



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Determinação dos Parâmetros de Explosividade de Misturas C-ar e/ou C-O₂

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

Autor

Pedro Manuel Buco de Sousa

Orientadores

Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes

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

Júri

Presidente Professor Doutor Pedro Figueiredo Vieira Carvalheira

Vogais Professor Doutor José Carlos Miranda Góis

Coimbra, fevereiro, 2013

Aos meus pais.
À minha irmã.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento:

Ao Professor Doutor Ricardo Mendes, orientador da dissertação, pela competência com que orientou o meu trabalho, pelo tempo que me dedicou e pelos conhecimentos transmitidos, totalmente necessários para a elaboração da minha tese.

Ao Professor Doutor José Manuel Baranda Ribeiro, orientador da dissertação, pelo apoio e partilha de conhecimentos valiosos para este trabalho.

Ao professor Doutor José Andrade Campos, pelo esclarecimento prestado e pela bibliografia fornecida, importante para o meu trabalho.

Ao António Liberato pela disponibilidade, apoio técnico e informático prestado.

À Rita Farinha pela disponibilidade e ajuda na análise química dos materiais.

Aos meus pais e à minha irmã pelo acompanhamento, carinho e forte apoio que sempre me deram ao longo de todo o percurso académico e em particular durante esta dissertação.

Aos meus amigos pela confiança, apoio e motivação que sempre me transmitiram.

Resumo

A determinação experimental da explosividade de suspensões de poeiras é realizada com carvão proveniente da Central Termoelétrica do Pego e efetuada numa câmara de explosão fechada, esférica e com 23,9 l, sendo a ignição da explosão gerada por ignidores pirotécnicos de 10 kJ.

O pó de carvão é colocado num recipiente de 0,76 l, que é pressurizado a 18,89 bar e, após a abertura rápida de uma eletroválvula, forma-se a suspensão de pó no interior da câmara de explosão. De seguida é efetuada a ignição através de uma descarga elétrica sobre o ignidor pirotécnico.

O trabalho experimental iniciou-se com a calibração do sistema de ensaio, ajustando as temporizações de abertura da eletroválvula e de disparo da fonte de ignição. Em simultâneo efetuou-se um estudo de avaliação dos parâmetros de explosividade em função do tempo entre a abertura da eletroválvula e a ignição.

Com o sistema de ensaios calibrado realizaram-se ensaios em que se variou a concentração de pó em suspensão de 30 g/m³ até 1000 g/m³.

O trabalho experimental terminou com a determinação da concentração limite de oxigénio para a qual deixa de ocorrer explosão, para uma concentração de pó de 500 g/m³.

Obtiveram-se como valores máximos de pressão e velocidade máxima de aumento de pressão, 7,94 bar para uma concentração de 250 g/m³ e 79,96 bar/s para uma concentração de 600g/m³, respetivamente.

A concentração mínima de carvão para ocorrer uma explosão foi de 35 g/m³.

A concentração limite de oxigénio obtida, para uma concentração de 500 g/m³, foi de 13,2%.

Palavras-chave: Explosividade, Pressão máxima de explosão, Velocidade máxima de aumento de pressão de explosão, Concentração mínima de pó de explosão, Concentração limite de oxigénio de explosão.

Abstract

The experimental determination of the explosibility of dust clouds is performed with coal from the Thermoelectric Central of Pego and done in a closed and spherical explosion vessel with 23,9 l, being the explosion ignition generated by pyrotechnic igniters of 10 kJ.

The coal dust is placed in a dust container with 0,76 l, which is pressurized at 18,89 bar and after the fast opening of an electric valve, the dust suspension is formed in the explosion vessel. After that, the ignition is done by an electrical discharge on a pyrotechnic igniter.

The experimental work began with the calibration of the test apparatus, adjusting the opening time of the electric valve and the activation of the ignition source. At the same time were evaluated the explosion parameters in function of the time between the time of the electric valve opening and the ignition.

With the calibration process completed, tests were done in which the dust concentration was varied in suspension from 30 g/m³ to 1000 g/m³.

The experimental work ended with the determination of the limiting oxygen concentration, for which explosion no longer occurs, at a dust concentration of 500 g/m³.

The obtained results of the maximum explosion pressure and the maximum rate of explosion pressure rise were 7,94 bar for a concentration of 250 g/m³ and 79,96 bar/s for a concentration of 600 g/m³, respectively.

The minimum concentration of coal to occur an explosion was 35 g/m³.

The limiting oxygen concentration, at a dust concentration of 500 g/m³ was 13,2%.

Keywords Explosibility, Maximum explosion pressure, Maximum rate of explosion pressure rise, Lower explosion limit, Limiting oxygen concentration.

Índice

Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	ix
Simbologia e Siglas	x
Simbologia.....	x
Siglas	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento do trabalho. Motivação e objetivos	1
1.2. Plano e organização da Tese	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Parâmetros Gerais de Explosão	3
2.2. Pressão e Velocidade de Aumento de Pressão de Explosão Máximas	5
2.3. Teoria de propagação de chama laminar de gases	7
2.4. Teoria de propagação de chama laminar unidimensional em nuvens de pós	8
2.5. Teoria de propagação de chama laminar em reatores fechados.....	10
2.6. Propriedades da suspensão de poeiras que influenciam a ignição e violência de explosão	12
2.6.1. Humidade	13
2.6.2. Granulometria.....	13
2.6.3. Concentração	15
2.6.4. Turbulência.....	19
2.6.5. Concentração de Oxigénio.....	20
2.6.6. Temperatura.....	22
2.7. Fontes de ignição	24
3. SISTEMA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	27
3.1. Descrição do sistema de ensaio.....	27
3.1.1. Câmara de explosão	28
3.1.2. Sistema de dispersão de pó	30
3.1.3. Fonte de ignição	31
3.1.4. Unidade de controlo.....	32
3.1.5. Sistema de medição de pressão	33
3.2. Procedimento experimental	34
3.3. Caracterização do pó de carvão	35
3.4. Gás da mistura poeiras/ar.....	37
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	38
4.1. Calibração do sistema de ensaio	38
4.1.1. Descrição da curva de pressão.....	40
4.1.2. Descrição do método de medição dos sinais elétricos.....	41
4.1.3. Influência do intervalo de tempo de ignição	42
4.2. Determinação da pressão e velocidade de aumento de pressão de explosão máximas.....	45
4.3. Concentração mínima de pó de explosão	49

4.4. Concentração limite de oxigénio de explosão	49
4.5. Caraterização do processo de ignição	54
4.6. Avaliação dos valores obtidos para os parâmetros de explosividade	55
5. CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
ANEXO A	59
ANEXO B	60
ANEXO C	62
ANEXO D	70
ANEXO E.....	71
ANEXO F.....	78
ANEXO G	79
ANEXO H	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Principais fatores condicionantes da existência das características duma explosão de suspensões de poeiras (Campos, 1982).	3
Figura 2 – Organograma da formação de uma explosão de suspensões de poeiras (Campos, 1982).....	4
Figura 3 – Efeito do tamanho das partículas de pó na explosibilidade do carvão de Pittsburgh (Cashdollar, 1996).....	15
Figura 4 - Explosividade de um carvão betuminoso com alto teor em voláteis e de um pó de polietileno (Cashdollar, 1996).	16
Figura 5 - Explosividades do pó de carvão betuminoso com alto teor em voláteis, do pó de polietileno e do gás metano (Cashdollar, 1996).	17
Figura 6 - Explosividade do pó de carvão de Pittsburgh, pulverizado numa câmara de explosão de 20 l (Cashdollar, 1996).	18
Figura 7 - Influência da turbulência inicial na explosibilidade de uma nuvem de pó (Eckhoff, 1977).	20
Figura 8 - Efeito do teor em oxigénio na explosividade do pó de carvão (Cashdollar, 1996).	21
Figura 9 - Influência do teor em oxigénio na pressão e velocidade máxima de aumento de pressão de explosão de carvão castanho (Eckhoff, 1997).	21
Figura 10 - Influência do teor em oxigénio na concentração mínima de pó de explosão de pó de carvão (Eckhoff, 1997).	22
Figura 11 - Influência da temperatura inicial de suspensões poeiras sobre a concentração mínima de pó de explosão (Eckhoff, 1997).	23
Figura 12 - Influência da temperatura inicial na explosão de uma suspensão de pó de carvão (Eckhoff, 1997).	23
Figura 13 - Efeito da temperatura na inflamabilidade e ignição térmica no carvão de Pittsburgh e no gás metano (Cashdollar, 1996).....	24
Figura 14 – Efeito da energia de ignição sobre a pressão e velocidade de aumento de pressão de explosão máximas (R. Pilão et al., 2005).	26
Figura 15 – Influência da energia de ignição na concentração mínima de explosão (R. Pilão et al., 2005).	26
Figura 16 - Sistema de ensaio da Esfera de 20 l (EN 14034-1).....	28
Figura 17 – Desenho da câmara de explosão, Solid Works.	29
Figura 18 – Sistema de ignição.	30
Figura 19- Dispensor de pó.	30

Figura 20 – Ignidor pirotécnico.	32
Figura 21 – Quadro elétrico/eletrónico da Unidade de controlo.	33
Figura 22 – Micrografia com ampliação de 500 X.	36
Figura 23 – Distribuição granulométrica das partículas de pó.	36
Figura 24 – Curva típica de pressão de explosão.	39
Figura 25 - Divisores de tensão do circuito elétrico/eletrónico.	42
Figura 26 - Influência do intervalo de tempo de ignição sobre a pressão máxima de explosão.	44
Figura 27 - Influência do intervalo de tempo de ignição sobre a velocidade máxima de aumento de pressão de explosão.	44
Figura 28 – Efeito da concentração de pó na evolução da pressão de explosão.	47
Figura 29 - Efeito da concentração de pó na evolução da velocidade de aumento de pressão de explosão.	47
Figura 30 – Efeito da concentração de pó sobre a pressão máxima de explosão.	48
Figura 31 - Efeito da concentração de pó sobre a velocidade máxima de aumento de pressão de explosão, adimensionalizada em relação ao volume da câmara de explosão.	48
Figura 32 – Fluxograma de determinação da concentração limite de oxigénio.	50
Figura 33 – Efeito da concentração de O ₂ na evolução da pressão de explosão.	52
Figura 34 – Efeito da concentração de O ₂ na evolução da velocidade de aumento de pressão.	52
Figura 35 - Efeito da concentração de oxigénio sobre a pressão máxima de explosão, para uma concentração de pó de 500 g/m ³	53
Figura 36 – Efeito da concentração de oxigénio sobre a velocidade máxima de aumento de pressão de explosão, para uma concentração de pó de 500 g/m ³	53
Figura 37 – Ignição de um ignidor com a composição 2.	54
Figura 38 – Influencia da composição dos ignidores pirotécnicos na explosividade da suspensão de poeira.	55
Figura 39 – Pontos caraterísticos da curva de temperatura (Operating Instrucion Manual No. 204M, 2008).	65
Figura 40 – Evolução da pressão durante a explosão da suspensão de pó de carvão com concentração de 250 g/m ³	72
Figura 41 - Evolução da velocidade de aumento de pressão durante a explosão da suspensão de pó de carvão com concentração de 250 g/m ³	72
Figura 42 - Evolução da pressão durante a explosão da suspensão de pó de carvão com concentração de 600 g/m ³	73
Figura 43 - Evolução da velocidade de aumento de pressão durante a explosão da suspensão de pó de carvão com concentração de 600 g/m ³	73

