por Feltre(1995), conforme mostrado na tabela 11, calculou-se a fórmula mínima a partir dos percentuais em massa de cada elemento presente nas amostras de combustíveis da tabela 10. A tabela 12 mostra o resultado do cálculo.

Tabela 12: cálculos para determinação da fórmula mínima.

	Percentual em massa dos elementos		Divisão das porcentagens pelas respectivas massas atômicas	Divisão pelo menor dos valores encontrados	Fórmula mínima
Sabugo de milho	% C	42,87	$42,87/12=3,5725$	$3,5725/0,043571428=82$	$C_{82}H_{142}NO_{72}$
	% H	6,20	$6,20/1= 6,20$	$6,20/0,043571428= 142$	
	% N	0,61	$0,61/14=0,04357142$	$0,043571428/0,04357142= 1$	
	% O	50,32	$50,32/16= 3,145$	$3,145/0,043571428=72$	
Casca de arroz	% C	34,0	$34,02/12=2,835$	$2,835/0,029285714=97$	$C_{97}H_{161}NO_{130}$
	% H	4,73	$4,73/1=4,73$	$4,73/0,029285714=161$	
	% N	0,41	$0,41/14=0,029285714$	$0,029285714/0,029285714=1$	
	% O	60,84	$60,84/16=3,8025$	$3,8025/0,029285714=130$	
Bagaço de cana	% C	43,2	$43,2/12=3,6$	$3,6/0,067142857=54$	$C_{54}H_{89}NO_{46}$
	% H	6,00	$6,00/1=6,00$	$6,00/0,067142857=89$	
	% N	0,94	$0,94/14=0,067142857$	$0,067142857/0,067142857=1$	
	% O	49,78	$49,78/16=3,11125$	$3,11125/0,067142857=46$	
Resíduo de pneu	% C	85,595	$85,595/12=7,132916667$	$7,132916667/0,032142857=222$	$C_{222}H_{209}NO_{14}$
	% H	6,73	$6,73/1=6,73$	$6,73/0,032142857=209$	
	% N	0,45	$0,45/14=0,032142857$	$0,032142857/0,032142857=1$	
	% O	7,225	$7,225/16=0,4515625$	$0,4515625/0,032142857=14$	
Biodiesel	% C	60,86	$60,86/12=5,071666667$	$5,071666667/0,01095238=463$	$C_{463}H_{832}NO_{170}$
	% H	9,116666667	$9,116666667/1=9,116666667$	$9,116666667/0,01095238=832$	
	% N	0,153333333	$0,153333333/14=0,01095238$	$0,01095238/0,01095238=1$	
	% O	29,87	$29,87/16=1,866875$	$1,866875/0,01095238= 170$	

3.5 - Determinação da reação química e balanceamento de oxigênio

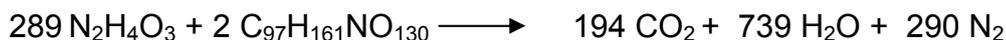
Conhecendo-se a reação de detonação com seus respectivos reagentes e produtos, torna-se necessário realizar o balanço de oxigênio da reação. De acordo com Dick, et al.(2005), a maioria dos ingredientes explosivos são compostos de elementos como oxigênio, nitrogênio, hidrogênio e carbono. Em adição, elementos metálicos, como o alumínio, podem ser utilizados. Para mistura explosivas, a energia liberada é otimizada para balanço zero de oxigênio. Balanço zero de oxigênio é definido como o ponto em que a mistura possui oxigênio suficiente para oxidar todos os combustíveis, mas que não tenha oxigênio em excesso que possa reagir com o nitrogênio, formando óxidos de nitrogênio; e que não tenha oxigênio em deficiência, formando monóxido de carbono Dick, et al. (2005)

Teoricamente, para um balanço de oxigênio igual a zero, os produtos da reação de detonação são H₂O, CO₂ e N₂. No entanto, pequenas quantidades de NO, CO, NH₂ e CH₄ são geradas.

- **Nitrato de amônio + sabugo de milho (1)**



- **Nitrato de amônio + casca de arroz (2)**



- **Nitrato de amônio + bagaço de cana (3)**



- **Nitrato de amônio + resíduo de pneu (4)**



- **Nitrato de amônio + biodiesel (5)**



3.6 - Cálculo da mistura explosiva- percentual em massa.

A mistura explosiva foi determinada através da proporção em massa entre as massas moleculares do nitrato de amônio e do combustível presente nas reações químicas no item 8.5

Dessa forma, é possível estabelecer a participação em massa do agente oxidante e do combustível em cada mistura.

Tabela - 13: cálculo para determinação da porcentagem em massa de nitrato de amônio e sabugo de milho

Composição	Massa molecular (g)	Percentual em massa (%)
326 N ₂ H ₄ O ₃	326 x 80 = 26080	(26080/30664) x 100 = 85,1
2C ₈₂ H ₁₄₂ NO ₇₂	2 x 2292 = 4584	(4584/30664) x 100 = 14,9
Total	30664	

Tabela 14: cálculo para determinação da porcentagem em massa de nitrato de amônio e casca de arroz

Composição	Massa molecular (g)	Percentual em massa (%)
289 N ₂ H ₄ O ₃	289 x 80 = 23120	(23120/29958) x 100 = 77,2
2 C ₉₇ H ₁₆₁ NO ₁₃₀	2 x 3419 = 6838	(6838/29958) = 22,8
Total	29958	

Tabela 15: cálculo para determinação da porcentagem em massa de nitrato de amônio e bagaço de cana

Composição	Massa molecular (g)	Percentual em massa (%)
213 N ₂ H ₄ O ₃	213 x 80 = 17040	(17040/20014) x 100 = 85,1
2 C ₅₄ H ₈₉ NO ₄₆	2 x 1487 = 2974	(2974/20014) x 100 = 14,9
Total	20014	

Tabela 16: cálculo para determinação da porcentagem em massa de nitrato de amônio e resíduo de pneu

Composição	Massa molecular (g)	Percentual em massa (%)
1069 N ₂ H ₄ O ₃	1069 x 80 = 85520	(85520/91742) x 100 = 93,2
2 C ₂₂₂ H ₂₀₉ NO ₁₄	2 x 3111 = 6222	(6222/91742) x 100 = 6,8
Total	91742	

Tabela 17: cálculo para determinação da porcentagem em massa de nitrato de amônio e biocombustível

Composição	Massa molecular (g)	Percentual em massa (%)
2344 N ₂ H ₄ O ₃	2344 x 80 = 187520	(187520/205764) x 100 = 91,1
2 C ₄₆₃ H ₈₃₂ NO ₁₇₀	2 x 9122 = 18244	(18244/205764) x 100 = 8,9
Total	205764	

3.7 - Cálculo da massa da mistura necessária para cada tubo

A massa da mistura explosiva derramada no interior do tubo foi determinada com base em suas dimensões. A figura 16 mostra as dimensões do tubo de aço utilizado para ensaio de campo.

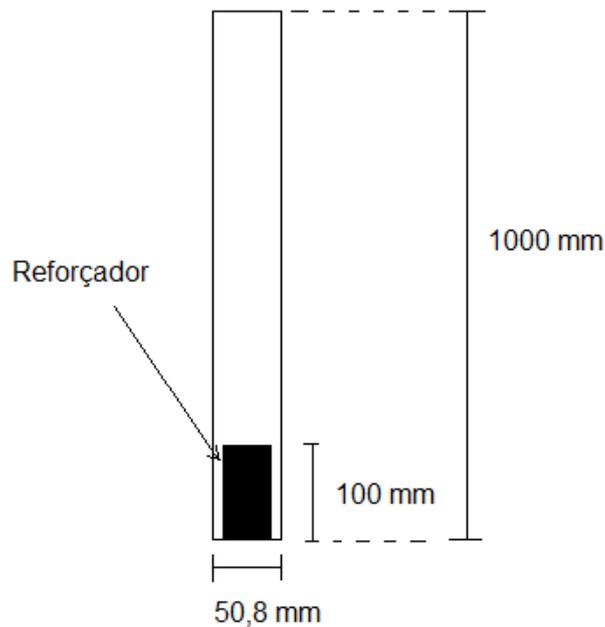


Figura 16: Tubo de aço e reforçador com sua respectiva medidas

O Volume do tubo de aço é calculado através da fórmula $V = \pi r^2 \times h$, em que h é altura do tubo e r , raio do tubo. Subtraindo-se a medida do comprimento do reforçador (booster) da medida do comprimento do tubo, tem-se a altura da carga. Logo o volume de nitrato de amônio é dado por:

$$V = \pi r^2 \times h$$

$$V = \pi(2,54\text{cm})^2 \times 90\text{cm}$$

$$\mathbf{V = 1824,1 \text{ cm}^3}$$

Para o cálculo da massa de nitrato de amônio, adotou-se a densidade do ANFO como estimativa:

Dado $D = M / V$, logo: $M = V \times D$,

$$M = 1824,1 \text{ cm}^3 \times 0,85 \text{ g/cm}^3$$

$$M = \mathbf{1550,5 \text{ g}}$$

Logo, a massa de nitrato de amônio necessária para compor a mistura será de **1550,5 g**

3.7.1 - Cálculo da massa de sabugo de milho

De acordo com as proporções da mistura tabela 13, tem-se:

$$M_m = (1550,5 \times 14,9) / 85,1 = \mathbf{271,5 \text{ g}}$$

3.7.2 - Cálculo da massa de casca de arroz

De acordo com as proporções da mistura tabela 14, tem-se:

$$M_a = (1550,5 \times 22,8) / 77,2 = \mathbf{457,9 \text{ g}}$$

3.7.3 - Cálculo da massa de bagaço de cana

De acordo com as proporções da mistura tabela 15, tem-se:

$$M_c = (1550,5 \times 14,9) / 85,1 = \mathbf{271,5 \text{ g}}$$

3.7.4 - Cálculo da massa de resíduo de pneu

De acordo com as proporções da mistura tabela 16, tem-se:

$$M_p = (1550,5 \times 6,8) / 93,2 = \mathbf{113,1 \text{ g}}$$

3.7.5 - Cálculo da massa de biodiesel

De acordo com as proporções da mistura tabela 17, tem-se:

$$M_b = (1550,5 \times 8,9) / 91,1 = \mathbf{151,5 \text{ g}}$$

3.8 - Equipamento para medição da VOD- Microtrap

O Microtrap, figura 17, é um equipamento desenvolvido pela empresa canadense MREL com objetivo de avaliar o desempenho dos explosivos com base no registro da velocidade de detonação. O método contém um fio de resistência contínua que foi desenvolvido pelo órgão americano, USBM, em 1960. O Princípio de funcionamento baseia-se na lei de Ohm ($U=R \times I$), em que U é a tensão, R , a resistência e I , a corrente. O fio é colocado no interior do furo ou tubo de aço, junto à carga explosiva. No momento da detonação da carga, ocorre uma variação de tensão ao longo do fio de resistência conhecida e essa variação pode ser medida em qualquer ponto do fio sendo registrada no equipamento (MICROTAP). A variação de tensão é proporcional ao comprimento do fio consumido no momento da detonação (National Institute Of Rock Mechanics, 2001). Dessa forma, o equipamento converte a variação de tensão (volts) em deslocamento de onda medida em metros conforme figura 18.



Figura 17: Microtrap

Fonte: Catálogo da MREL

Comprimento máximo de gravação em cada canal deve ser limitado em 30 m.