Figura 44 - Evolução da pressão durante a explosão da suspensão de pó de carvão com concentração de 35 g/m ³	74
Figura 45 - Evolução da velocidade de aumento de pressão durante a explosão da suspensão de pó de carvão com concentração de 35 g/m ³	74
Figura 46 - Evolução da pressão durante um ensaio não explosivo da suspensão de pó de carvão com concentração de 500 g/m ³ e 13,2% de oxigénio.	75
Figura 47 - Evolução da velocidade de aumento de pressão durante em ensaio não explosivo da suspensão de pó de carvão com concentração de 500 g/m ³ e 13,2% de oxigénio.	75
Figura 48 – Fotografia do sistema experimental.	78
Figura 49 – Esquema do circuito elétrico do quadro elétrico/eletrónico (Mendes R. e Ribeiro, J. 2010).	79
Figura 50 – Relatório da análise granulométrica do carvão.	80

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação da explosividade dos pós, em função de K_{st} (EN14034 – 2).....	7
Tabela 2 - Concentrações limite inferiores de inflamação indicativas para suspensões de várias partículas correntes (Campos, 1984).	16
Tabela 3 – Resumo dos resultados obtidos para determinação da concentração limite de oxigénio.	52
Tabela 4 – Resultados dos parâmetros de explosividade do presente trabalho e de Cashdollar (1996).	56
Tabela 5 – Registo de enchimento da câmara de explosão.	60
Tabela 6 – Registo dos valores temperatura/tempo de ensaio.....	63
Tabela 7 – Registo dos valores obtidos da curva de temperatura para determinação do PCS.	66
Tabela 8 – Resultados do PCS obtidos para a primeira composição utilizada nos ignidores pirotécnicos.	67
Tabela 9 – Resultado do PCS obtido para a segunda composição utilizada nos ignidores pirotécnicos.	67
Tabela 10 - Resultados do PCS obtidos para o carvão.....	67
Tabela 11 - Registo dos valores obtidos da curva de temperatura para determinação de W	68
Tabela 12 – Resultados da energia equivalente.....	69
Tabela 13 – Resumo dos resultados dos ensaios realizados numa gama de concentração de pó de $\rho_p = 30$ a 1000 g/m^3	76
Tabela 14 – Registo temporal das ações que antecedem a explosão nos ensaios realizados numa gama de concentração de pó de $\rho_p = 30$ a 1000 g/m^3	77

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

a – tempo do disparo

b – tempo em que a temperatura atinge 60% do aumento total

c – tempo no início do período em que a variação da temperatura passa a ser constante

c_p – Calor específico da mistura não queimada

D_0 – Diâmetro inicial da partícula

dP/dt – Velocidade de aumento de pressão

$(dP/dt)_{ex}$ – Velocidade máxima de aumento de pressão de cada ensaio

$(dP/dt)_{máx}$ – Velocidade máxima de aumento de pressão explosão registada na câmara de 20 l

E_i – Energia de ignição

k – Constante de velocidade

l – Espessura da frente de chama

k_{st} – Velocidade máxima de aumento de pressão explosão

m_1 – Massa da amostra combustível

m_r – Massa da amostra de referência

m_2 – Massa do combustível auxiliar

N – Número de moles

N_{ar} – Número de moles de ar

N_{N_2} – Número de moles de azoto

P – Pressão

P_{ar} – Pressão de ar

P_{ci} – Pressão provocada pelos ignidores pirotécnicos

PCS – Poder calorífico superior

PCS_r – Poder calorífico superior da amostra de referência

-
- P_d – Pressão de expansão do recipiente do pó
- P_{ex} – Pressão máxima de explosão de cada ensaio
- P_m – Pressão final
- $P_{máx}$ – Pressão máxima de explosão
- $P_{máx,20l}$ – Pressão máxima de explosão registada na câmara de 20 l
- P_{N_2} – Pressão de azoto
- P_r – Pressão no estado de referência (300 K e 1atm)
- P_0 – Pressão inicial
- Q_{fuse} – Contribuição da combustão do fio fusível
- Q_{ign} – Contribuição da oxidação do fio de ignição
- Q_N – Contribuição da formação de ácido nítrico
- Q_s – Correção por se considerar a formação de dióxido de enxofre a partir do ácido sulfúrico
- $q_{v,2}$ – Valor calorífico superior da amostra auxiliar
- R – Constante dos gases perfeitos
- r_1 – Subida da temperatura, por unidade de tempo, nos 5 minutos anteriores ao disparo
- r_2 – Subida da temperatura, por unidade de tempo, nos 5 minutos posteriores ao disparo
- S_e – Velocidade de expansão do gás devido ao aquecimento
- S_f – Velocidade da frente de chama
- S_g – Velocidade do gás devida à expansão dos gases produtos de combustão
- S_n – Velocidade de expansão do gás devida à alteração química do número de moléculas
- S_u – Velocidade fundamental de queima
- $S_{u,r}$ – Velocidade fundamental de queima no estado de referência (300 K e 1 atm)
- $S_{u,0}$ – Velocidade fundamental de queima inicial
- T – Temperatura
- T_a – Temperatura no momento do disparo
- T_c – Temperatura no instante “c”

-
- T_t – Aumento da temperatura
- t_e – Intervalo de tempo entre os sinais elétricos de abertura e fecho da Eletroválvula
- t_i – Intervalo de tempo entre os sinais elétricos de fecho da eletroválvula e de disparo do inflamador
- T_i – Temperatura de ignição
- t_d – Intervalo de tempo entre o sinal elétrico de abertura da eletroválvula e o início da subida de pressão
- T_m – Temperatura final
- t_v – Intervalo de ignição
- T_0 – Temperatura inicial
- t_l – Intervalo de tempo entre a ativação da ignição e o ponto em que se verifica a pressão máxima
- T_b – Temperatura dos produtos queimados
- T_0 – Temperatura inicial
- T_m – Temperatura final
- T_r – Temperatura no estado de referência (300 K e 1 atm)
- T_u – Temperatura dos reagentes não queimados
- V_0 – Volume da câmara de explosão
- x_0 – Velocidade da onda de desvolatilização
- W – Energia equivalente do calorímetro
- W_1 – Energia equivalente do calorímetro com calibração com a água 1
- W_2 – Energia equivalente do calorímetro com calibração com a água 2
- α – Difusibilidade efetiva do gás
- β – Constante empírica
- δ – Espessura da frente de chama
- γ – Valor médio das razões dos calores específicos a pressão e volume constante
- γ_b – Valor da razão dos calores específicos a pressão e volume constante da mistura queimada
- γ_u – Valor da razão dos calores específicos a pressão e volume constante da mistura não queimada

Δ_{ti} – Valor da razão dos calores específicos a pressão e volume constante da mistura não queimada

θ – Fração das partículas que é desvolatilizada

ρ – Densidade da mistura não queimada ρ

ρ_p – Concentração de pó

τ – Tempo médio de reação

τ_c – Constante de tempo de combustão

τ_d – Constante de tempo de desvolatilização

τ_m – Constante de tempo de mistura

τ_m – Constante de tempo de mistura

λ – Condutividade térmica da mistura não queimada

Siglas

CLO – Concentração limite de oxigénio de explosão

CME – Concentração mínima de pó de explosão

CEMUC – Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

UC – Universidade de Coimbra

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do trabalho. Motivação e objetivos

A determinação da explosividade de suspensões de poeiras de carvão com ar é necessária para garantir a segurança no trabalho em minas de extração de carvão e outras indústrias de processamento ou utilização de carvão.

As indústrias que processam produtos que em alguma das suas fases se apresentam na forma de pó são indústrias de alto potencial de risco quanto a incêndios e explosões, e devem, antes da sua implantação, efetuar uma análise aturada dos mesmos e tomar as precauções adequadas, preferencialmente na fase de projeto, pois nessa altura as soluções são mais simples e económicas. Por outro lado, nas indústrias já implantadas e com o auxílio de profissionais competentes, poder-se-ão equacionar razoavelmente bem os problemas, minorando os riscos inerentes. Tanto num caso como no outro, o conhecimento da perigosidade dos materiais envolvidos no processo fabril é um dos fatores de conhecimento relevante para a higiene e segurança pessoal e de bens na indústria.

A título de exemplo mencionam-se algumas atividades industriais reconhecidamente perigosas quanto ao risco de incêndios e explosões: indústrias fabricantes de rações para animais, indústrias de produtos alimentares, indústrias metalúrgicas, indústrias farmacêuticas e indústrias que processam materiais plásticos ou de madeira. Algumas das poeiras que frequentemente são processadas nestas indústrias, são: farinhas de trigo, milho, soja, cereais, açúcar, arroz, chá, cacau, couro, carvão, madeira, enxofre, magnésio e algumas ligas metálicas.

Devido à importância deste assunto, a comunidade científica efetuou diversos estudos com diferentes pós utilizados na indústria.

Os principais objetivos deste trabalho são a calibração do sistema de ensaio e a determinação da explosividade de suspensões de poeiras de carvão. Os parâmetros a caracterizar são a pressão máxima de explosão, velocidade máxima de aumento de pressão de explosão, a concentração mínima de explosão e concentração limite de oxigénio de explosão. Inicialmente foi estudada a influência do intervalo de tempo que compreende a

dispersão do pó no interior da câmara de explosão e a ignição, para um pó de farinha “Maizena”. Este último estudo referido foi realizado, essencialmente, para calibração do sistema de ensaios.

1.2. Plano e organização da Tese

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos.

Neste primeiro capítulo, introdutório, é feito o enquadramento do problema em estudo, referindo a motivação da comunidade científica na investigação deste assunto. Referem-se ainda os objetivos do trabalho, que envolveu uma extensa componente laboratorial.

No segundo capítulo, Revisão Bibliográfica, são mencionadas as teorias de propagação de chama e as principais propriedades da suspensão de poeiras, explicando a sua influência na ignição e desenvolvimento de explosão.

As etapas do trabalho experimental são descritas no terceiro capítulo, Sistema e Procedimento Experimental, no qual se descreve e explica o funcionamento de todo o sistema de ensaio, sendo também feita a caracterização físico-química e energética do pó de carvão da Central Termoelétrica do Pego, bem como da composição utilizada nos ignidores pirotécnicos que provocam a ignição da suspensão de pó.

O quarto capítulo, Análise e Discussão de Resultados, apresenta os resultados experimentais obtidos, sendo feita a sua interpretação e comparação com o resultado de outros estudos referenciados nesta dissertação.

Por fim, no capítulo 5, Conclusão, descreve-se a utilidade prática deste estudo, referindo a informação dos resultados experimentais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Parâmetros Gerais de Explosão

É possível a ocorrência de explosões em diversas indústrias que processem produtos que se apresentam na forma de pó e que tenham propriedades combustíveis, como infelizmente já se registou em vários acidentes. Para que tal aconteça é necessário que as partículas de pó, com um tamanho médio inferior a 500 µm, sejam colocadas em suspensão no ar, com concentração adequada e que exista uma fonte de ignição.

As causas iniciadoras de uma explosão e as propriedades condicionantes da mesma, encontram-se representadas na Figura 1.