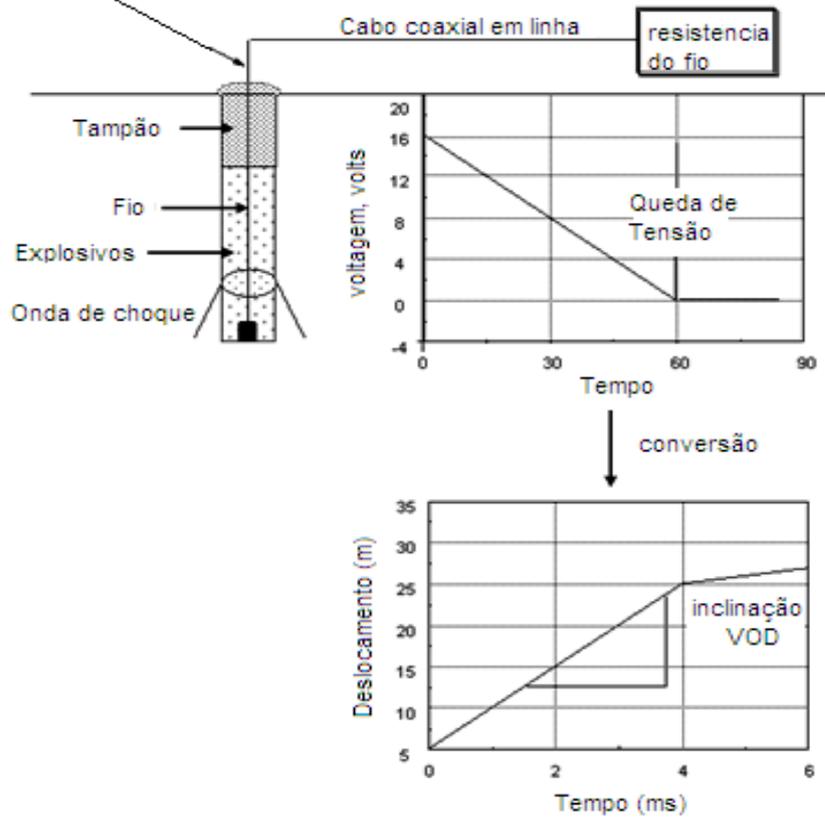


Figura 18: Técnica de medição da VOD, utilizando-se cabo coaxial

Fonte: (National Institute Of Rock Mechanics, 2001, p.14)

3.9 - Ensaio de campo

Para realização dos ensaios de detonação empregou-se tubos de aço schedule 80, cilíndricos de 50.8 mm de diâmetro e 1000 mm de comprimento. As misturas entre os combustíveis e o nitrato de amônio denso foram previamente homogêneas e derramadas no interior do tubo, mantendo-a confinada, figura 19. Inicialmente, utilizou-se uma linha silenciosa, que, posteriormente ao longo dos ensaios, foi substituída pelo cordel detonante conectado a um reforçador (booster) que foi introduzido em uma das extremidades do tubo com objetivo de garantir a iniciação da coluna de explosivo sem que a mistura explosiva deflagrasse. Além disso, empregou-se um cabo coaxial, de resistência conhecida, com uma das suas extremidades em contato a mistura explosiva e a outra, ligada ao equipamento de medição de VOD. Mediante a detonação da carga explosiva, a velocidade com que a onda percorre a coluna explosiva fica registrada no equipamento para medição da VOD (Microtrap). A cada ensaio, as informações contidas no Microtrap foram descarregadas e armazenadas em um computador, antes que se iniciasse o próximo ensaio. A avaliação do desempenho das novas misturas foi realizada tomando como padrão o ANFO elaborado nas instalações da mina do Capitão do Mato- Vale através da comparação com os resultados das novas misturas explosivas. Com objetivo de garantir representatividade desses ensaios executou-se o mesmo procedimento por cinco vezes, totalizando trinta ensaios de detonação.



Figura 19: Carregamento da mistura em tubos de aços Schedule 80

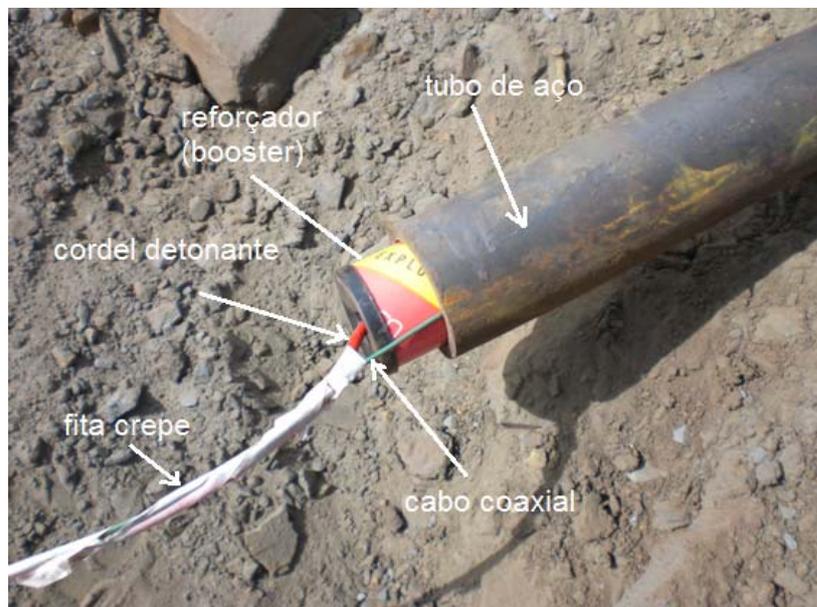


Figura 20: fotografia com os acessórios necessários à realização do ensaio

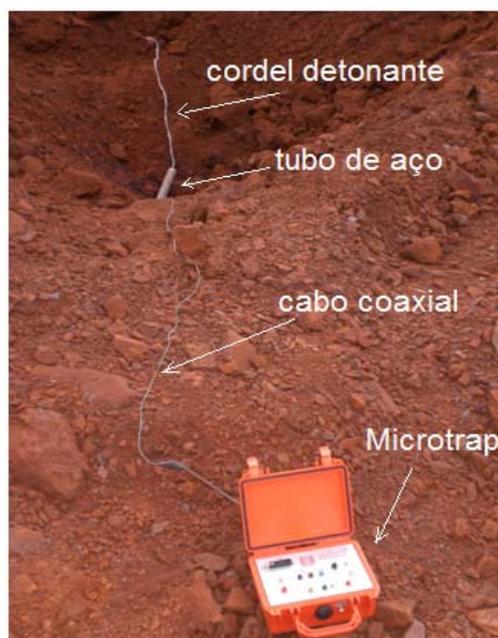


Figura 21: equipamento (Microtrap) preparado para registrar o evento

3.10 - Localização da mina

A Mina de Capitão do Mato, de propriedade da Vale está localizada em Nova Lima, Minas Gerais, denominada Fazenda Rio de Peixe, dista 26 km a sudoeste da Cidade de Belo Horizonte, com acesso feito por um trecho de 8 km em estrada de terra.

CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 - Mistura entre o Nitrato de Amônio e Sabugo de milho

As figuras 22, 23, 24 e 25 mostram o gráfico distância (m) em função do tempo (ms) e o resultado da velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e sabugo de milho na proporção de 85,1% de nitrato de amônio e 14,9% de sabugo de milho. Para realização desses ensaios, foram necessários: quatro conjuntos estopim/espoleta, seis metros de cordel detonante, uma linha silenciosa, quatro reforçadores (booster), cabo coaxial e quatro tubos de aço contendo a mistura explosiva. Foram realizados quatro ensaios mantendo se a proporção citada anteriormente.

Observou-se que, nos quatros ensaios, ocorreram a detonação da mistura e o estilhaçamento dos tubos de aços sem a presença de material residual proveniente da mistura.

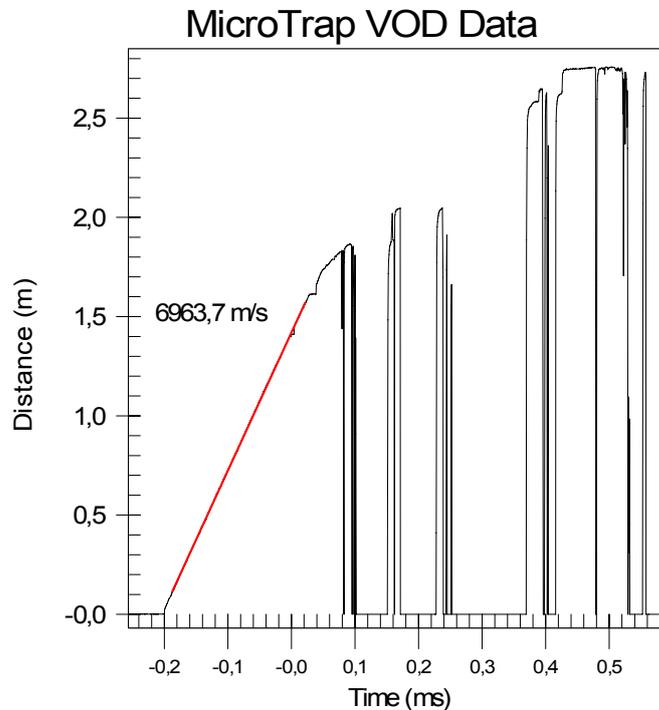


Figura 22: Primeiro ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e sabugo de milho.

A figura 22 mostra o gráfico da velocidade de detonação da mistura entre o nitrato de amônio e o sabugo de milho. A reta inclinada mostra a velocidade de detonação do cordel detonante medida pelo microtrap em torno 6963,7 m/s. Após a detonação do reforçador (booster), verificou-se, através do gráfico, que não houve o registro da velocidade de detonação da mistura explosiva.

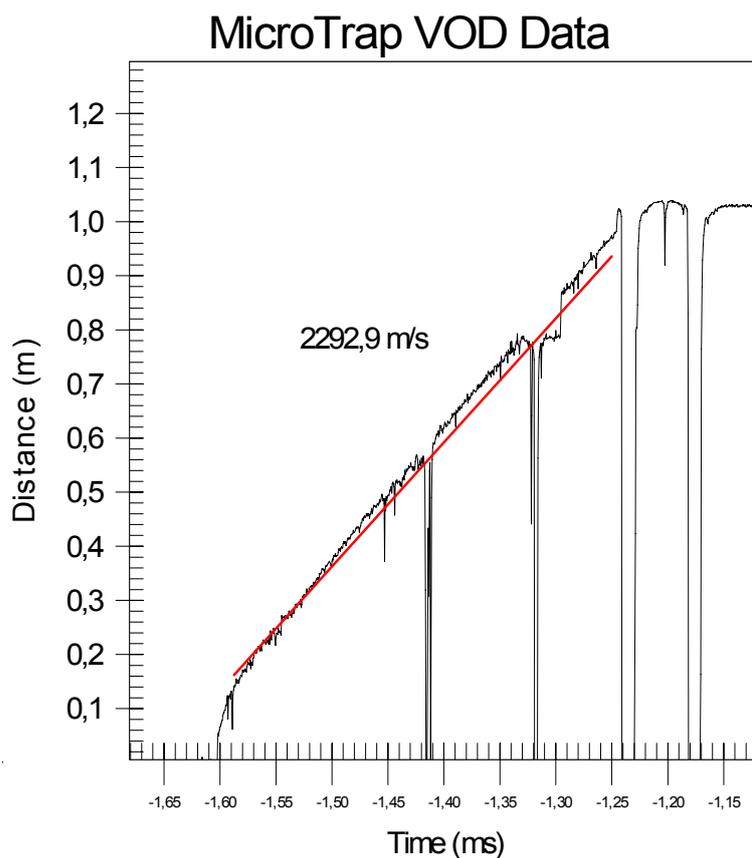


Figura 23: Segundo ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e sabugo de milho

A figura 23 mostra o gráfico da velocidade de detonação da mistura. Nesse caso, ao contrário da figura 22, a iniciação foi realizada utilizando uma linha silenciosa com a espoleta em contato com o reforçador (booster). A velocidade de detonação da mistura apresentou uma média em torno de 2292,9 m/s.

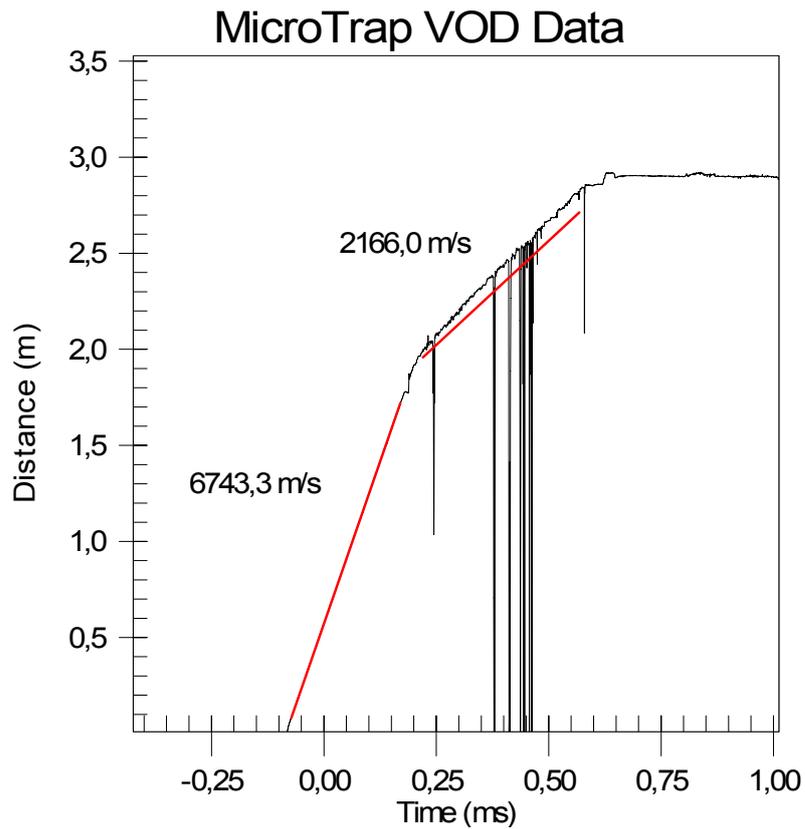


Figura 24: Terceiro ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e sabugo de milho

A figura 24 mostra duas retas com inclinações diferentes, sendo que a primeira refere-se à velocidade de detonação do cordel detonante em torno de 6743,3 m/s; e a outra reta corresponde à velocidade de detonação da mistura em torno de 2166 m/s.

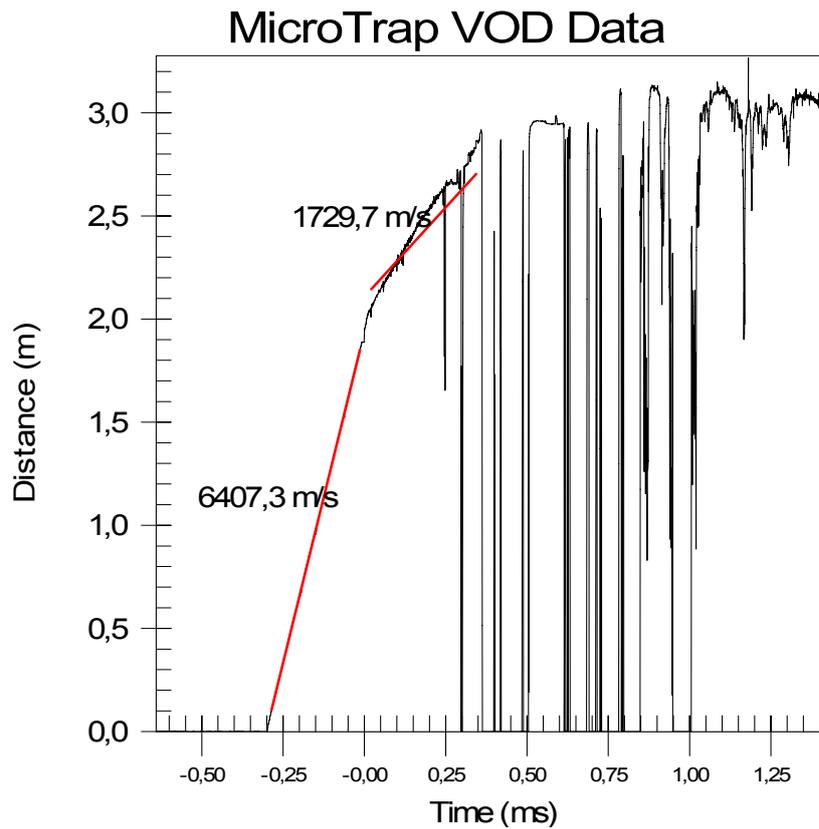


Figura 25: Quarto ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e sabugo de milho

A figura 25 também mostra duas retas com inclinações diferentes, sendo que a primeira refere-se à velocidade de detonação do cordel, em torno de 6407 m/s; e a segunda, à velocidade de detonação da mistura, em torno de 1729,7 m/s.

A figura 26 mostra o gráfico comparativo entre a velocidade de detonação do ANFO medida em campo e o resultado das velocidades de detonação obtidas nos gráficos das figuras 23, 24 e 25.

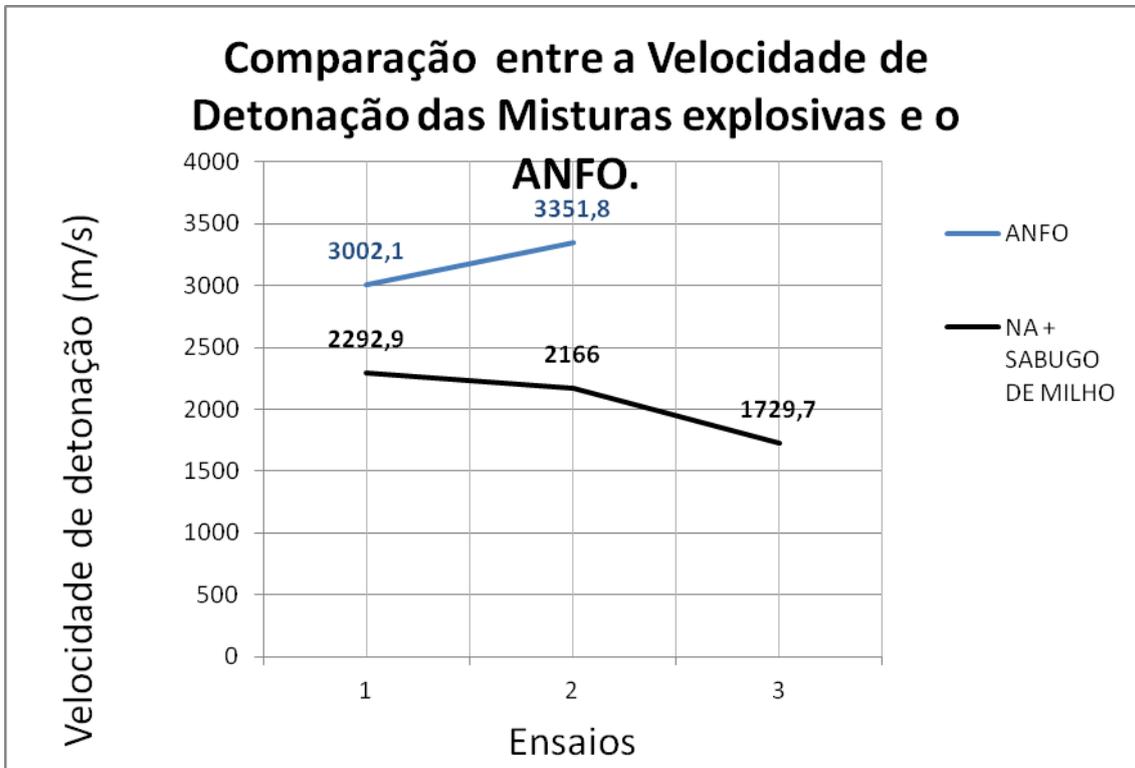


Figura 26: Gráfico comparativo entre a velocidade de detonação do ANFO e a mistura NA + Sabugo de milho

4.2 - Mistura entre o Nitrato de Amônio e Casca de arroz

As figuras 27, 28, 29 e 30 mostram o gráfico distância (m) em função do tempo (ms) e o resultado da velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e casca de arroz na proporção de 77,2% de nitrato de amônio e 22,8% de casca de arroz. Em campo, observou-se que o volume de casca de arroz quando comparado ao nitrato era nitidamente superior devido à baixa densidade, o que prejudicou a homogeneização da mistura. Para realização desses ensaios, foram necessários: quatro conjuntos estopim/espoleta, seis metros de cordel detonante, uma linha silenciosa, quatro reforçadores (booster), cabo coaxial e quatro tubos de aço contendo a mistura explosiva. Foram realizados quatro ensaios mantendo-se a proporção citada anteriormente.

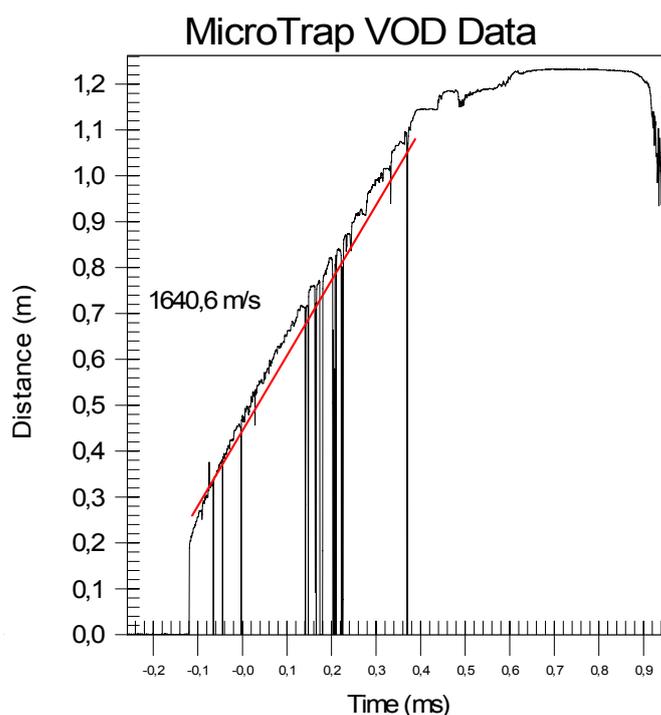


Figura 27: Primeiro ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e casca de arroz

A figura 27 mostra o gráfico da velocidade de detonação entre o nitrato de amônio e casca de arroz. Nesse ensaio, diferente dos demais, a iniciação da carga foi realizada com uma linha silenciosa em substituição ao cordel

detonante com a espoleta em contato com reforçador (booster). A velocidade de detonação média da mistura foi em torno de 1640,6 m/s.

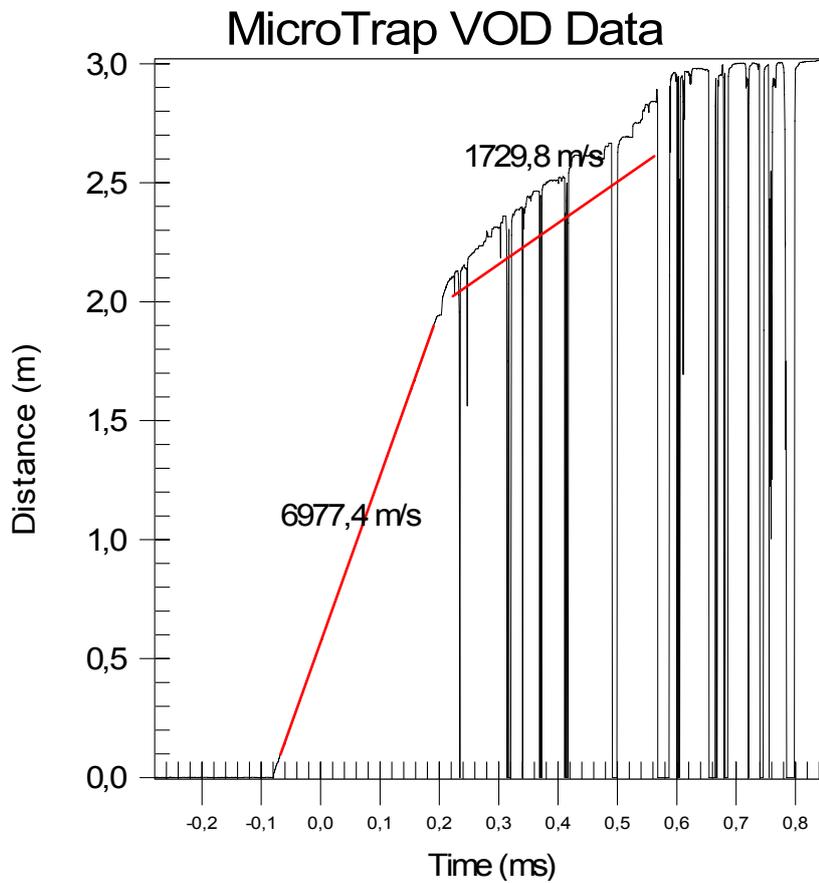


Figura 28: Segundo ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e casca de arroz

A figura 28 mostra a velocidade de detonação do cordel detonante em torno de 6977,4 m/s. A mistura apresentou uma velocidade de detonação aproximada de 1729,8 m/s.

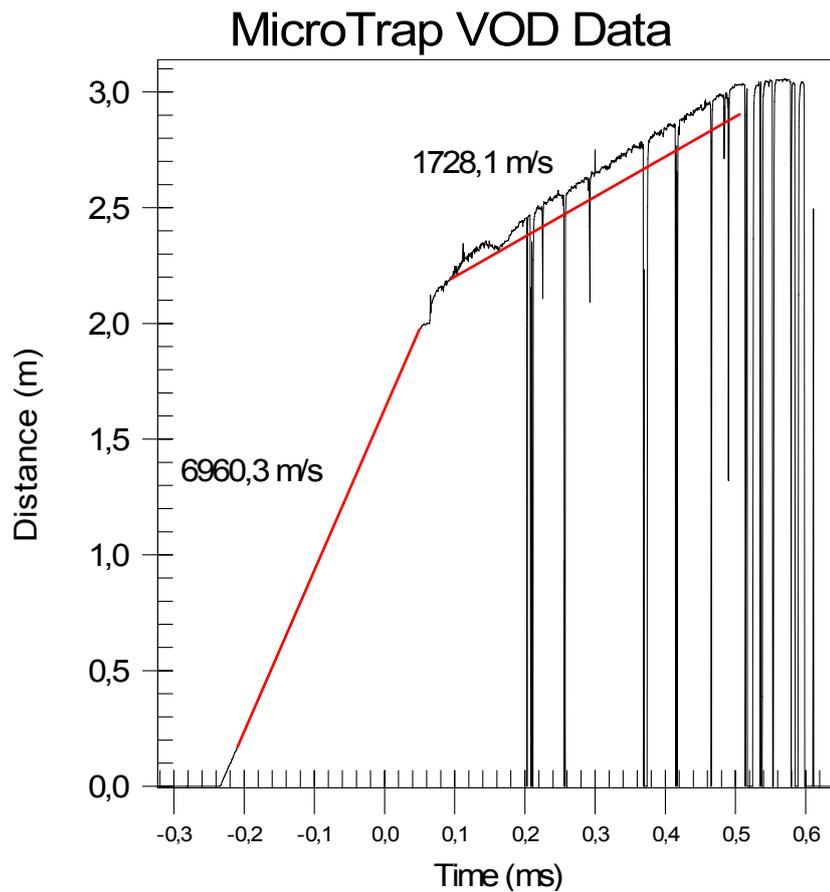


Figura 29: Terceiro ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e casca de arroz

A figura 29 mostra o gráfico da velocidade de detonação do cordel com velocidade de detonação em torno de 6960,3 m/s. A mistura apresentou uma velocidade de detonação aproximada de 1728,1 m/s.