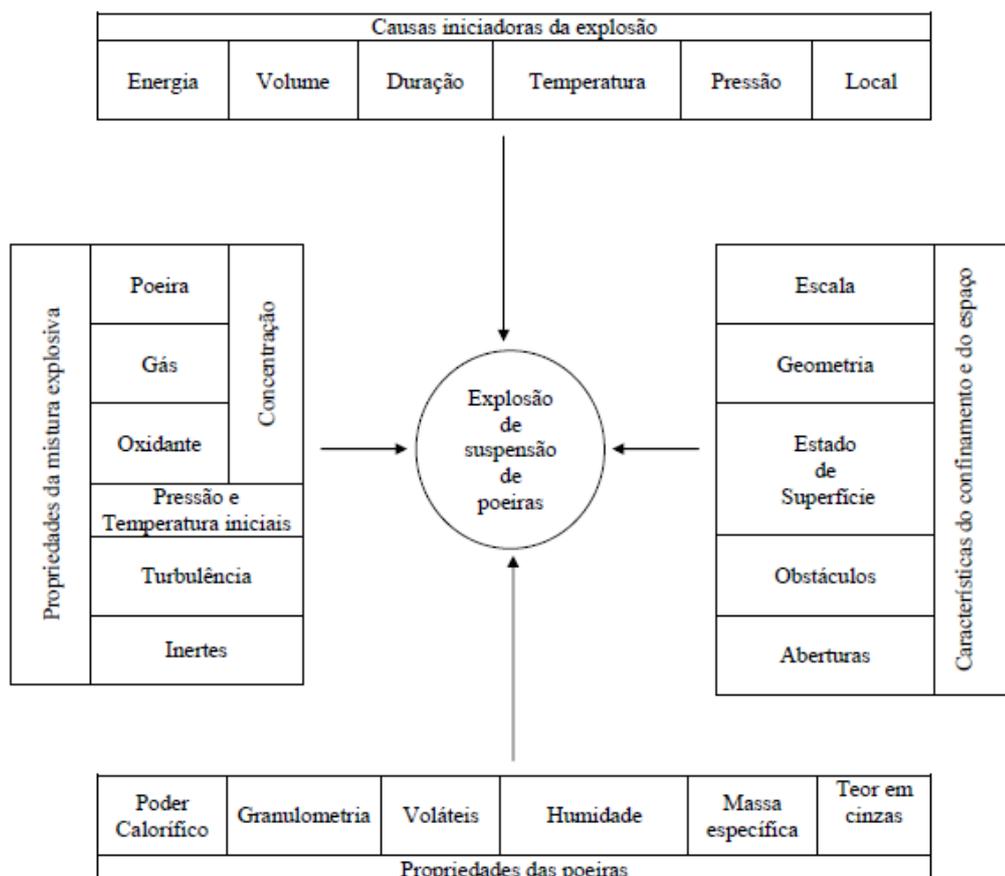


Figura 1 - Principais fatores condicionantes da existência das características duma explosão de suspensões de poeiras (Campos, 1982).

Na Figura 2 encontra-se representado um organograma que estabelece as interações entre os parâmetros que provocam a explosão e a sequência de ações até ao seu início.

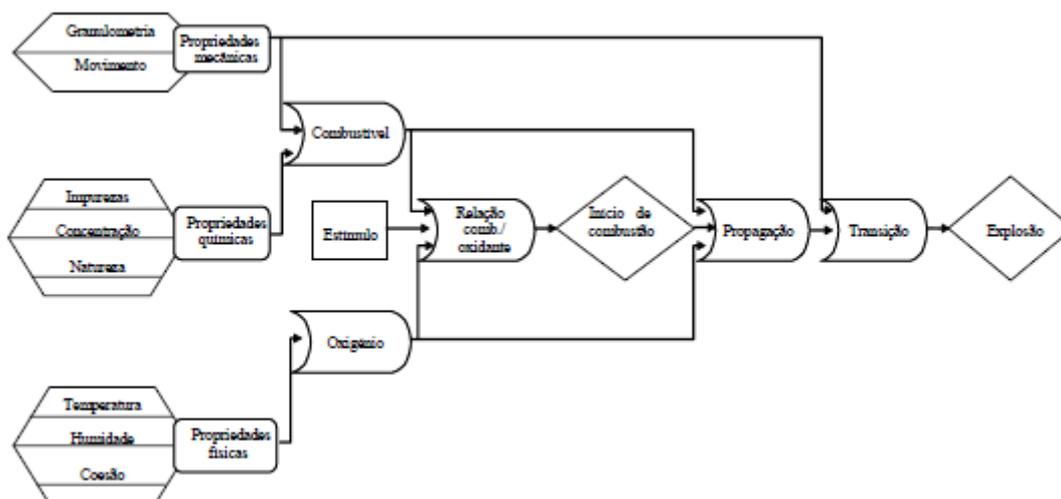


Figura 2 – Organograma da formação de uma explosão de suspensões de poeiras (Campos, 1982).

No presente capítulo será feita uma análise teórica da influência das propriedades e características mencionadas neste fluxograma, no início e desenvolvimento da explosão.

O sistema de ensaio normativo para determinar as características explosivas de suspensões de poeiras é o ensaio de explosão numa câmara de ensaio de 1 m³, preparada para suportar elevadas pressões. No entanto, existe uma alternativa ao sistema de ensaio descrito, cuja conformidade foi provada para a câmara esférica de 20 l, que permite a realização dos ensaios de forma mais rápida e fácil (EN14034-1).

O trabalho prático foi realizado com base na informação descrita nas Normas Europeias seguintes, para determinação das características explosivas de suspensões de poeiras. As referidas normas foram traduzidas para Português no decurso do presente trabalho:

- EN14034-1 – Determinação da pressão máxima de explosão $P_{m\acute{a}x}$;
- EN14034-2 – Determinação da velocidade máxima de aumento de pressão $(dP/dt)_{m\acute{a}x}$;

- EN14034-3 – Determinação da concentração mínima de pó de explosão (CME);
- EN14034-4 – Determinação da concentração limite de oxigénio (CLO).

2.2. Pressão e Velocidade de Aumento de Pressão de Explosão Máximas

A pressão máxima de explosão, obtida experimentalmente, é o valor máximo de pressão registado numa gama de explosões de atmosferas explosivas contendo um pó combustível, sendo os ensaios realizados numa câmara fechada. A medida da pressão máxima de explosão constitui a base para proteção contra explosões através do projeto e construção de equipamento que permita reduzir os seus efeitos (EN14034-1).

O valor da pressão máxima de explosão, $P_{m\acute{a}x}$, é o maior valor dos máximos de pressão registados em cada um dos ensaios realizados numa dada gama de concentração de pó. O valor máximo de pressão registado em função do tempo, em cada ensaio, denomina-se P_{ex} e representa a diferença entre a pressão no momento da ignição e a pressão máxima registada. Considera-se que houve ignição de pó se o aumento de pressão, relativamente à pressão ambiente for, pelo menos, de 0,5 bar, ou seja $P_{ex} \geq 0,5$ bar (EN14034-1).

Devido à diferente relação superfície/volume existem diferenças entre os valores de pressão medidos na câmara de explosão de 1 m³ e na câmara esférica de 20 l. O valor da pressão máxima medido no primeiro sistema é, de modo geral, ligeiramente superior ao valor medido no segundo. Este efeito explica-se com a existência de um sistema de arrefecimento existente na câmara esférica (Manual 7.0 Kuhner AG, 2011).

Comparações entre os valores de pressão em função do tempo para os dois sistemas de explosão, mostram que a descida de pressão é muito mais rápida na câmara de 20 l, portanto é necessário corrigir este efeito. Adicionalmente, o efeito do aumento de pressão causado pelos ignidores pirotécnicos deve ser tido em conta. Aplicam-se, portanto, correções aos valores de pressão obtidos na câmara de explosão de 20 l, de forma que os resultados finais de $P_{m\acute{a}x}$ sejam coerentes para os dois sistemas de explosão. Estas correções aplicam-se através das equações (2.1) e (2.2) (EN14034-1).

- Para explosões com $P_{m\acute{a}x} \geq 5,5$ bar, devido ao efeito de arrefecimento:

$$P_{m\acute{a}x} = 0,775 \times P_{m\acute{a}x,20l}^{1,15} \text{ [bar]} \quad (2.1)$$

- Para explosões com $P_{m\acute{a}x} < 5,5$ bar, devido ao menor volume da esfera de 20 l, o efeito do aumento de pressão causado pelos ignidores pirotécnicos deve ser tido em conta:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{5,5 \times (P_{m\acute{a}x,20l} - P_{ci})}{(5,5 - P_{ci})} \text{ [bar]} \quad (2.2)$$

$$P_{ci} = \frac{1,6 \times E_i}{10000} \text{ [bar]} \quad (2.3)$$

Sendo:

- $P_{m\acute{a}x,20l}$ a pressão máxima registada na esfera de 20 l;
- P_{ci} a pressão provocada devida aos ignidores pirotécnicos em bar;
- E_i a energia de ignição em J;
- A constante 1,6 é o valor de subida de pressão devido ao ignidor pirotécnico.

A velocidade máxima de aumento de pressão, obtida experimentalmente, é o valor máximo da taxa de subida de pressão, por unidade de tempo que se regista numa gama de explosões de atmosferas explosivas contendo um pó combustível, sendo os ensaios realizados numa câmara fechada. O conhecimento deste parâmetro tem o mesmo interesse prático que o conhecimento da pressão máxima de explosão (EN14034-2).

A velocidade máxima de aumento de pressão de explosão, $(dP/dt)_{m\acute{a}x}$ é o maior valor dos máximos registados para cada um dos ensaios realizados numa dada gama de concentração de pó. A velocidade máxima de aumento de pressão, obtida para cada ensaio, denomina-se $(dP/dt)_{ex}$ (EN14034-2).

O valor da $(dP/dt)_{m\acute{a}x}$ depende do volume em que ocorre a explosão e calcula-se um fator K_{st} que permite interpretar esta grandeza de forma independente do volume, permitindo comparar os valores de velocidade máxima de aumento de pressão

obtidos em diferentes sistemas explosivos e aplicar os resultados laboratoriais a situações industriais. O parâmetro K_{st} foi introduzido por Bartknecht (1981) e resulta da chamada “Lei Cúbica”, apenas válida para reatores geometricamente semelhantes, se a espessura de chama for desprezável quando comparada com o raio do reator e se a velocidade de queima, como função da pressão e temperatura, for idêntica em todos os reatores (Eckhoff, 1997). Este fator calcula-se através da equação (2.4) (EN14034-2):

$$K_{st} = V_0^{1/3} \times \left(\frac{dP}{dt} \right)_{m\acute{a}x} \quad [\text{bar. m. s}^{-1}] \quad (2.4)$$

Sendo V_0 o volume da câmara de explosão.

O valor de K_{st} permite classificar os pós numa determinada classe de explosividade, de acordo com a Tabela 1:

Tabela 1 – Classificação da explosividade dos pós, em função de K_{st} (EN14034 – 2).

Classe de explosividade	K_{st} [bar.m.s ⁻¹]
S _t 1	> 0 - 200
S _t 2	201 - 300
S _t 3	> 300

2.3. Teoria de propagação de chama laminar de gases

Os conceitos relativos à propagação da chama numa explosão de suspensão de poeiras são adotados a partir da teoria de propagação de explosões de gases, existindo conceitos teóricos e dados experimentais que o comprovam (Eckhoff, 1997).

A taxa linear a que uma onda de combustão laminar ou zona de reação se propaga relativamente ao gás não queimado é denominada velocidade fundamental de queima, S_u . A zona de reação, ou frente de chama numa explosão de gás é, normalmente, da ordem de 1mm. De acordo com a teoria clássica de Mallard-le Chatelier (1883) (*apud* Eckhoff, 1997), a velocidade fundamental de queima laminar de uma mistura de gás, é representada pela equação (2.5):

$$S_u = \frac{\lambda(T_b - T_i)}{\rho \times c_p \times l \times (T_i - T_u)} \quad (2.5)$$

Sendo:

- λ a condutividade térmica da mistura não queimada;
- ρ a densidade da mistura não queimada;
- c_p o calor específico da mistura não queimada;
- T_b a temperatura dos produtos queimados;
- T_i a temperatura de ignição;
- T_u a temperatura dos reagentes não queimados;
- l a espessura da frente de chama.

A velocidade de propagação da frente de chama, relativamente a um observador num ponto fixo, pode ser definida pela equação (2.6):

$$S_f = S_u + S_g \quad (2.6)$$

Onde S_g é a componente da velocidade do gás devida à expansão dos gases produtos da combustão.