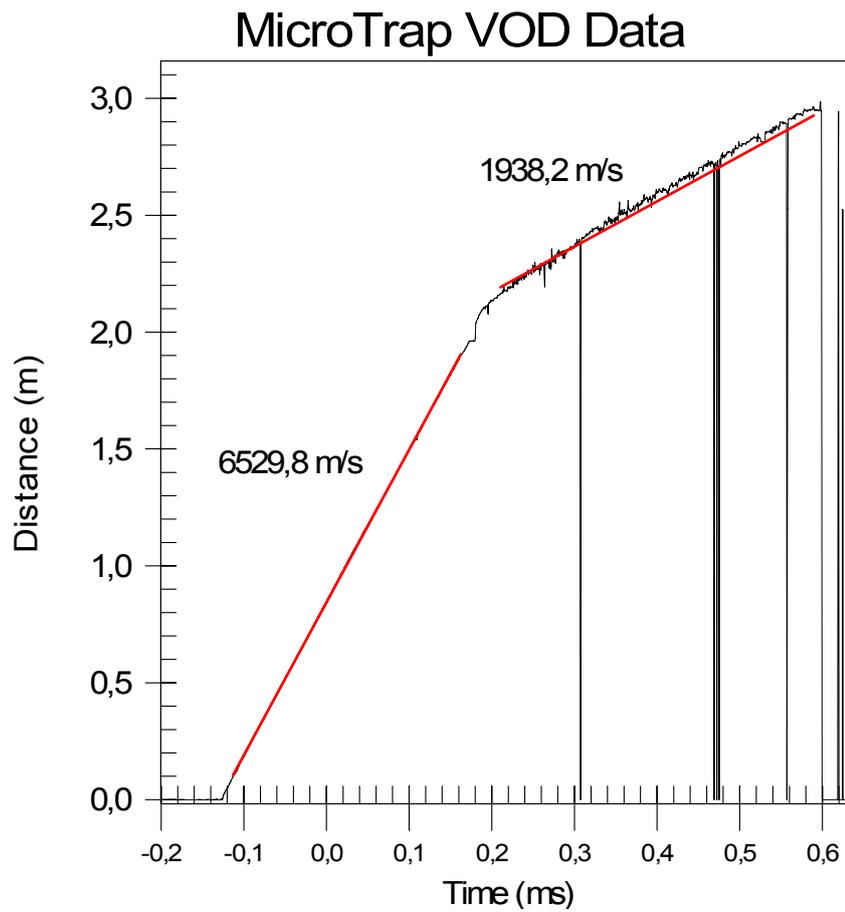


Figura 30: Quarto ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e casca de arroz

A figura 30 mostra o gráfico da velocidade de detonação do cordel aproximada de 6529,8 m/s. A mistura apresentou uma velocidade aproximada de 1938,2 m/s.

A figura 31 mostra o gráfico comparativo entre a velocidade de detonação do ANFO medida em campo e o resultado das velocidades de detonação obtidas nos gráficos das figuras 27, 28, 29 e 30. A casca de arroz, quando comparado aos demais combustíveis, apresentou o pior resultado.

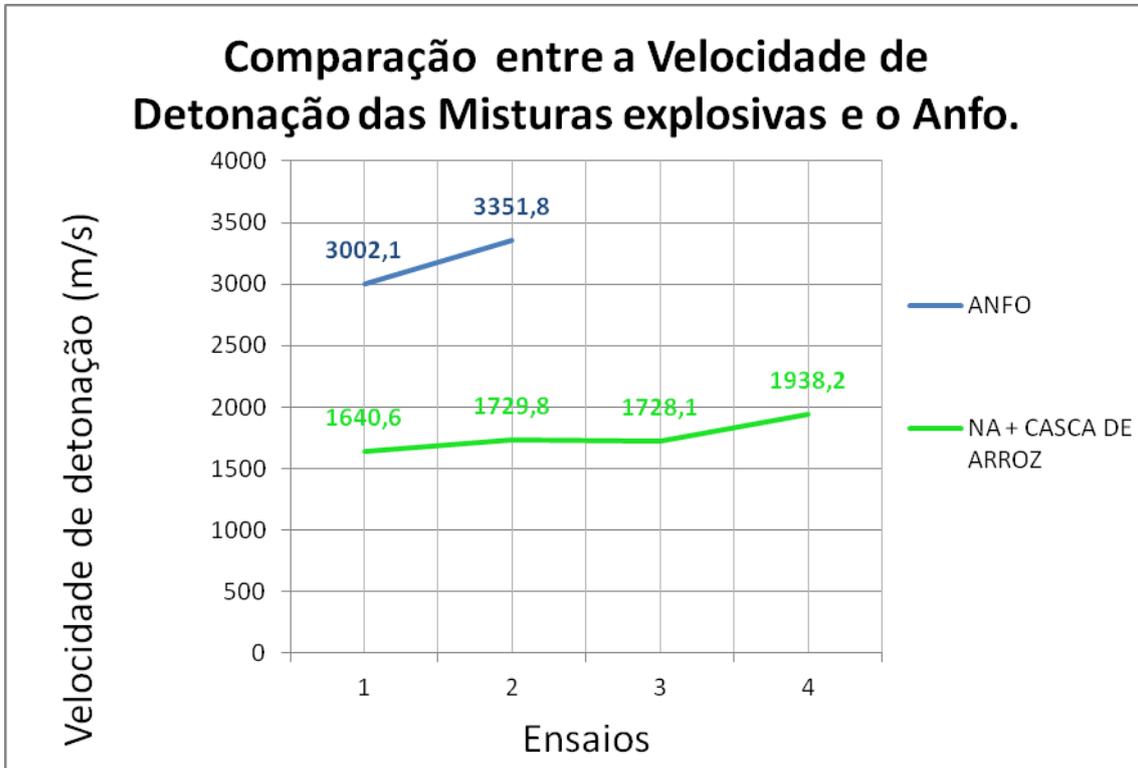


Figura 31: Gráfico comparativo entre a velocidade de detonação do ANFO e a mistura NA + casca de arroz

4.3 - Mistura entre o Nitrato de Amônio e Bagaço da Cana

As figuras 32, 33, 34 e 35 mostram o gráfico distância (m) em função do tempo (ms) e o resultado da velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e bagaço de na proporção de 85,1% de nitrato de amônio e 14,9% de bagaço de cana. Para realização desses ensaios, foram necessários: quatro conjuntos estopim/espoleta, seis metros de cordel detonante, quatro reforçadores (booster), cabo coaxial e quatro tubos de aço, contendo a mistura explosiva. Foram realizados quatro ensaios mantendo se a proporção citada anteriormente.

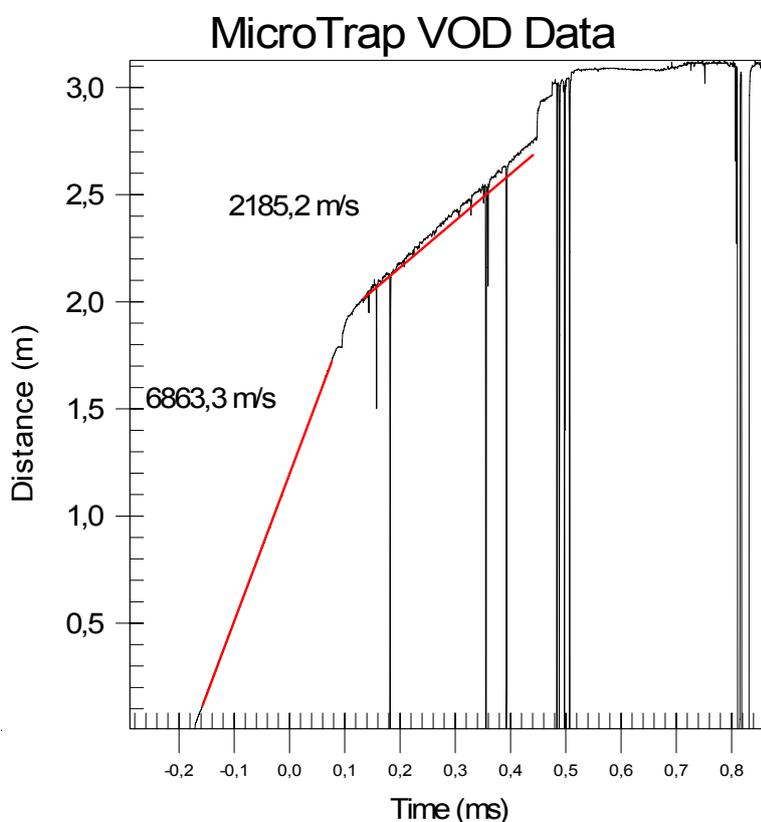


Figura 32: Primeiro ensaio velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e bagaço de cana

A figura 32 mostra o gráfico da velocidade de detonação do cordel detonante e da mistura entre o nitrato de amônio e bagaço de cana. A velocidade de detonação do cordel foi em torno de 6863,3 m/s, e a mistura apresentou uma velocidade de detonação de 2185,2 m/s.

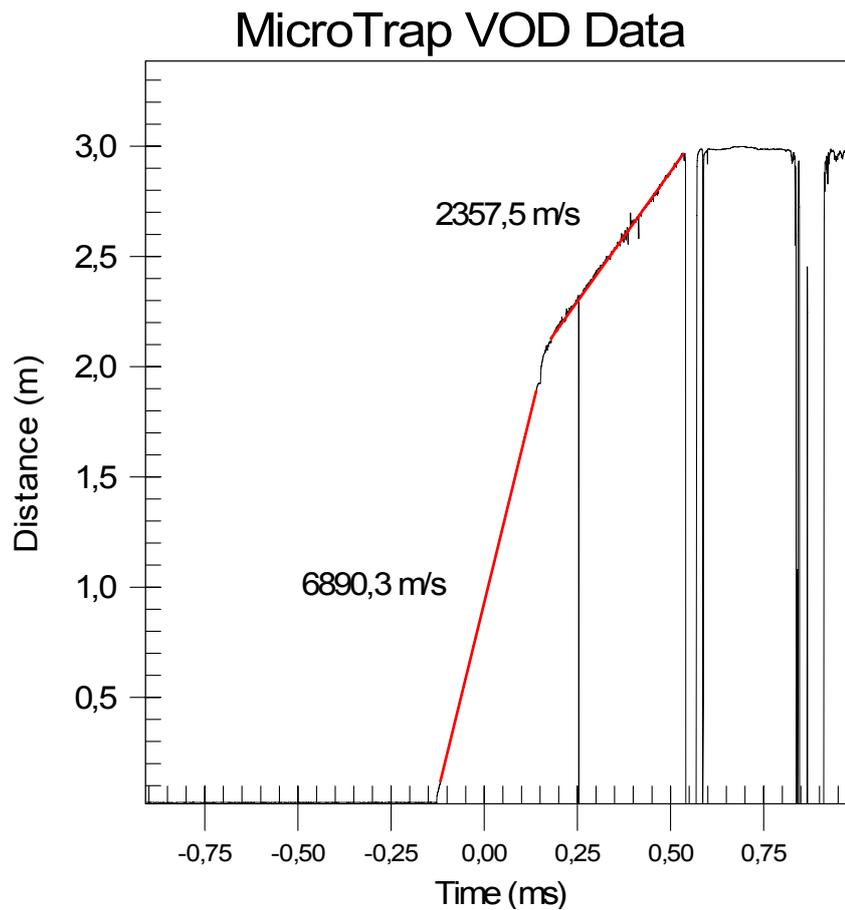


Figura 33: Segundo ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e bagaço de cana.

A figura 33 mostra o gráfico da velocidade de detonação do cordel detonante e da mistura entre o nitrato de amônio e bagaço de cana. A velocidade de detonação do cordel foi em torno de 6890,3 m/s, e a mistura apresentou uma velocidade de detonação de 2357,5 m/s.

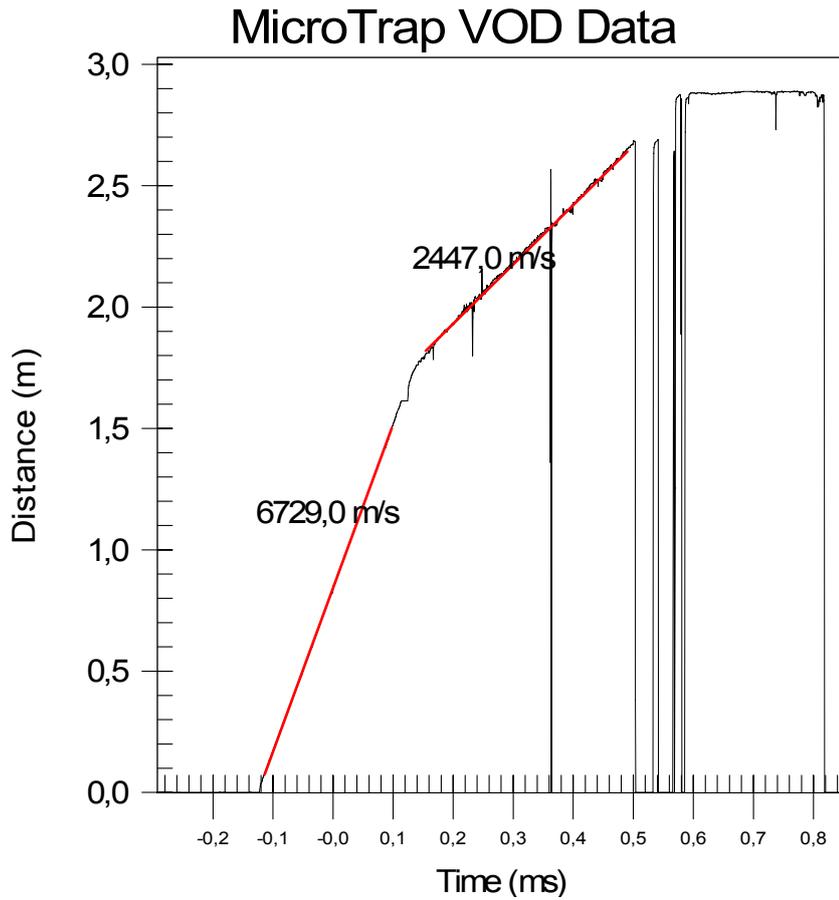


Figura 34: Terceiro ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e bagaço de cana

A figura 34 mostra o gráfico da velocidade de detonação do cordel detonante e da mistura entre o nitrato de amônio e bagaço de cana. A velocidade de detonação do cordel foi em torno de 6729,0 m/s, e a mistura apresentou uma velocidade de detonação de 2447,0 m/s.

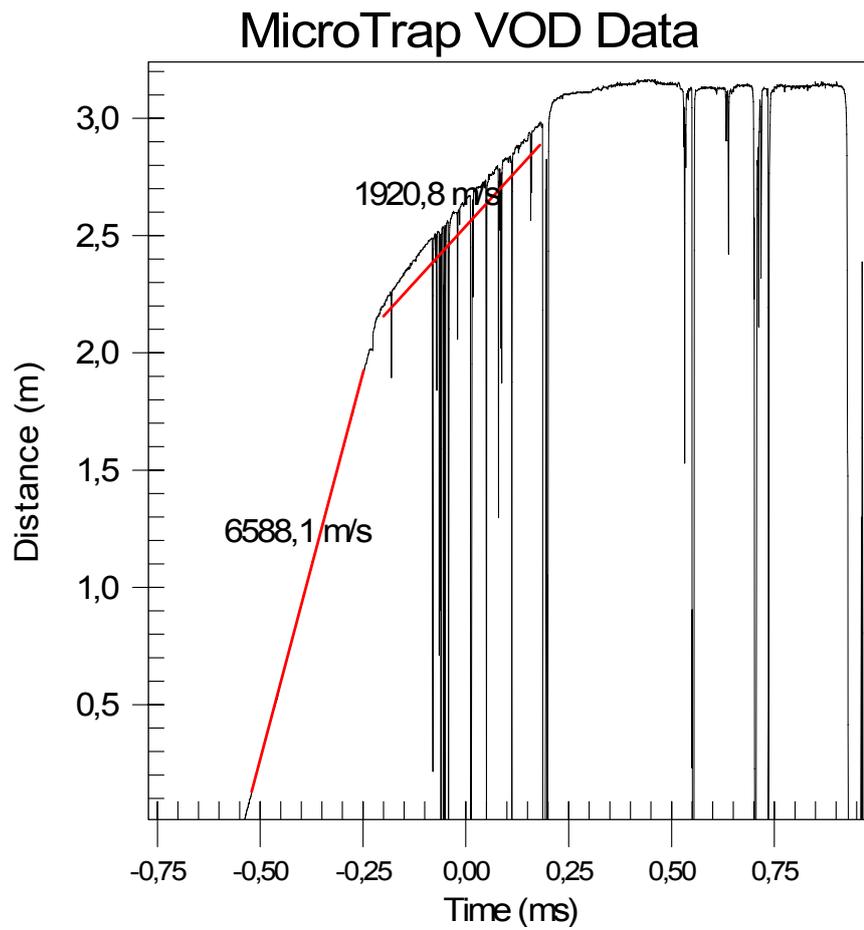


Figura 35: Quarto ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e bagaço de cana

A figura 35 mostra o gráfico da velocidade de detonação do cordel detonante e da mistura entre o nitrato de amônio e bagaço de cana. A velocidade de detonação do cordel foi em torno de 6588,1,0 m/s, e a mistura apresentou uma velocidade de detonação de 1920,8 m/s.

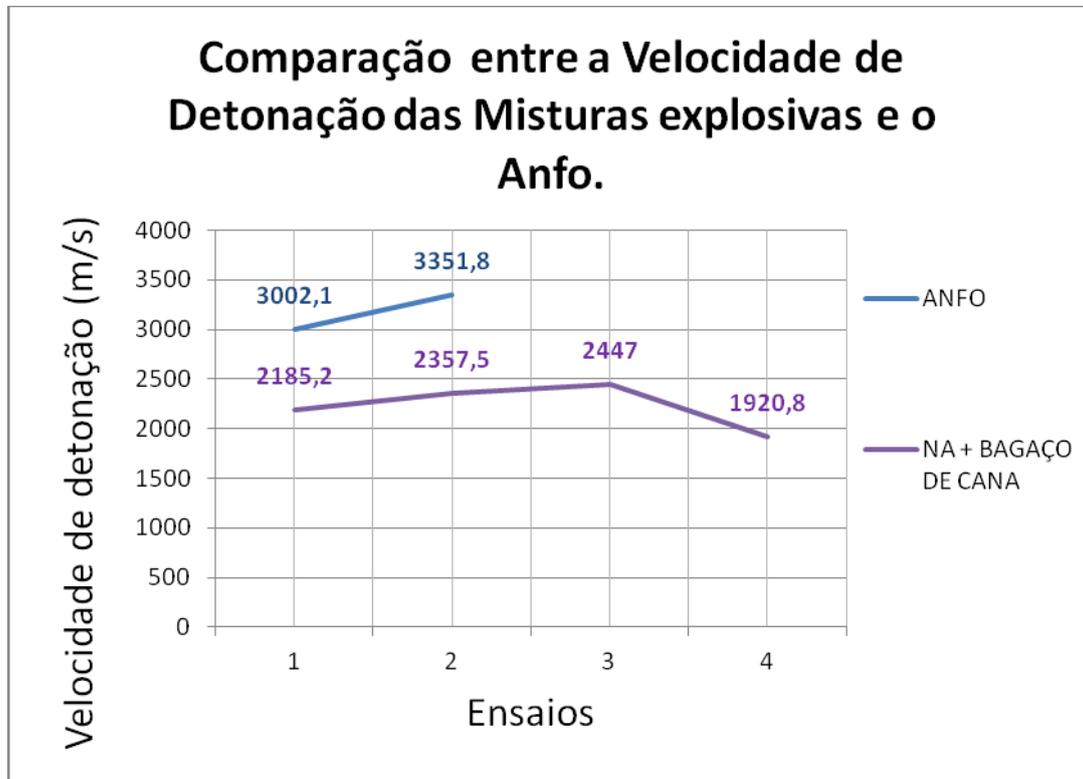


Figura 36: Gráfico comparativo entre a velocidade de detonação do ANFO e a mistura NA + bagaço de cana

4.4 - Mistura entre o Nitrato de Amônio e Resíduo de pneu

As figuras 37, 38 e 39 mostram o gráfico distância (m) em função do tempo (ms) e o resultado da velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e resíduo de pneu na proporção de 93,2 % de nitrato de amônio e 6,8% de resíduo de pneu. Para realização desses ensaios, foram necessários: três conjuntos estopim/espoleta, seis metros de cordel detonante, três reforçadores (booster), cabo coaxial e três tubos de aço contendo a mistura explosiva. Foram realizados três ensaios mantendo se a proporção citada anteriormente.

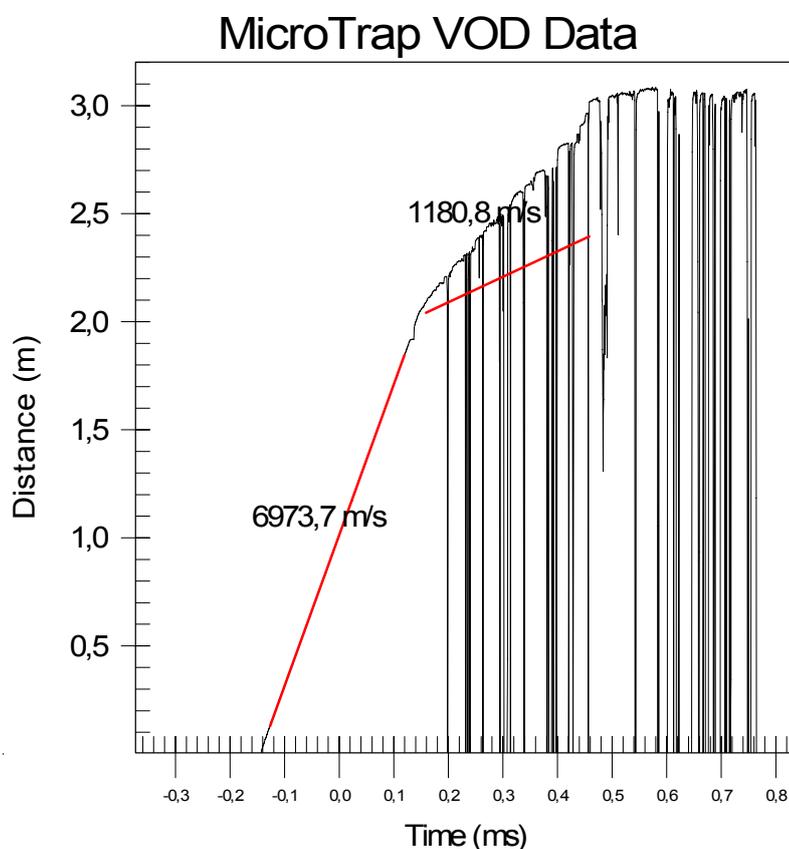


Figura 37: Primeiro ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e resíduo de pneu

A figura 37 mostra o gráfico da velocidade de detonação do cordel detonante e da mistura entre o nitrato de amônio e resíduo de pneu. A velocidade de detonação do cordel foi em torno de 6973,7 m/s, e a mistura apresentou uma velocidade de detonação de 1180,8m/s.

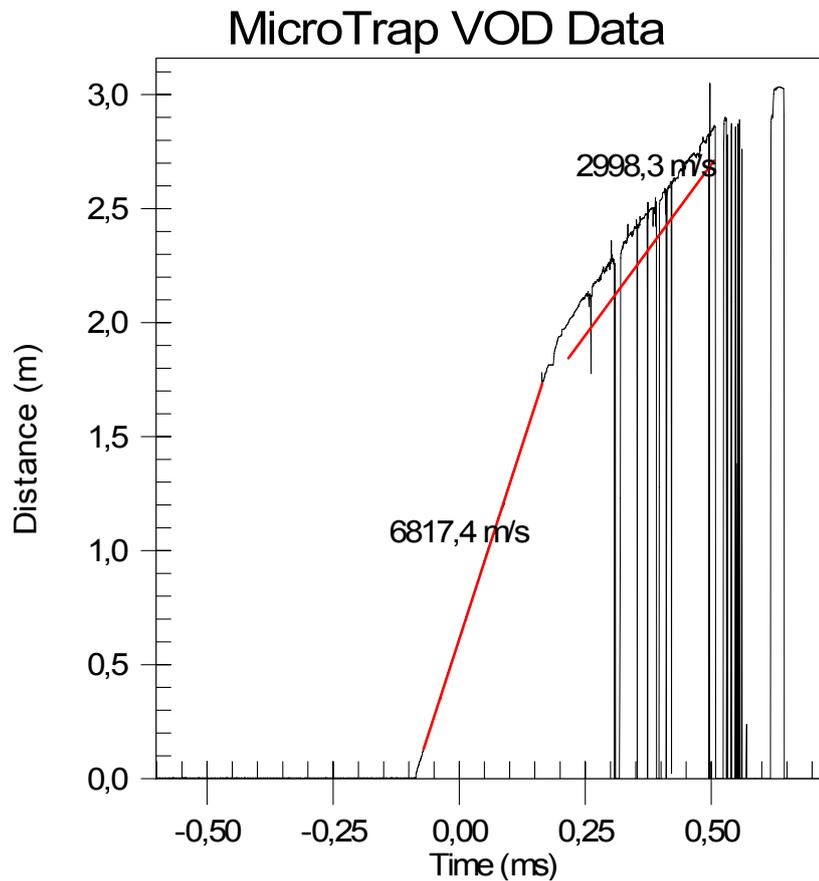


Figura 38: Segundo ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e resíduo de pneu

A figura 38 mostra o gráfico da velocidade de detonação do cordel detonante e da mistura entre o nitrato de amônio e resíduo de pneu. A velocidade de detonação do cordel foi em torno de 6817,4 m/s, e a mistura apresentou uma velocidade de detonação de 2998,3 m/s.