2.4. Teoria de propagação de chama laminar unidimensional em nuvens de pós

Desenvolveram-se diversos modelos para o estudo da propagação de chama em explosões de suspensões de pós, sendo estes referidos por Eckhoff (1997). Um dos modelos citados foi descrito por Hertzberg et al. (1982) (*apud* Eckhoff, 1997) e Hertzberg et al. (1987) (*apud* Eckhoff, 1997). Estes autores assumiram a existência de três processos que sequenciam a propagação de chama através de uma mistura pó/ar:

1. Aquecimento e desvolatilização das partículas de pó;
2. Misturas dos voláteis emitidos com o ar;
3. Combustão na fase gasosa da mistura ar/voláteis.

Definiram-se três constantes de tempo características para os três processos consecutivos descritos: τ_d , τ_m e τ_c . Constatou-se que o processo de aquecimento e desvolatilização das partículas é uma combinação complexa de trocas de calor por condução, convecção e radiação entre os produtos queimados e os reagentes não queimados. No entanto, a abordagem ao problema foi simplificada considerando estes processos implicitamente na velocidade fundamental de queima S_u , que caracteriza a velocidade de propagação da chama. Uma chama laminar propagando-se à velocidade S_u , tem uma espessura da frente de chama de $\delta = \alpha / S_u$, onde α é a difusibilidade efetiva do gás ao longo da frente de chama. O tempo médio de reação para espécies que passam através da zona de reação é $\tau = \delta / S_u$ e, portanto:

$$S_u = \sqrt{\frac{\alpha}{\tau}} \quad (2.7)$$

Por definição, τ é dado pela soma das três constantes de tempo referidas. De acordo com Hertzberg et al. (1982) (*apud* Eckhoff, 1997), o processo de mistura é muito mais rápido que os outros e, para pequenas partículas, $\tau_d \ll \tau_c$. Nesta situação o processo é controlado pelo tempo de combustão. Para partículas maiores assume-se que a fração das partículas que desvolatilizam no instante t , depois de a partícula ter entrado na zona de reação, define-se como:

$$\theta = 1 - \left[1 - \frac{2 \times x_0 \times t}{D_0} \right]^3 \quad (2.8)$$

Sendo x_0 a velocidade com que a onda de pirólise/desvolatilização progride no interior de uma partícula esférica de diâmetro inicial D_0 . Assume-se, também, que:

$$x_0 = k \times S_u \times c_p \times \rho \times (T_b - T_u) \quad (2.9)$$

Onde k é a constante de velocidade para o processo de pirólise/desvolatilização e ρ é a densidade da mistura não queimada. Para partículas mais grossas e maiores

concentrações de pós, o processo de aquecimento e desvolatilização controla o processo de propagação de chama, sendo $\tau_d \gg \tau_c$.

2.5. Teoria de propagação de chama laminar em reatores fechados

As características explosivas de suspensões de pó e gases são semelhantes, também, no caso de explosões em reatores fechados. O desenvolvimento de explosão numa câmara esférica fechada foi estudado, teoricamente, por Nagy et al. (1969) (*apud* Eckhoff, 1997). Este estudo foi incluído no livro de Nagy e Verakis (1983) (*apud* Eckhoff, 1997). Neste sistema de explosões, assume-se que:

- A equação de estado para os gases perfeitos é aplicável;
- A ignição é feita no centro da esfera e a sua energia é desprezável face à explosão;
- A viscosidade e os calores específicos permanecem constantes;
- A velocidade de queima é pequena comparada com a velocidade do som isto é, a pressão é espacialmente uniforme ao longo da câmara em qualquer instante;
- A espessura da zona de reação de propagação é negligenciável quando comparada com o raio do reator.

A velocidade da frente de chama S_f , na câmara fechada, foi considerada a soma de três velocidades, a velocidade fundamental de queima S_u , a velocidade de expansão do gás devida à alteração química do número de moléculas S_n , e a velocidade de expansão do gás devido ao aquecimento S_e .

A dependência de S_u em relação à pressão P e temperatura T_u da mistura não queimada foi relacionada como:

$$S_u = S_{u,r} \left(\frac{T_u}{T_r} \right)^2 \times \left(\frac{P_r}{P} \right)^\beta \quad (2.10)$$

Onde, a sigla r refere-se ao estado de referência de 300 K e pressão atmosférica. β é uma constante empírica que é igual a 0,5 ou menor para os gases.

Inicialmente analisou-se o processo de propagação da chama como sendo um processo “isotérmico”, considerando T_u constante e igual a T_0 antes da ignição e a temperatura dos produtos de combustão T_b constante e igual à temperatura final T_m , quando toda a mistura se queimou e a chama atingiu as paredes do reator. Resulta, destas hipóteses simplificadoras a equação (2.11), para a velocidade de aumento de pressão:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{3S_{u,r} \times T_0^2 \times P_r^\beta \times P_m^{2/3}}{R \times T_r^2 \times P_0} \times (P_m - P_0)^{1/3} \times \left(1 - \frac{P_0}{P}\right)^{2/3} \times P^{(1-\beta)} \quad (2.11)$$

Onde R é o raio do reator e P_m a pressão quando a chama atinge a parede da câmara.

Considerando $T_0 = T_r$, $P_0 = P_r$, $S_{u,0} = S_{u,r}$, $\beta = 0$ e $P = P_m$ obtém-se a velocidade máxima de aumento de pressão:

$$\left(\frac{dP}{dt}\right)_{máx} = \frac{3S_{u,0}}{R} \times (P_m - P_0) \times \left(\frac{P_m}{P_0}\right) \quad (2.12)$$

Esta equação mostra que $(dP/dt)_{máx}$ é inversamente proporcional ao raio do reator, ou seja, à raiz cúbica do volume da câmara, de acordo com a denominada “Lei Cúbica”. No entanto, esta análise também demonstra as condições específicas em que a “Lei Cúbica” é válida. Estas condições foram explicitamente apontadas por Eckhoff (1984/1985 e 1986) (*apud* Eckhoff, 1997) numa análise simplificada. A espessura da zona de reação tem de ser negligenciável em comparação com R , e $S_u(T_u, P)$ tem de ser independente de R .

Nagy et al. (1969) (*apud* Eckhoff, 1997) alteraram o tratamento isotérmico e passaram a assumir um tratamento adiabático mais realista, no qual T_u e T_b não são constantes:

$$T_u = T_0 \times \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{Y_u-1}{Y_u}} \quad (2.13)$$

$$T_b = T_m \times \left(\frac{P}{P_m}\right)^{\frac{\gamma_b-1}{\gamma_b}} \quad (2.14)$$

Onde γ_u e γ_b são valores da razão dos calores específicos a pressão e volume constante da mistura não queimada e queimada. Os cálculos foram simplificados admitindo um valor médio de γ , negligenciando a diferença entre γ_u e γ_b . Assumindo que as condições iniciais $S_{u,0}$, T_0 e P_0 são iguais às condições de referência $S_{u,r}$, T_r , e P_r e contabilizando o parâmetro γ , obtém-se a equação (2.15):

$$\frac{dP}{dt} = \frac{3S_{u,0}}{R} \times \frac{\gamma P_m^{\left(\frac{2}{3}\right)\gamma}}{P_0^{\left(\frac{2-1}{\gamma-\beta}\right)}} \times \left(P_m^{\frac{1}{\gamma}} - P_0^{\frac{1}{\gamma}}\right)^{\frac{1}{3}} \times \left[1 - \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{1}{\gamma}}\right]^{\frac{2}{3}} \times P^{\left(\frac{3-2}{\gamma-\beta}\right)} \quad (2.15)$$

2.6. Propriedades da suspensão de poeiras que influenciam a ignição e violência de explosão

De seguida referenciam-se as principais propriedades da suspensão de poeiras que têm influência nos parâmetros de explosividade da mesma, apresentando a justificação teórica para o seu efeito comprovada com os resultados de vários trabalhos práticos de diferentes autores. Desses resultados experimentais, refere-se com particular incidência o trabalho apresentado por Cashdollar (1996). Este trabalho foi realizado no âmbito de uma pesquisa para “US Bureau of Mines”, entidade que se dedica ao estudo da explosividade de suspensões de poeiras. O seu objetivo foi a promoção da segurança em atividades mineiras e outras indústrias que processem ou utilizem carvão. A maioria dos ensaios laboratoriais foi realizada numa câmara de explosão de 20 l, recorrendo a ignidores pirotécnicos com 2,5 kJ de energia e testou um pó de carvão betuminoso denominado *Pittsburgh*.

2.6.1. Humidade

A presença de humidade nas suspensões de poeiras dificulta o processo de ignição e diminui a violência de explosão. Este efeito é complexo e engloba vários fatores. Primeiro, a evaporação e o aquecimento da água provocam dissipação de calor. Em segundo, o vapor de água mistura-se com os gases de pirolise na zona de pré-aquecimento da onda de combustão, tornando a mistura de gás menos reativa. Por último, a humidade aumenta a coesão entre as partículas de pó, o que dificulta o processo de dispersão.

2.6.2. Granulometria

Os parâmetros de explosividade têm uma dependência clara do tamanho das partículas de pó, sendo os pós mais finos, globalmente, mais explosivos. No entanto, a explosividade dos pós não aumenta indefinidamente à medida que diminui o tamanho das partículas.

No caso do carvão e materiais orgânicos existe desvolatilização das partículas antes da combustão, que ocorre inicialmente em fase gasosa homogênea. O tamanho limite das partículas, abaixo do qual a taxa de combustão deixa de aumentar, depende da relação entre as constantes de tempo de três processos consecutivos: desvolatilização, mistura dos gases e combustão em fase gasosa. O tamanho das partículas influencia, essencialmente, a taxa de desvolatilização. Portanto, se a combustão, em fase gasosa, for o processo mais lento dos três considerados, o aumento da taxa de desvolatilização devido à diminuição do tamanho das partículas não vai aumentar a taxa de combustão final. Determinou-se o referido tamanho limite das partículas de carvão como sendo 50 μm (Eckhoff, 1997).

Para o caso de pós metálicos, o tamanho limite das partículas abaixo do qual não existe aumento da violência da ignição e explosão, é consideravelmente menor do que a maioria dos pós orgânicos. Isto acontece porque estes metais não desvolatilizam, apenas fundem, evaporam e queimam. Cashdollar (1994) (*apud* Eckhoff, 1997) indica diâmetros característicos de 20 μm e 15 μm para os pós de alumínio e ferro, respetivamente.

A partir do estudo conduzido por Cashdollar (1996) verificou-se, experimentalmente, a influência da granulometria no processo de explosão de suspensões de partículas de pó de carvão. Encontra-se representado na Figura 3 o efeito da granulometria em três parâmetros de explosividade da suspensão de poeiras: pressão e velocidade de aumento de pressão de explosão máximas e CME.

O valor da CME é relativamente independente do diâmetro das partículas, para o caso de partículas finas. Para partículas maiores, acima de 100 μm , o valor CME sobe com o aumento do seu diâmetro, até um ponto em que deixa de ser possível a ignição. Na zona inicial do gráfico C da Figura 3, existe uma completa desvolatilização das partículas mais finas, sendo os voláteis combustíveis provenientes das partículas finas e a reação dos hidrocarbonetos desvolatilizados, queimando homoganeamente em fase gasosa, que determinam a concentração mínima de explosão. A zona do gráfico em que se verifica um aumento exponencial da CME explica-se com a diminuição da taxa de desvolatilização das partículas de maiores dimensões, para as quais apenas a sua superfície sofre desvolatilização e é, portanto, necessário uma maior concentração de pó para gerar a concentração mínima de voláteis combustíveis na fase gasosa. O processo de combustão passa, neste caso, a ser controlado pela velocidade de desvolatilização.

Realçam-se, então, dois diâmetros de partículas: o diâmetro característico acima do qual passa a haver uma dependência da concentração mínima de explosão em relação ao tamanho das partículas e o diâmetro crítico, dimensão de partículas a partir da qual deixa de haver explosão, qualquer que seja a concentração de pó utilizada.