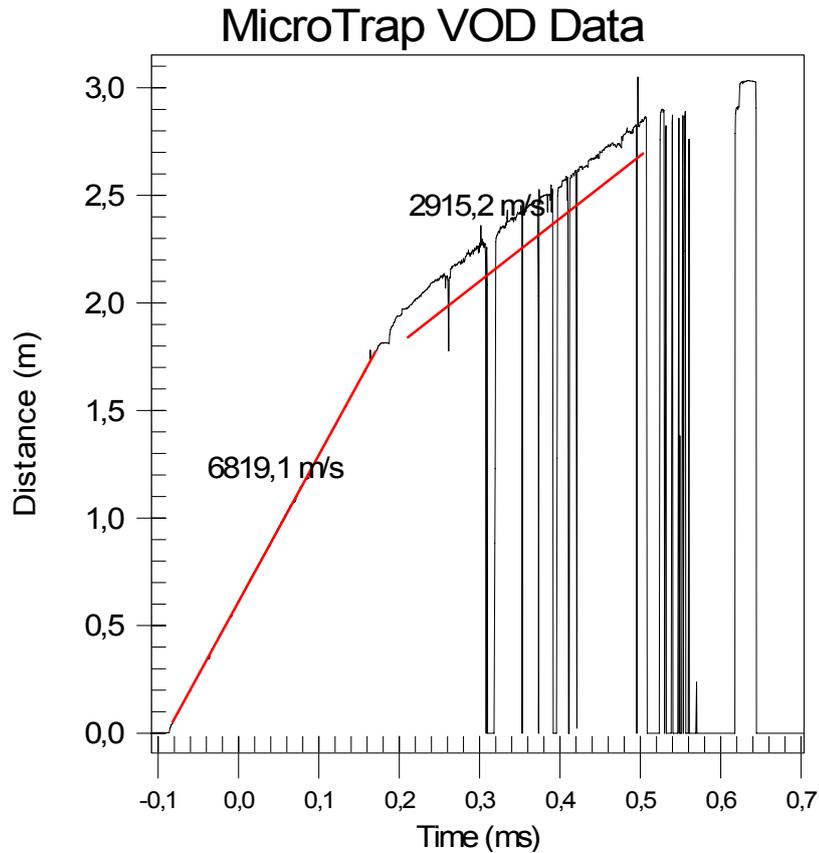


Figura 39: Terceiro ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e resíduo de pneu

A figura 39 mostra o gráfico da velocidade de detonação do cordel detonante e da mistura entre o nitrato de amônio e resíduo de pneu. A velocidade de detonação do cordel foi em torno de 6819,1 m/s, e a mistura apresentou uma velocidade de detonação de 2915,2 m/s.

A figura 40 mostra o gráfico comparativo entre a velocidade de detonação do ANFO medida em campo e o resultado das velocidades de detonação obtidas nos gráficos das figuras 37,38 e 39

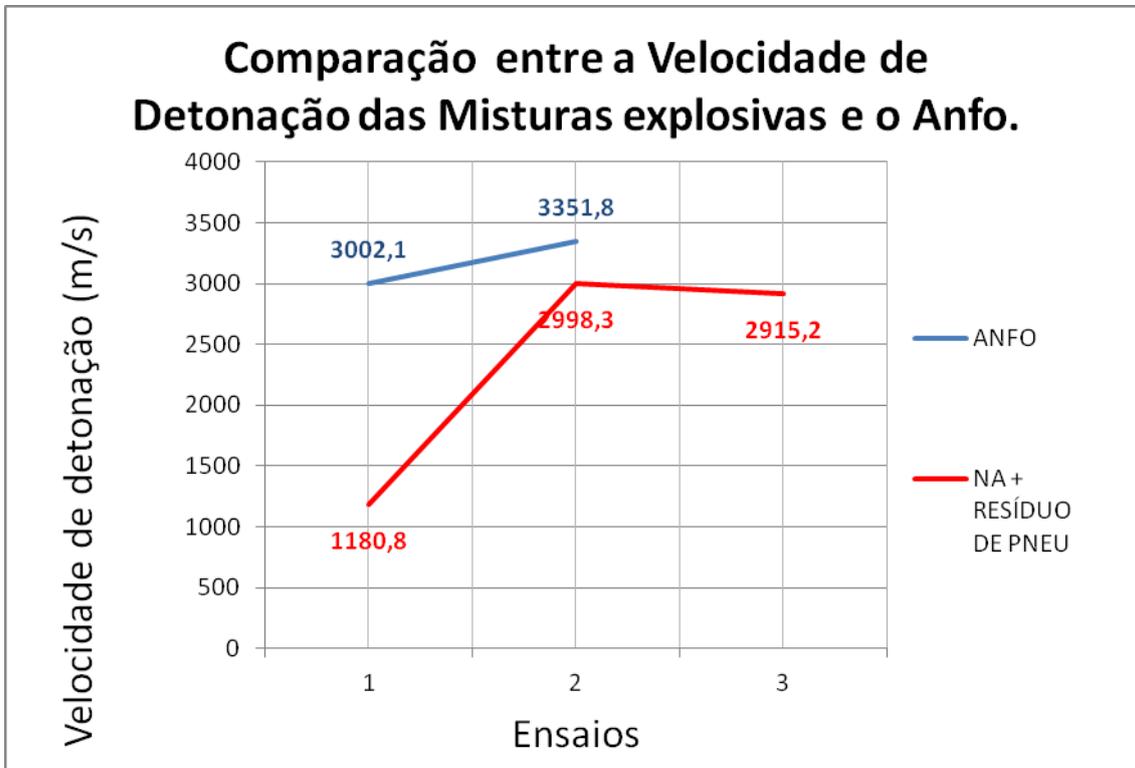


Figura 40: Gráfico comparativo entre a velocidade de detonação do ANFO e a mistura NA + Resíduo de Pneu

4.5 - Mistura entre o Nitrato de Amônio e Biodiesel

As figuras 41, 42, 43 e 44 mostram o gráfico distância (m) em função do tempo (ms) e o resultado da velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e biodiesel na proporção de 91,1% nitrato de amônio e 8,9% de biodiesel. Para realização destes ensaios foram necessários: quatro conjuntos estopim/espoleta, oito metros de cordel detonante, quatro reforçadores (booster), cabo coaxial e quatro tubos de aço, contendo a mistura explosiva. Foram realizados quatro ensaios mantendo-se a proporção citada anteriormente.

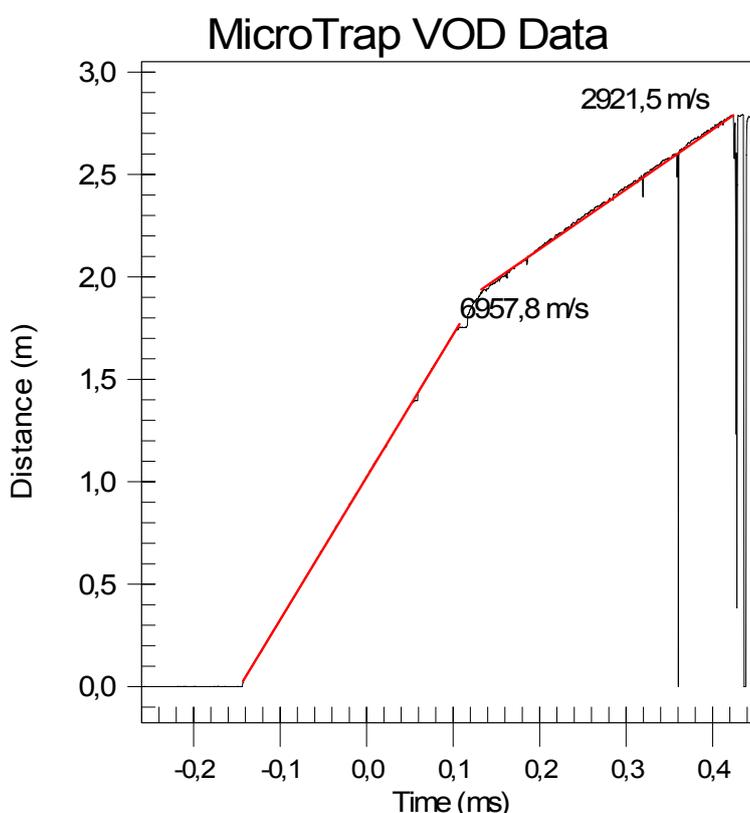


Figura 41: Primeiro ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e biodiesel

A figura 41 mostra o gráfico da velocidade de detonação do cordel detonante e da mistura entre o nitrato de amônio e biodiesel. A velocidade de detonação do cordel foi em torno de 6957,8 m/s, e a mistura apresentou uma velocidade de detonação de 2921,5 m/s.

MicroTrap VOD Data

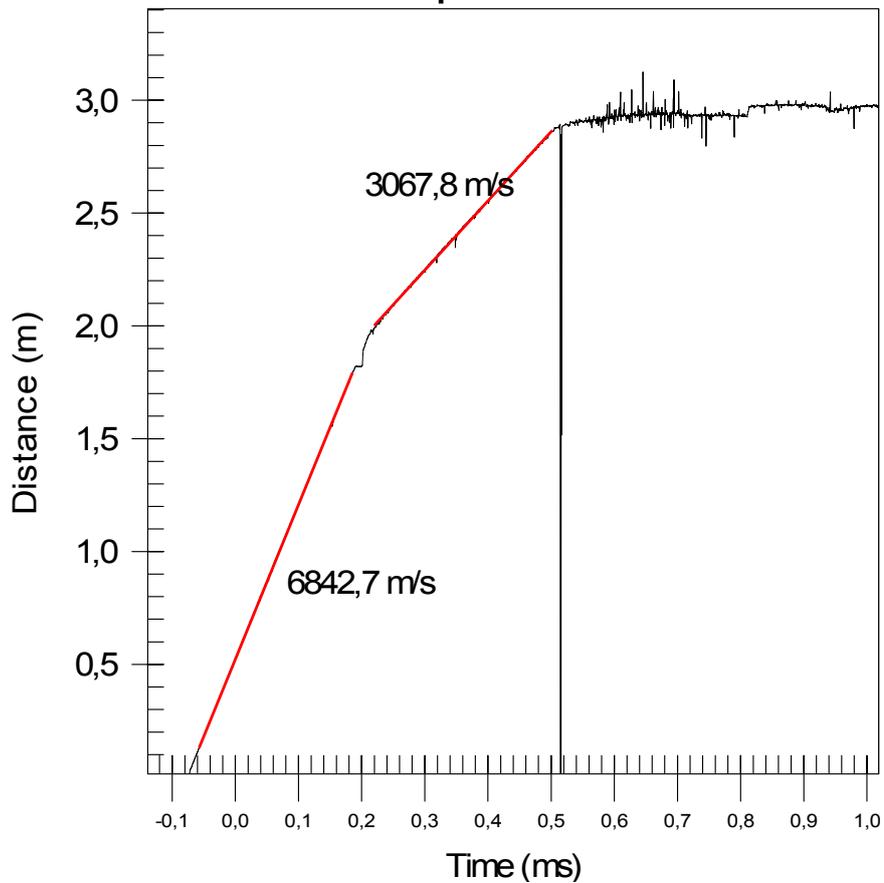


Figura 42: Segundo ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e biodiesel

A figura 42 mostra o gráfico da velocidade de detonação do cordel detonante e da mistura entre o nitrato de amônio e biodiesel. A velocidade de detonação do cordel foi em torno de 6842,7 m/s, e a mistura apresentou uma velocidade de detonação de 3067,8m/s.

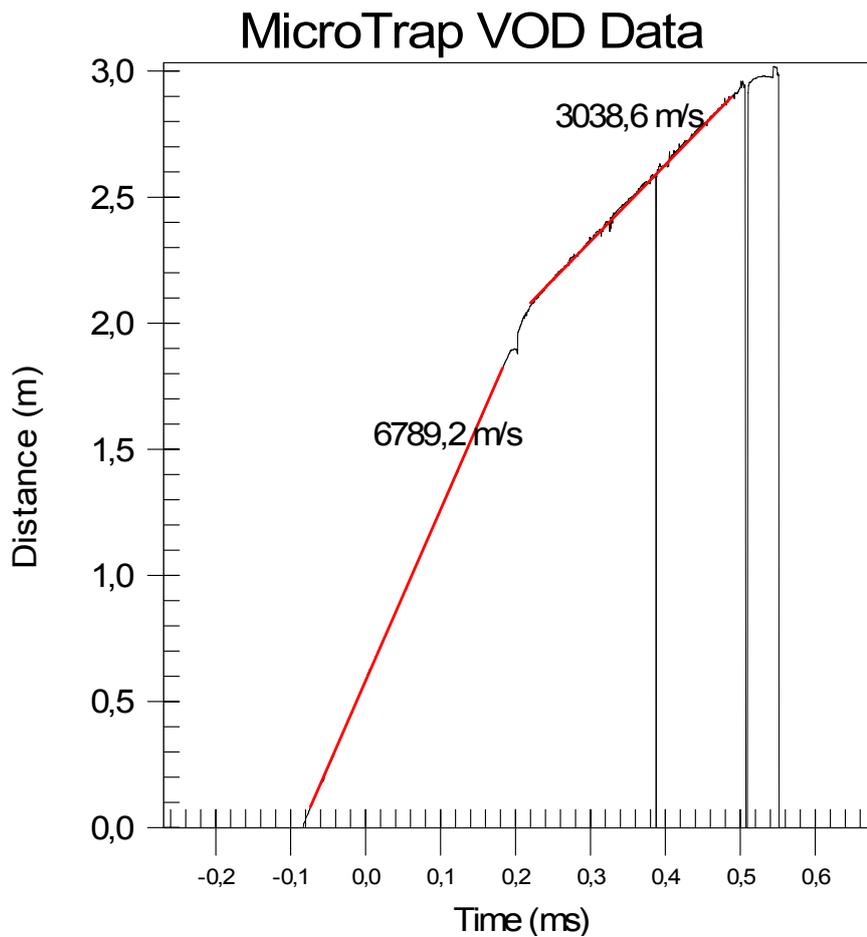


Figura 43: Terceiro ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e biodiesel

A figura 43 mostra o gráfico da velocidade de detonação do cordel detonante e da mistura entre o nitrato de amônio e biodiesel. A velocidade de detonação do cordel foi em torno de 6789,2 m/s, e a mistura apresentou uma velocidade de detonação de 3038,6 m/s.

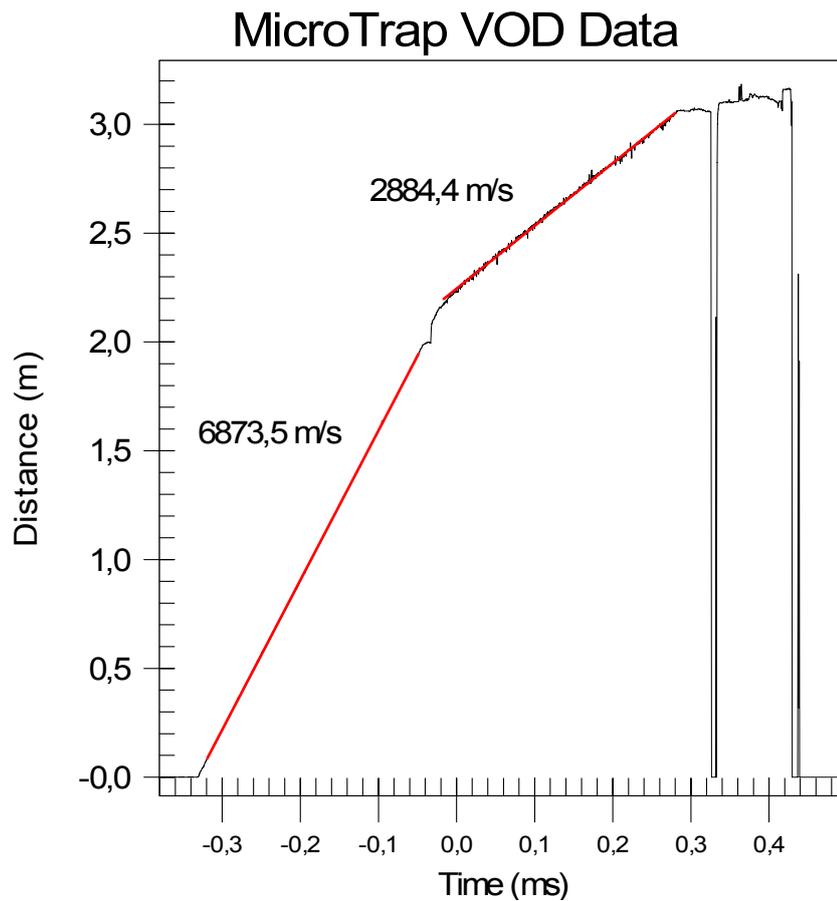


Figura 44: Quarto ensaio - velocidade de detonação da mistura entre nitrato de amônio e biodiesel

A figura 44 mostra o gráfico da velocidade de detonação do cordel detonante e da mistura entre o nitrato de amônio e biodiesel. A velocidade de detonação do cordel foi em torno de 6873,5 m/s, e a mistura apresentou uma velocidade de detonação de 2884,4 m/s.

A figura 45 mostra o gráfico comparativo entre a velocidade de detonação do ANFO medida em campo e o resultado das velocidades de detonação obtidas nos gráficos das figuras 41, 42, 43 e 44.

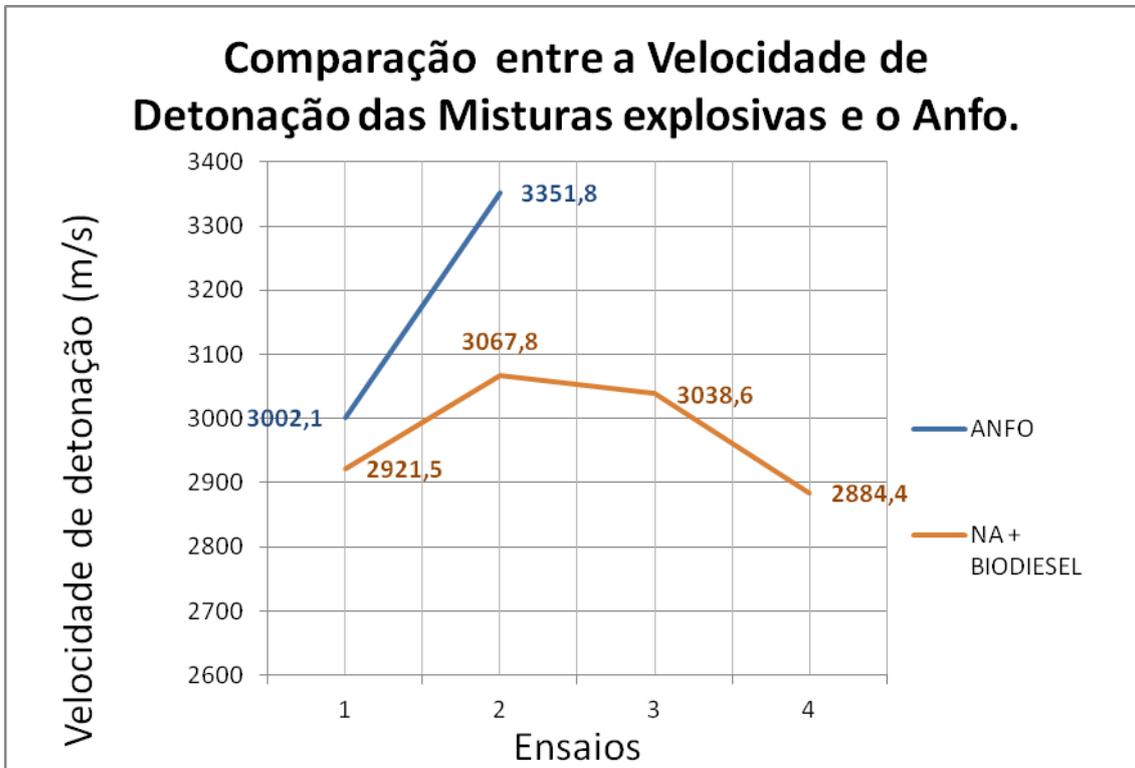


Figura 45: Gráfico comparativo entre a velocidade de detonação do ANFO e a mistura NA + biodiesel

4.6 - ANFO

A figura 46 e 47 mostra o gráfico distância (m) em função do tempo (ms) e o resultado da velocidade de detonação de ANFO na proporção de 94,5% de nitrato de amônio e 5,5% de óleo queimado. Para realização deste ensaio foram necessários dois conjuntos estopim/espoleta, uma linha silenciosa, dois metros de cordel, dois reforçadores e dois tubos de aços.

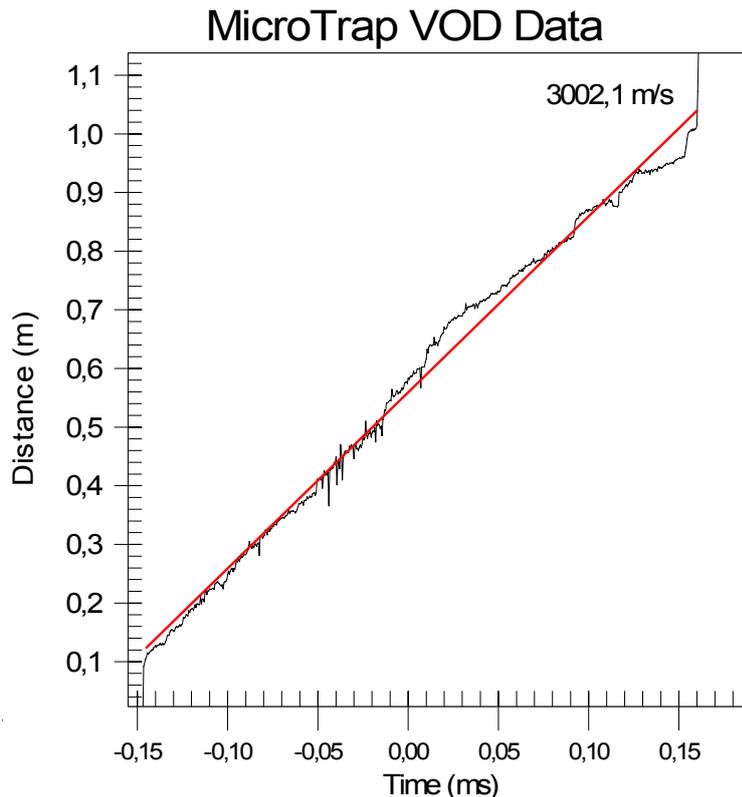


Figura 46: Primeiro ensaio - velocidade de detonação do ANFO

A figura 46 mostra o gráfico da velocidade de detonação do ANFO utilizado em escala industrial. A velocidade de detonação registrada pelo Microtrap foi em torno de 3002,1 m/s. Esse ensaio foi realizado utilizando-se como iniciador uma linha silenciosa com a espoleta em contato com o reforçador(booster)

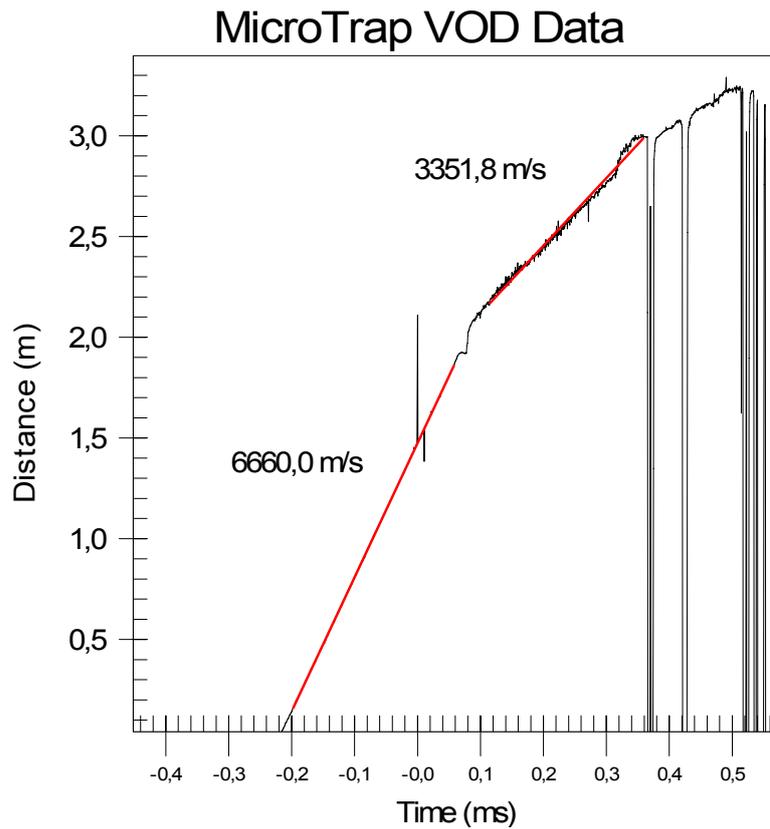


Figura 47: Segundo ensaio - velocidade de detonação do ANFO

A figura 47 mostra o gráfico da velocidade de detonação do ANFO utilizado em escala industrial. A velocidade de detonação registrada pelo Microtrap foi em torno de 3002,1 m/s. Nesse ensaio, diferentemente da figura 46, a iniciação deu-se com cordel detonante em contato com o reforçador (booster). O cordel apresentou uma velocidade de detonação em torno de 6660 m/s. A velocidade do ANFO foi de 3351,8 m/s.