Este comportamento tem a ver com o mecanismo de propagação da chama, que para muitos pós se deve à combustão em fase gasosa dos voláteis emitidos pelas partículas aquecidas até ao ponto de desvolatilização ou pirólise, sendo a queima do resíduo carbonoso de menor importância para intervalos de tempo característicos de explosões de pós (Eckhoff, 1997).

A pressão máxima de explosão, conforme se verifica no gráfico A da Figura 3, diminui lentamente numa fase inicial com o aumento do diâmetro das partículas e decresce depois, abruptamente, à medida que a granulometria se aproxima de 200 μm . Inicialmente o aumento do tamanho das partículas é compensado pelo aumento da sua área superficial, no entanto, a partir de determinados valores atingem-se condições em que não é possível gerar, em fase gasosa, a concentração mínima de explosão no intervalo de tempo disponível para a passagem da frente de chama (Semenova, 2005).

A velocidade máxima de aumento de pressão explosão, conforme ilustrado no gráfico B da Figura 3, diminui rapidamente com o aumento do tamanho das partículas de pó, devido à diminuição da velocidade de desvolatilização. A fração de matéria não desvolatilizada aumenta com o aumento do tamanho da partícula e esta funciona como um

absorvedor de parte da energia proveniente da frente de chama, reduzindo o fluxo efetivo de energia que alimenta a onda de desvolatilização, o que provoca uma diminuição acentuada da velocidade fundamental de queima e conseqüentemente da velocidade máxima de aumento de pressão (Semenova, 2005).

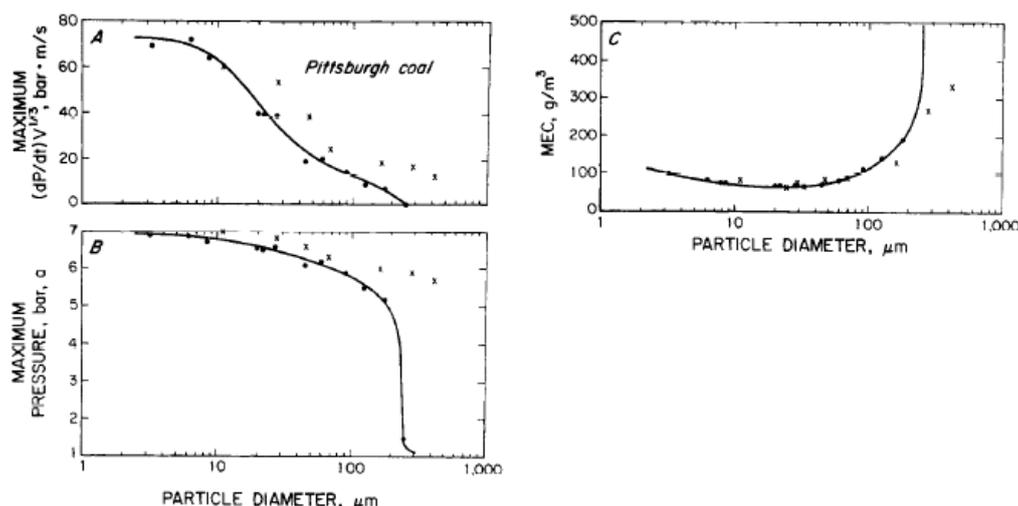


Figura 3 – Efeito do tamanho das partículas de pó na explosibilidade do carvão de Pittsburgh (Cashdollar, 1996).

2.6.3. Concentração

A quantidade de pó em suspensão com o ar é um dado determinante relativamente à possibilidade da ocorrência e violência de uma explosão.

A CME é a menor concentração de uma poeira combustível, misturada com ar, para a qual ainda ocorre explosão. A medida da CME é a base para a identificação de perigo e prevenção da ocorrência de explosões. Na Tabela 2, apresentam-se os seus valores para diversos tipos de pós.

Tabela 2 - Concentrações limite inferiores de inflamação indicativas para suspensões de várias partículas correntes (Campos, 1984).

Natureza das poeiras	Concentração limite de inflamação [g/m ³]
Carvão	40 a 60
Cereal	40 a 80
Poliétileno	20
PV Butyral	20
Resinas epóxicas	20
Farinha	50
Serradura	35

Procurou-se, também, determinar um limite de concentração de pó superior, acima do qual não ocorre explosão e Cashdollar (1996) estudou este parâmetro para o pó de carvão betuminoso de Pittsburgh e do polietileno, concluindo que ainda ocorrem explosões para valores de concentração próximos de 4000 g.m⁻³, conforme é ilustrado na Figura 4. No entanto, não existem valores consensuais, para quantificar este parâmetro para o caso dos pós, podendo-se, apenas, afirmar que quando o combustível se encontra em grande excesso em fase gasosa existe um decréscimo do valor de pressão adiabática (Semenova, 2005).

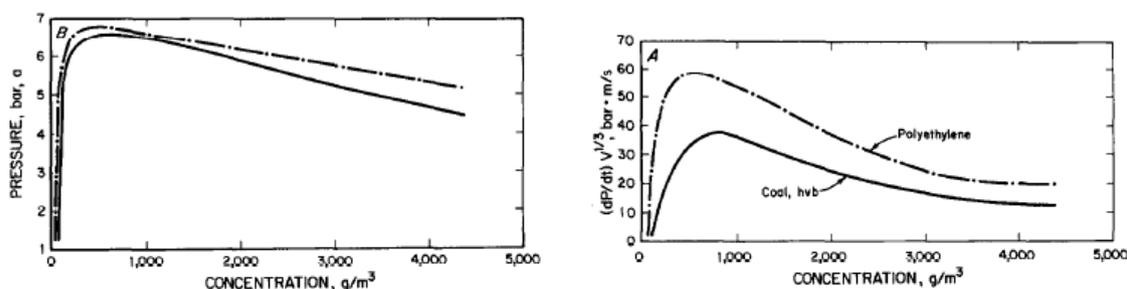


Figura 4 - Explosividade de um carvão betuminoso com alto teor em voláteis e de um pó de polietileno (Cashdollar, 1996).

Realizaram-se ensaios a partir dos quais se comparam os valores da pressão máxima de explosão de pó de carvão betuminoso, polietileno e gás metano (Cashdollar 1996). Conforme é visível na Figura 5, os pós têm um comportamento explosivo diferente do gás metano, que apresenta um valor máximo de pressão e depois decresce rapidamente, apresentando um limite superior de explosividade, ao contrário dos pós.

De acordo com a teoria da explosão de misturas gasosas, a pressão de explosão deveria diminuir para elevadas concentrações de pó, devido ao fato da mistura se tornar

não explosiva quando o combustível se encontra em grande excesso em fase gasosa (Semenova, 2005).

Pode-se concluir que as diferenças entre as previsões termodinâmicas e os resultados experimentais, referentes aos pós, explicam-se com a limitação da desvolatilização das partículas sólidas que não é contabilizada na teoria de explosão de misturas gasosas. Esta teoria prevê a desvolatilização completa do pó, o que não acontece na prática, porque não é possível desvolatilizar completamente o pó no tempo disponível até à passagem da frente de chama. Deste modo não se atinge o ponto de excesso de combustível.

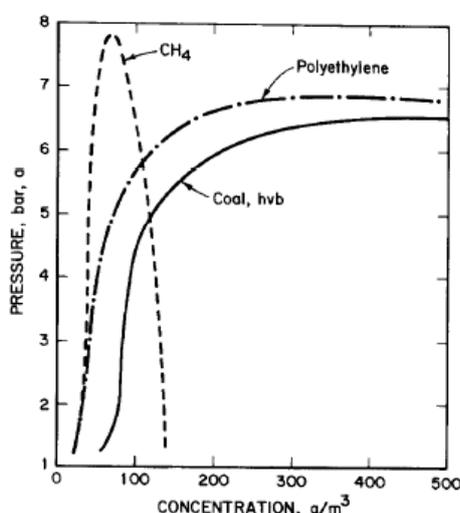


Figura 5 - Explosividades do pó de carvão betuminoso com alto teor em voláteis, do pó de polietileno e do gás metano (Cashdollar, 1996).

Existem, portanto, limites de explosividade superior ou inferior para a concentração do pó, abaixo ou acima dos quais não ocorre explosão, segundo a teoria de explosões de gases. Entre estes dois patamares, observa-se que a pressão e velocidade de aumento de pressão de explosão máximas aumentam com a concentração de pó, apresentando a partir de determinados valores tendência para estabilizar. Este efeito foi estudado por Cashdollar (1996) e os resultados experimentais encontram-se ilustrados nos gráficos da Figura 6.

No caso da pressão máxima, representada no gráfico C da Figura 6, o ponto para o qual se inicia a estabilização explica-se com o facto de todo o oxigénio existente no interior da câmara de explosão ser consumido a partir de uma determinada concentração de voláteis. Com o aumento da concentração de pó, o processo de combustão continua a

desenrolar-se perto da concentração estequiométrica de voláteis, gerando pressões e temperaturas de explosão elevadas e aproximadamente constantes (Semenova, 2005).

Segundo a teoria de propagação de chama sugerida por Hertzberg (1982) (*apud* Semenova, 2005) para pequenas concentrações de pó a velocidade de queima S_u é baixa e existe tempo para que haja uma elevada taxa de desvolatilização das partículas até à passagem da frente de chama. Com o aumento da concentração a velocidade de queima S_u aumenta rapidamente, o que se traduz num aumento da velocidade máxima de aumento de pressão conforme mostra a equação (2.12). No entanto, com o aumento da velocidade de queima existe menos tempo para que haja desvolatilização das partículas até ao instante da passagem da frente de chama, diminuindo a fração mássica de voláteis que desvolatilizam a tempo de contribuir para a frente de chama. Enquanto a menor contribuição de voláteis provenientes de cada partícula for compensada pelo aumento da concentração inicial de pó, verifica-se aumento dos valores máximos de pressão, temperatura e velocidade de aumento de pressão.

No caso dos pós existe uma zona de elevadas concentrações de pó onde a velocidade de queima se mantém aproximadamente constante (Semenova, 2005). Este comportamento deve-se ao facto de que a velocidade a que se geram os voláteis em fase gasosa não ser significativamente afetada. Esta observação deve-se à diminuição da velocidade de desvolatilização ser compensada pelo aumento da concentração nominal de pó. O patamar de estabilização de velocidade máxima de aumento de pressão encontra-se representado no gráfico B da Figura 6.

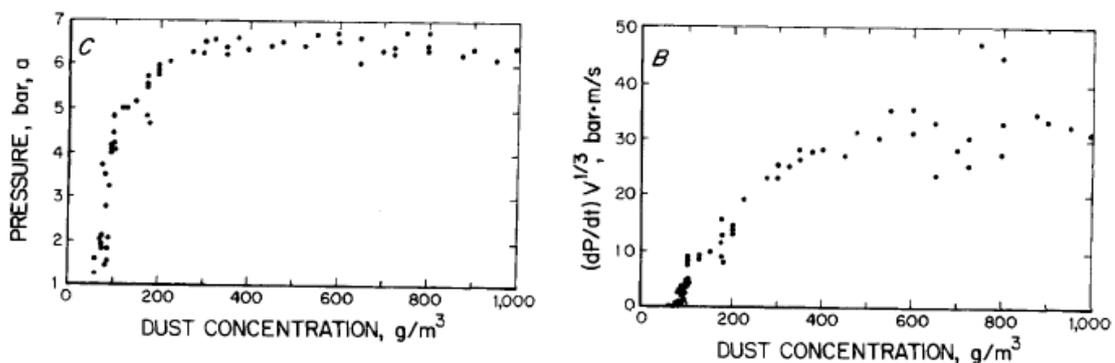


Figura 6 - Explosividade do pó de carvão de Pittsburgh, pulverizado numa câmara de explosão de 20 l (Cashdollar, 1996).