A figura 48 representa o gráfico de uma média aritmética da velocidade de detonação em função dos diferentes combustíveis utilizados no ensaio. Observou-se que a mistura entre nitrato de amônio e o biodiesel apresentou um resultado satisfatório em relação aos demais combustíveis, porém insuficiente quando comparado com o ANFO. A mistura entre nitrato de amônio e casca de arroz apresentou o pior resultado com uma velocidade de detonação média em torno de 1759,2 m/s. Para os demais combustíveis, a média da velocidade de detonação oscilou entre 3177 m/s e 1759,2 m/s. Em termos percentuais em relação à velocidade de detonação do ANFO, as misturas apresentaram os seguintes valores: NA + Casca de arroz , 55,4%; NA + Sabugo de milho, 64,9%; NA +bagaço de cana, 70,1%; NA + resíduo de pneu, 74,4% e NA +Biodiesel, 93,7%.

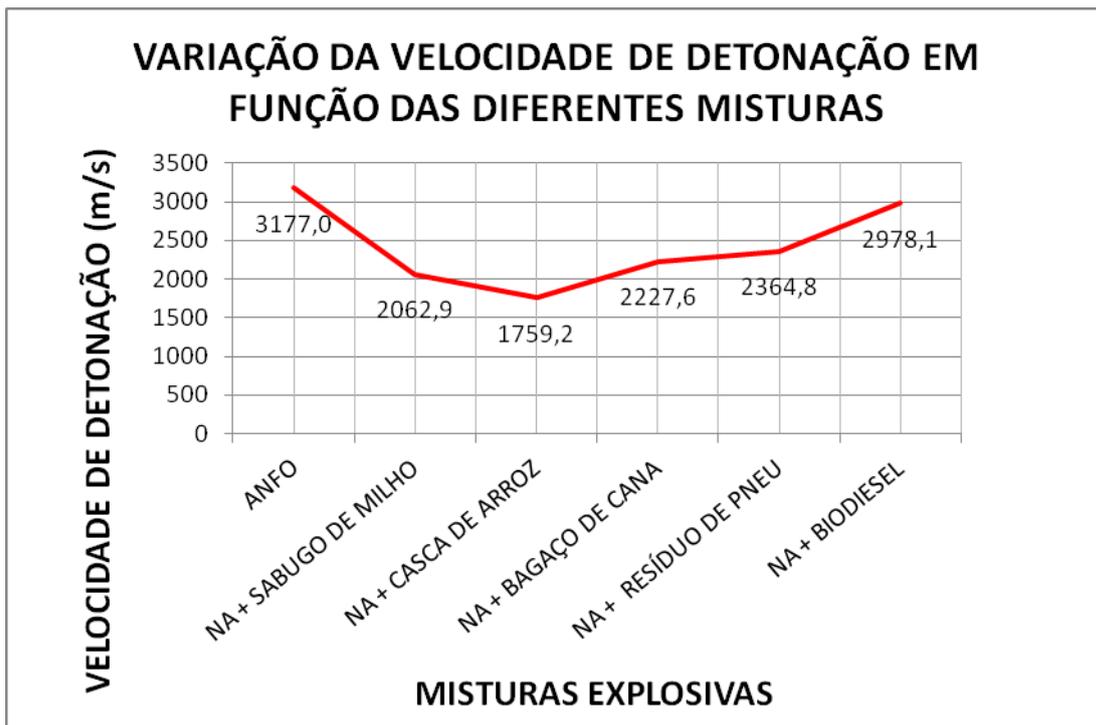


Figura 48: Gráfico mostrando a variação da média da VoD em função das diferentes misturas

A figura 49 mostra um gráfico comparativo entre as velocidades de detonação das misturas explosivas. Nesse gráfico, é possível visualizar todos os resultados obtidos a partir dos ensaios de detonação. O equipamento para medição da VOD registrou vinte detonações das trinta realizadas em campo. A partir da figura 49, observou-se que, com exceção do biodiesel, todos os ensaios provenientes da mistura entre o Nitrato de amônio e os combustíveis alternativos apresentaram desempenho insuficiente quando comparado ao resultado do ANFO.

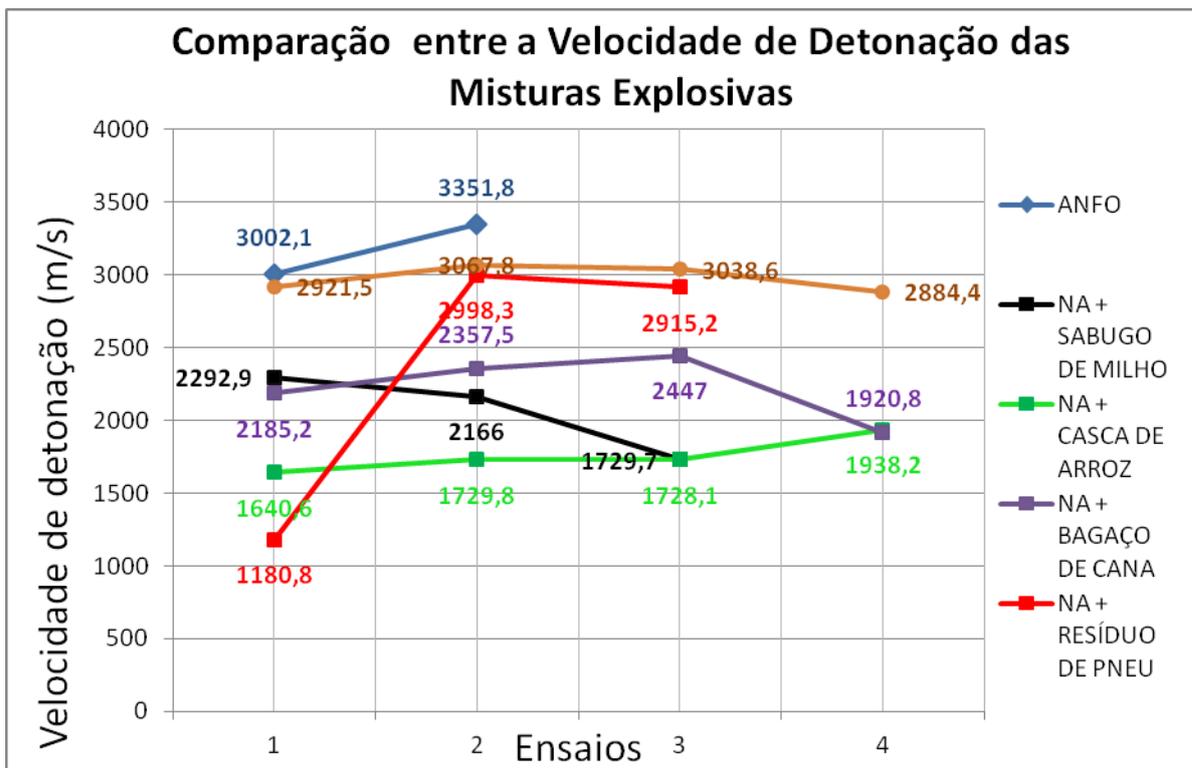


Figura 49: Gráfico comparativo das velocidades de detonação da misturas explosivas.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia desenvolvida neste trabalho pode ser aplicada como referência para determinação e elaboração de misturas explosivas entre agentes oxidantes e combustíveis, já que, nos trinta ensaios realizados, ocorreu a detonação das cargas.

Com relação aos resultados obtidos, o biodiesel apresentou um desempenho satisfatório em relação aos demais combustíveis. Em campo, durante a preparação das misturas, observou-se melhor a interação entre o combustível líquido (biodiesel) com o nitrato quando comparado aos demais combustíveis sólidos (sabugo de milho, casca de arroz, bagaço-de-cana, resíduo de pneu).

Acredita-se também que os resultados podem ter sido afetados pela segregação dos combustíveis sólidos no momento em que os tubos foram carregados, o que possivelmente provocou uma alteração nas proporções entre o agente oxidante e os combustíveis, influenciando, assim, diretamente a velocidade de detonação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Assis,P.S;Salierno,F.G&Filho,A.G. Technical and Enviromental Considerations of the Injection of Tire Into Blast furnace Tuyeres.The Minerals, Metals & Materials Society, 2006

Bhandari. S.Engineering Rock Blasting Operation.Department of Mining Engineering. J.N.V University., Jodhpur. Índia

DICK, R. A., “Explosives and Blasting Procedures Manual”. Us Bureau of Mines. 3p. 2005.

FAPESP (Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado de São Paulo). 1998. Propriedades do bagaço da cana-de-açúcar. Revista Pesquisa FAPESP, edição 30, abril 1998.

FELTRE, Ricardo. Química Geral. 4.ed. São Paulo: Moderna, 1995.p.371-372

FERRARI, A. R., OLIVEIRA, V. S., SCABIO, A. Biodiesel de Soja Taxa de Conversão em Ésteres Etilícos, Caracterização Físico-Química e Consumo em Gerador de Energia. Revista Química Nova, Vol. 28, n. 1, p.19-23, 2005

GOLDEMBERG, JOSÉ. Pesquisa e desenvolvimento na área de energia . São Paulo Perspec. [online]. 2000, vol.14, n.3, pp. 91-97.

HAMMED, B. H., LAI, L.F., CHIN, L.H.(2008) Production of biodiesel from palm oil (*Elaeis guineensis*) using heterogeneous catalyst: An optimized process School of Chemical Engineering, Engineering Campus, University of Science Malaysia, Nibong Tebal, Penang, Malaysia

Hemphill, G.B. (1981). Blasting Operations, p. 65 -82, Mcgraw – Hill book Company, New York – USA

HOPLER, R. B., (1999) "History of the Development and Use of Bulk Loaded Explosives, from Black Powder to Emulsions." Proceedings of the 19th General ISEE Annual Conference, San Diego, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 14 p. 2000

JIMENO, C.L., JIMENO., E.L., BERMÚDEZ, P.G. Manual de Perfuración y Voladura de Rocas. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España, 2003. p. 179-212.

MACHADO. A. S.C., Primeiro Químico Verde, 2006. Disponível em: <www.spq.pt/boletim/docs/boletimSPQ_103_045_09.pdf> Acesso em: 11mar. 2010

MONSANTO COMPANY, "Company timeline History." <http://www.monsanto.com/Monsanto/layout/carees/timeline/timeline3.asp>, Monsanto Company, Saint Louis, MO, USA, 2002

MUNARETI, E., KOPPE, J. C., WORSEY, P. N. "Desenvolvimento e Avaliação de Desempenho de Misturas Explosivas a Base de Nitrato de Amônio e Óleo combustível. P.7-10.

National Highway Institute. Rock Blasting and control Overbreak, 1991 p.2

National Institute of Rock Mechanics. Evaluation of Explosives Performance Through In-The-Hole Detonation Velocity Measurement. India, 2001. P.14-15

Persson, A. Roger H. e Jaimin L. (1996). Rock Blasting and Explosives Engineering, p.55, São Paulo

Reis, D.V (1997). Operações Mineiras, p.89 -154, Ouro Preto

Ribeiro, T.F. et al. (2008) Evaluation of the use of Mixtures of Charcoal and Rice Rind for its Injection in the Tuyeres of Blast Furnaces, REDEMAT, Ouro Preto, UFOP.

Rocha, José Dílcio. Gaseificação de Biomassa Histórico e Conceitos Básicos. Unicamp, 2002.

ROSSMANITH, H.P., Rock Fragmentation by blasting, 1993. 383p.

SILVA, V.C (2006) Operações Mineiras, p. 28-36, Ouro Preto.

SILVA. V. L. M. N., GOMES. W. C., ALSINA, O. L. S., Utilização do bagaço de cana de açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.2,n.1, p.27-32, 2007 UNICA (União da Agroindústria Canavieira de São Paulo). 2006. Cana-de-açúcar: subprodutos

WATERS, W.P., ZUCAS, J. A., Explosive Effects and Applications, Nova York: Springer, 2003. p.46

ZIGLIO R. B., 2007, Elaboração de Pães com a utilização de farinha de sabugo de milho; Revista Ciências Exatas e Naturais, Vol.9, p.117