2.6.4. Turbulência

Em termos práticos, turbulência no presente contexto é um estado de “cinética” interno, de maior ou menor grau de movimento relativo entre as pequenas partículas da suspensão de pó, em três dimensões. Durante a queima da nuvem de pó, a turbulência favorece a mistura das partículas queimadas com as partículas por queimar, e a nuvem terá um tipo de propagação laminar tridimensional de zonas alternadas quentes dos produtos queimados e frias com partículas por queimar. Portanto uma nuvem de pó turbulenta irá queimar muito mais rapidamente do que uma única chama plana propagando-se através de uma nuvem de pó em repouso (Eckhoff, 1997).

No contexto das explosões de pó definem-se dois tipos de turbulência, diferindo na sua origem. O primeiro é a turbulência gerada no processo industrial em que a nuvem de poeira é formada, ou seja a turbulência inicial. O segundo tipo é gerado pela própria explosão através da expansão do fluxo de gases não queimados a jusante da frente de chama. O nível de turbulência, neste caso, depende da velocidade do fluxo de combustão e da geometria do sistema (Eckhoff, 1997).

A Figura 7 mostra um exemplo característico da influência da turbulência inicial na explosividade de pós em câmaras fechadas. A nuvem de pó é formada através da dispersão de uma massa de pó que é pressurizada com ar. Logo após a dispersão, a turbulência pode ser bastante elevada, mas diminui com o passar do tempo, existindo deposição do pó. Portanto, se forem realizados ensaios experimentais com os mesmos pós, em sistemas de ensaios idênticos, mas com intervalos de tempo diferentes entre a dispersão e ignição, a turbulência inicial será diferente. Conforme se vê no gráfico A da Figura 7, a pressão máxima de explosão diminui com o aumento do intervalo de tempo de ignição e, portanto, com a diminuição da turbulência. No entanto, a pressão de explosão mantém-se aproximadamente constante até valores de tempo próximos do 200 ms, o que reflete o facto de que a pressão máxima é, essencialmente, um processo termodinâmico, ao contrário da velocidade máxima de aumento de pressão que apresenta uma forte componente cinética e por essa razão é visível, no gráfico B da Figura 7, uma descida muito mais pronunciada com o aumento do intervalo de tempo de ignição (Eckhoff, 1997).

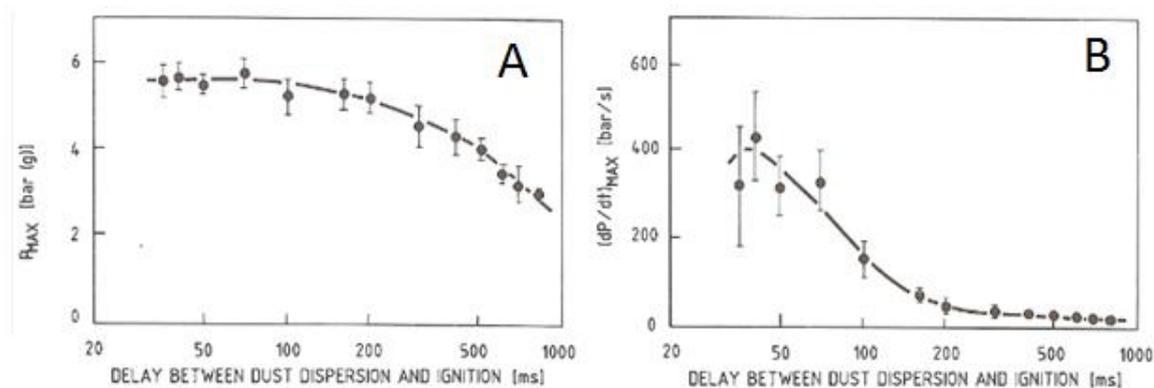


Figura 7 - Influência da turbulência inicial na explosibilidade de uma nuvem de pó (Eckhoff, 1977).

2.6.5. Concentração de Oxigénio

O oxigénio é um elemento necessário para a ocorrência de uma explosão. Quanto maior for a concentração de oxigénio, maior será a probabilidade de ocorrência de uma explosão e maior será a sua violência.

A CLO é a máxima concentração de oxigénio numa mistura de pó/ar/gás inerte, para a qual não podem ocorrer explosões de pó. A medida da concentração limite de oxigénio constitui a base para a prevenção de explosões através de um processo de inertização (EN 14034-4).

Uma das formas de prevenir uma explosão de pó é através da inertização da atmosfera, fazendo com que haja uma quantidade de oxigénio insuficiente para a propagação da chama. Um dos gases regularmente utilizados neste processo é o azoto, que é o principal constituinte do ar. Para determinar a concentração limite de oxigénio para explosões de pós de carvão, Cashdollar (1996) realizou ensaios nos quais os pós foram dispersos com diferentes relações da mistura oxigénio/azoto em vez do ar normal, que contém 20,9% de oxigénio. A Figura 8 representa o efeito da redução da concentração de oxigénio na explosividade de pó de carvão. Os ensaios em que se verificou a ocorrência de explosão encontram-se representados por círculos fechados e os ensaios não explosivos por círculos abertos. Começaram por se realizar ensaios com ar, conforme ilustrado na parte superior do gráfico e, com a redução da percentagem de oxigénio, apenas se verificam explosões para maiores concentrações de pó. Conclui-se que a CLO é $11 \pm 0,5\%$.

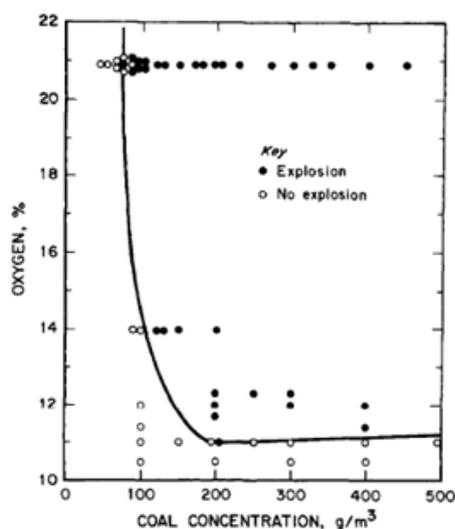


Figura 8 - Efeito do teor em oxigénio na explosividade do pó de carvão (Cashdollar, 1996).

Wiemman (1984) (*apud* Eckhoff, 1997) estudou a influência da quantidade de oxigénio na mistura oxigénio/azoto nos valores da pressão e velocidade de aumento de pressão de explosão máximas para um pó de carvão, num reator fechado de 1m³. Os resultados, ilustrados na Figura 9, mostram que ambos os parâmetros diminuem com a diminuição da quantidade de oxigénio e que a zona da concentração de pó estreita-se, em particular, no lado rico da mistura.

Conclui-se que a pressão máxima de explosão apresenta uma redução aproximadamente proporcional à diminuição do teor em oxigénio, enquanto a redução da velocidade máxima de aumento de pressão é muito mais acentuada, o que demonstra a forte influência da quantidade inicial do oxigénio na cinética do processo de combustão. O maior valor de percentagem de oxigénio, em que ainda se regista a ocorrência de explosão é 11,5%, resultado que se encontra na gama de valores referidos por Cashdollar (1996).

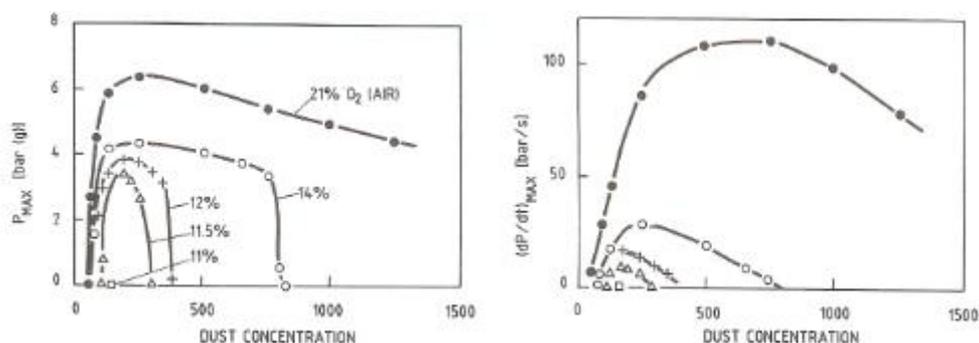


Figura 9 - Influência do teor em oxigénio na pressão e velocidade máxima de aumento de pressão de explosão de carvão castanho (Eckhoff, 1997).

Hertzberg e Cashdollar (1987) (*apud* Eckhoff, 1997) estudaram a influência da quantidade de oxigénio do gás oxidante no valor da CME de carvão, com alto teor em voláteis. Os resultados experimentais encontram-se ilustrados na Figura 10 e conclui-se que para partículas com tamanho inferior a 10 μm , a redução do teor em oxigénio provoca apenas um aumento moderado da CME. No entanto, com o aumento do tamanho das partículas, a influência da redução do conteúdo de oxigénio torna-se cada vez mais pronunciado.

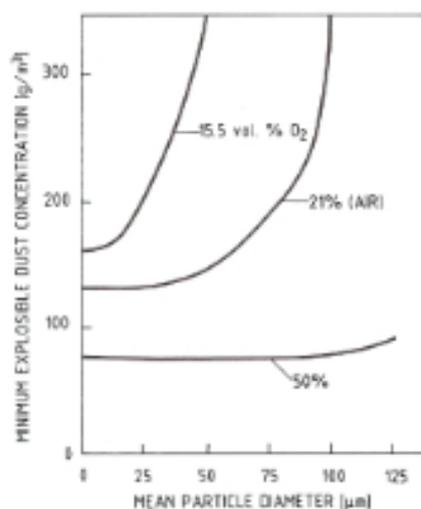


Figura 10 - Influência do teor em oxigénio na concentração mínima de pó de explosão de pó de carvão (Eckhoff, 1997).

2.6.6. Temperatura

A influência da temperatura inicial da suspensão de poeiras sobre os parâmetros de explosividade do carvão foi alvo de diversos estudos, de diferentes autores.

Wiemann (1987) e Glarner (1983) (*apud* Eckhoff, 1997) verificaram, para vários pós de carvão e outros pós orgânicos, que a concentração mínima de pó de explosão decresce com o aumento da temperatura inicial. Os resultados deste estudo encontram-se ilustrados na Figura 11:

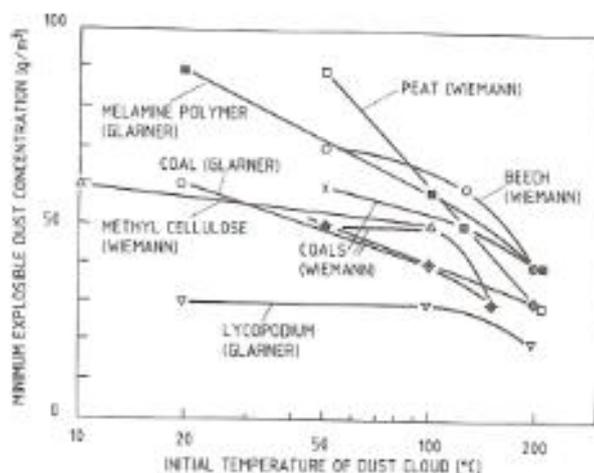


Figura 11 - Influência da temperatura inicial de suspensões de pó sobre a concentração mínima de pó de explosão (Eckhoff, 1997).

Wiemann (1987) (*apud* Eckhoff, 1997) estudou o efeito da temperatura inicial sobre a pressão e velocidade de aumento de pressão de explosão máximas. Registrou-se que a pressão máxima de explosão diminui com o aumento da temperatura inicial devido à redução da concentração de oxigênio por unidade de volume de uma suspensão de pó, para uma dada pressão inicial. O efeito da temperatura na velocidade máxima de aumento de pressão é menos claro e reflete as complexas relações cinéticas envolvidas neste processo. Os resultados práticos deste estudo encontram-se representados na Figura 12.

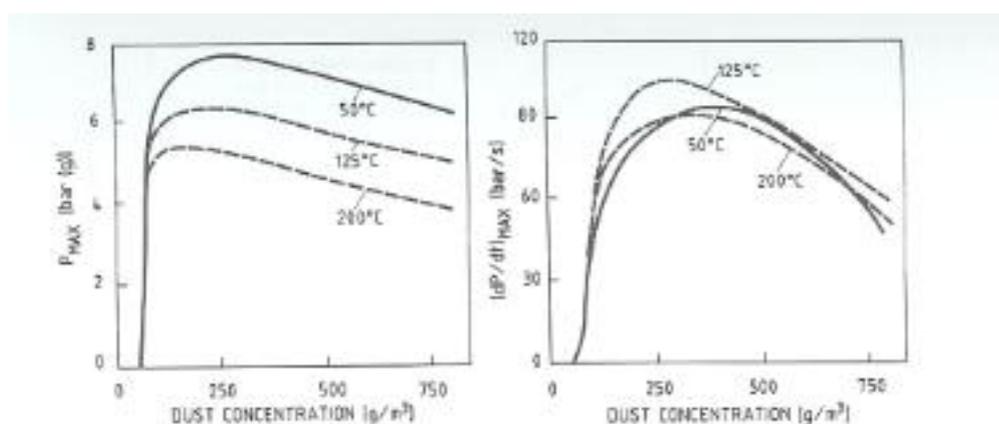


Figura 12 - Influência da temperatura inicial na explosão de uma suspensão de pó de carvão (Eckhoff, 1997).

O efeito da temperatura na ignição e explosividade de pó de carvão de Pittsburgh está representado na Figura 13. A curva representada por vários pontos mostra a

temperatura de autoignição para o pó em função da sua concentração. Esta curva é a temperatura de fronteira entre a zona superior do gráfico onde a suspensão de pó apresenta autoignição térmica e a zona inferior onde o pó pode ser inflamável mas não existe autoignição nestas condições. Para maiores concentrações de pó, a temperatura limite de ignição baixa para valores a rondar os 530 °C. Esta é a temperatura mínima de autoignição para este pó.

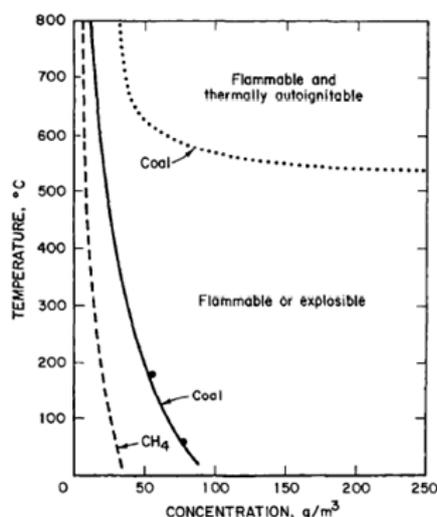


Figura 13 - Efeito da temperatura na inflamabilidade e ignição térmica no carvão de Pittsburgh e no gás metano (Cashdollar, 1996).

2.7. Fontes de ignição

A palavra “ignição” apenas tem significado quando aplicada a substâncias que tenham capacidade para propagar uma onda de combustão autossustentável ou com decomposição exotérmica. Ignição pode definir-se como sendo o processo pelo qual a propagação é iniciada. A ignição ocorre quando a taxa de geração de calor, num dado volume, excede a taxa de dissipação, provocando a subida de temperatura (Eckhoff, 1997).

Em aplicações industriais são diversas as fontes de ignição que podem iniciar explosões. Podem, por exemplo, existir fontes de ignição devido a cargas electroestáticas variadas. Podem também resultar de faíscas provocadas por elementos elétricos de acionamento e de comando mal isolados ou por atrito entre partes metálicas, tais como rotores e estatores de motores e ventiladores. São ainda de considerar situações de impactos acidentais entre peças e ferramentas, quer devidos a condicionamentos dos

processos de fabricação e tecnológicos que não foram devidamente ponderados, ou por causas acidentais, como é o caso da queda de ferramentas ou pequenos componente mecânicos ou acessórios.

Os ensaios de estudo dos parâmetros de explosividade de suspensões de pós em câmaras fechadas utilizam fontes de ignição com energia tão forte quanto o necessário para assegurar que o resultado é independente da energia de ignição, mas que ao mesmo tempo não seja excessivamente elevado para não sobre-induzir pressões e temperaturas que conduzam a interpretações erradas sobre o início e desenvolvimento da explosão.

Segundo a norma EN 14034-1 os ensaios de determinação da pressão e velocidade de aumento de pressão de explosão máximas devem ser efetuados com fontes de ignição com energia de ignição de 10 kJ, enquanto a determinação da CME e da CLO devem ser realizadas com fontes de ignição de 2 kJ de energia. A composição mais comum dos ignidores pirotécnicos utilizados nestes trabalhos, e recomendadas pela norma EN 14034-1 apresentada até 2006, contém 40% de metal de zircónio, 30% de nitrato de bário e 30% de peróxido de bário. Em 2011 houve uma atualização da informação da norma referida e deixou de haver qualquer imposição relativamente à composição utilizada nos ignidores pirotécnicos, sendo apenas necessário cumprir os requisitos energéticos referidos. Quando ativados os ignidores devem libertar uma nuvem densa de muitas partículas quentes e pouco gás. Devido à impossibilidade de obtenção da composição recomendada pela norma referida, nos ensaios realizados no presente trabalho utilizou-se uma composição diferente nos ignidores pirotécnicos, o que implicou que a totalidade dos ensaios fosse realizada com fontes de ignição com 10 kJ de energia.

A influência da energia de ignição sobre a pressão e velocidade de aumento de pressão de explosão e a concentração mínima de pó de explosão de suspensões de poeiras de cortiça, encontra-se representada nas Figuras 14 e 15, respetivamente (R. Pilão et al., 2005).

A pressão máxima de explosão apresenta apenas uma ligeira influência da energia de ignição e a velocidade máxima de aumento de pressão decresce acentuadamente com a diminuição da energia de ignição (R. Pilão et al., 2005). Isto acontece porque a pressão máxima de explosão depende, essencialmente, da energia total libertada, enquanto a velocidade máxima de aumento de pressão depende da

concentração de pó e do nível de turbulência, sendo que este último fator aumenta com a subida da energia da fonte de ignição (R. Pilão et al., 2005).

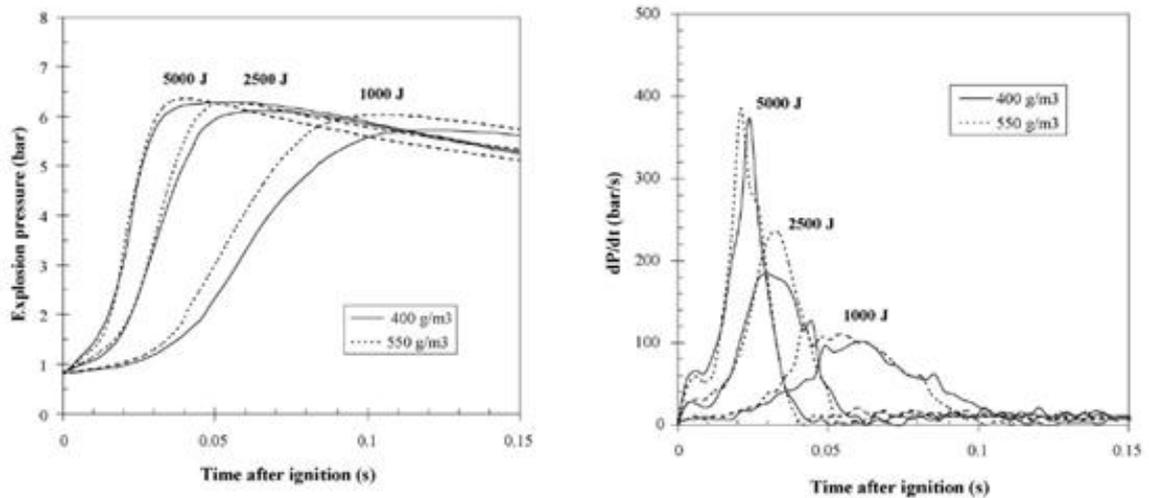


Figura 14 – Efeito da energia de ignição sobre a pressão e velocidade de aumento de pressão de explosão máximas (R. Pilão et al., 2005).

A CME aumenta com a diminuição da energia de ignição. À medida que a energia de ignição diminui, apenas se verifica a ocorrência de explosão para concentrações de pó mais elevadas.

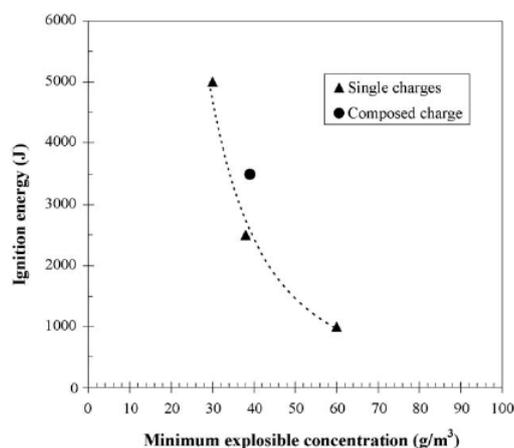


Figura 15 – Influência da energia de ignição na concentração mínima de explosão (R. Pilão et al., 2005).

3. SISTEMA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Descrição do sistema de ensaio

O sistema de ensaio normativo para determinar as características explosivas de suspensões de poeiras é, como já foi dito, o ensaio de explosão numa câmara de ensaio de 1 m³, preparada para suportar elevadas pressões. No entanto, e como também já foi citado, existe uma alternativa ao sistema de ensaio descrito, cuja conformidade foi provada: a câmara esférica de 20 l, que permite a realização dos ensaios de forma mais rápida e fácil (EN14034-1). Este último sistema, que se encontra instalado no Laboratório de Termodinâmica do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade de Coimbra (UC), é o utilizado para a realização do presente trabalho prático e encontra-se representado na Figura 48 do anexo F. Na Figura 16 encontra-se representado um esquema representativo da instalação experimental (EN 14034-1).

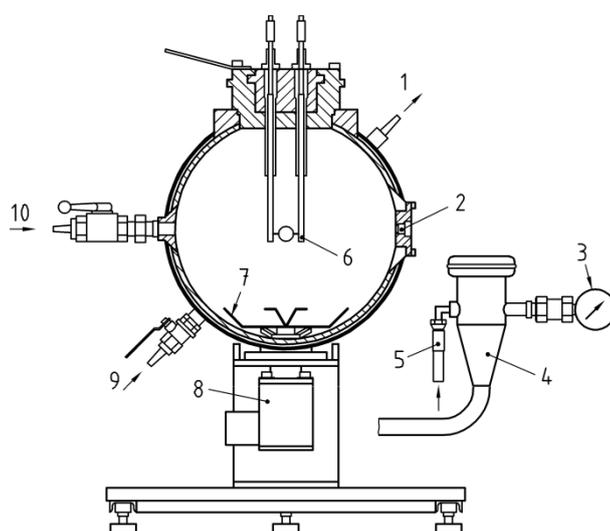
Este sistema é constituído por duas esferas ocas concêntricas. A explosão dá-se na esfera interior, que é resistente à explosão e feita em aço inox. Existe passagem de água em volta da parede exterior da câmara de explosão para dissipar o calor das explosões.

Nos ensaios experimentais, o pó é dispersado no interior da câmara de explosão, partindo de um recipiente de pó que se encontra pressurizado, através da abertura da eletroválvula e da passagem num dispersor de pó. A eletroválvula é acionada pneumáticamente. A fonte de ignição está localizada no centro da esfera e a ignição inicia-se através da descarga elétrica de uma bateria de 24 V. O sistema de medição de pressão é constituído por um sensor de pressão, um condicionador de sinal e equipamento de recolha de dados.

Antes da dispersão do pó deve ser feito vácuo de -0,6 bar, relativamente à pressão ambiente, para que depois da injeção do pó a pressão na esfera seja igual a 1013 mbar.

Os principais componentes do sistema de ensaio são:

- Câmara de explosão;
- Sistema de dispersão de poeiras;
- Fonte de ignição;
- Unidade de Controlo;
- Sistema de medição de pressão.



Legenda:

- | | | | |
|---|---------------------------|----|----------------------------------|
| 1 | Saída de água | 6 | Fonte de ignição |
| 2 | Sensor de pressão | 7 | Dispensor |
| 3 | Manómetro | 8 | Eletroválvula |
| 4 | Recipiente do pó (0,76 l) | 9 | Entrada de água |
| 5 | Entrada de ar | 10 | Saída de ar e produtos da reação |

Figura 16 - Sistema de ensaio da Esfera de 20 l (EN 14034-1).

3.1.1. Câmara de explosão

A câmara de explosão onde se realizam os ensaios experimentais tem forma esférica e um volume de 23,9 l, quantificado através da medição da massa de água colocada no seu interior, sendo esta informação apresentada no anexo B. A câmara

encontra-se representada na Figura 17 e foi projetada segundo as especificações indicadas na norma EN 14460.

A câmara é constituída por duas esferas concêntricas, tendo a esfera interior e exterior paredes com espessura de 5 e 2 mm, respetivamente. A esfera exterior tem duas aberturas para entrada e saída de água de refrigeração, garantindo assim que todos os ensaios realizados se iniciam nas mesmas condições de temperatura. Existem ainda três janelas laterais, com ligação à esfera interior, que possibilitam a colocação de sensores de pressão, uma saída onde é colocada uma mangueira com ligação ao exterior do edifício para evacuar a câmara depois de cada ensaio e ainda uma ligação à bomba de vácuo. O fundo da câmara encontra-se perfurado para a entrada do tubo através do qual o pó é transportado para o interior da câmara de explosão. No topo existe uma abertura na qual é enroscado o sistema de ignição. Depois de cada ensaio a esfera é aberta, possibilitando a sua limpeza.

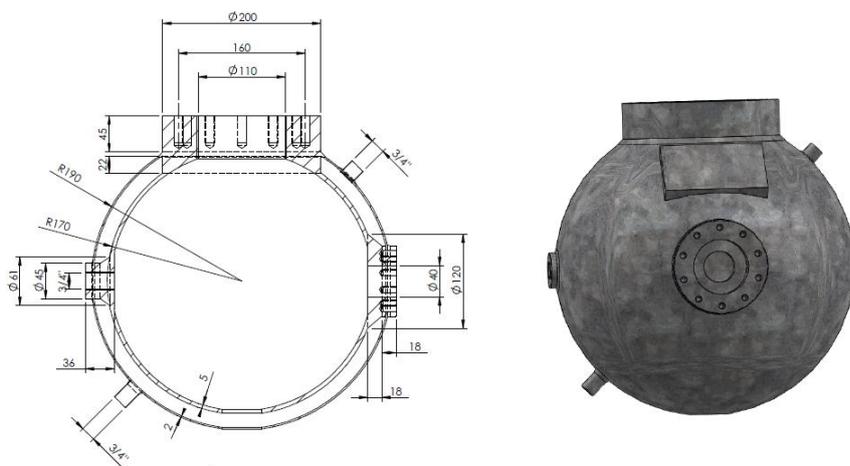


Figura 17 – Desenho da câmara de explosão, Solid Works.

O sistema de ignição, representado na Figura 18, é constituído por dois eléctrodos, onde é colocada a carga pirotécnica e aos quais se ligam os fios condutores que transmitem a descarga eléctrica da bateria.

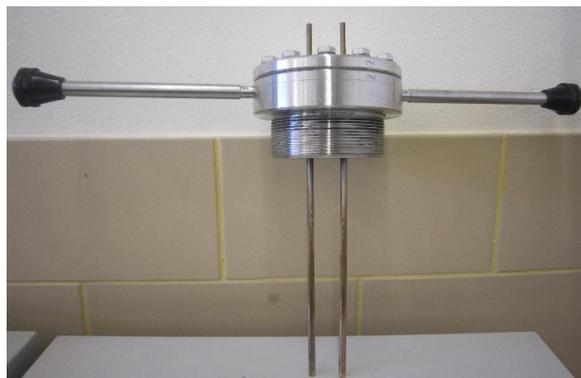


Figura 18 – Sistema de ignição.

3.1.2. Sistema de dispersão de pó

O pó para ser dispersado é colocado no interior de um recipiente de 0,76 l de volume, projetado para resistir a uma pressão interna de, pelo menos, 20 bar. O recipiente de pó tem uma saída na base, pela qual sai o pó. Esta saída encontra-se fechada pela eletroválvula, que é uma válvula de esfera de acionamento pneumático e deve ter um tempo de abertura de 30 a 50 ms (Manual 7.0 kuhner AG, 2011), no entanto, a eletroválvula utilizada no presente trabalho prático tem um tempo médio de abertura de 83 ms. Após a abertura da eletroválvula, devido à maior pressão existente no recipiente de pó, que é pressurizado a 18,89 bar, o pó entra para a câmara de explosão, através de um tubo que faz a ligação entre ambos. Este é o valor a que deve ser pressurizado o recipiente para que o acréscimo de pressão provocado na câmara, conforme indicado na norma EN 14034-1, seja de 0,6 bar (anexo D). A dispersão homogênea do pó na câmara de explosão é conseguida através da sua passagem pelo dispersor, que é um componente com pás curvas e vários furos e encontra-se localizado no fundo da câmara de explosão. O dispersor do pó encontra-se representado na Figura 19.



Figura 19- Dispersor de pó.

3.1.3. Fonte de ignição

Segundo indicação da norma EN 14034-1 a fonte de ignição deve ser constituída por dois ignidores pirotécnicos, ambos com a mesma energia. A energia total de ignição varia consoante o parâmetro de explosividade em estudo (EN14034-1).

Conforme referido no capítulo 2, geralmente utilizam-se ignidores pirotécnicos constituídos por 40% de metal de zircónio, 30% de nitrato de bário e 30% de peróxido de bário. No entanto, para a realização do presente trabalho não foi possível obter esta composição, pelo que se utilizou uma mistura de pólvora e alumínio, sendo estes elementos obtidos comercialmente com maior facilidade.

Na fase inicial do trabalho prático, correspondente à calibração do sistema de ensaio, utilizaram-se ignidores pirotécnicos constituídos por 83% de pólvora e 17% de alumínio (composição 1), mas para os ensaios que constituíram o restante trabalho prático utilizou-se a seguinte composição, 60% de pólvora e 40% de alumínio (composição 2). Esta alteração foi feita porque pretendeu-se que os ignidores pirotécnicos, depois de ativados, libertassem uma nuvem densa de partículas muito quentes e com pouco gás (EN 14034-1). Sendo a pólvora responsável pela formação de gás e o alumínio pela geração e transmissão de calor, tentou-se aumentar a percentagem de alumínio da mistura. Os ignidores pirotécnicos foram feitos no mesmo laboratório onde se realizam os ensaios de explosão e são constituídas por um iniciador pirotécnico, pela mistura de pólvora e alumínio e um cartuxo onde esta mistura é introduzida. A carga pirotécnica e os três elementos que a constituem encontram-se representados na Figura 20.

Através de um conjunto de sete ensaios realizados no calorímetro de bomba de oxigénio Parr 1341, instalado no laboratório de Termodinâmica do DEM da UC, determinou-se o poder calorífico superior (PCS) das duas composições anteriores, obtendo-se para a composição 1 um valor de 9,08 kJ/g e para a composição 2 um valor de 11,45 kJ/g. A partir destes dados determinou-se a massa da mistura a colocar em cada carga pirotécnica consoante a energia pretendida. Conforme referido na norma, o aumento de pressão provocado somente pela queima dos ignidores pirotécnicos, com 10 kJ de energia, não deve ser superior a 1,6 bar. Fizeram-se dois ensaios para determinar o aumento de pressão provocado pela queima dos ignidores pirotécnicos utilizados neste trabalho com a composição de 60% de pólvora e 40% de alumínio, obtendo-se um valor médio de 0,44 bar. Conforme é analisado no capítulo seguinte, houve necessidade de

utilizar uma energia de ignição de 10 kJ para todos os ensaios realizados, dado que se pôde verificar experimentalmente que a fonte de ignição utilizada, com uma energia de 2 kJ, não tem capacidade para provocar uma explosão, qualquer que seja a concentração de pó utilizada.

Os resultados e procedimento de cálculo do PCS encontram-se representados no anexo C.

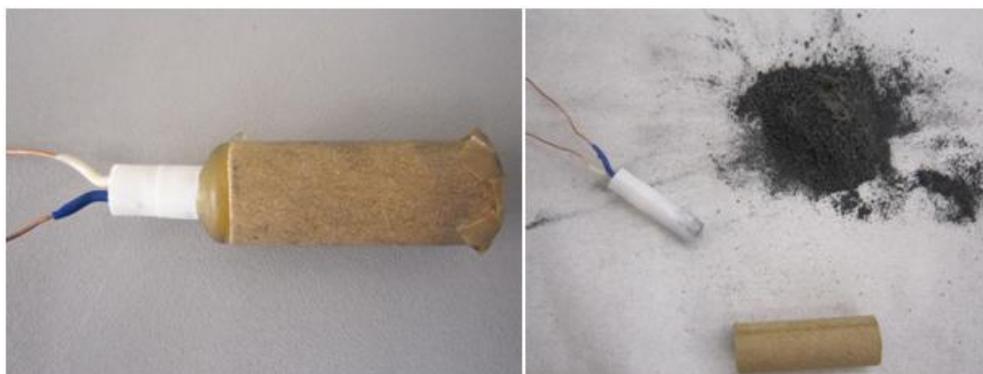


Figura 20 – Ignidor pirotécnico.

3.1.4. Unidade de controlo

A unidade de controlo, desenvolvida por Mendes R. 2010, consiste num quadro elétrico/eletrónico de comando que tem como principal função sequenciar a pressurização do recipiente de pó, dar início à dispersão do pó para a câmara de explosão e a ativação da fonte de ignição. O que o utilizador tem de fazer para realizar o ensaio quando todo o procedimento experimental tiver sido preparado é premir dois botões que estão colocados na parte exterior do quadro elétrico/eletrónico, representado no lado esquerdo da Figura 21, em que está instalado todo o equipamento elétrico/eletrónico e cablagem do sistema de controlo. Ao premir o botão identificado como “PRESSURIZAR RESERVATÓRIO-INÍCIO”, representado do lado direito da Figura 21, o recipiente do pó é pressurizado a 18,89 bar com a entrada de ar proveniente de uma garrafa de ar comprimido. Depois prime-se o botão colocado do lado esquerdo da mesma figura, identificado como “INJECCÃO DE PÓ- INÍCIO”, que inicia um conjunto de ações até provocar a explosão. Inicialmente é dado sinal de abertura da eletroválvula, depois existem três temporizadores, representados do lado direito da Figura 21, que iniciam uma contagem de tempo e após intervalos

programados pelo utilizador, os temporizadores transmitem três sinais elétricos que sequenciam todo o processo. O temporizador 1 (T1) provoca o fecho da eletroválvula, o temporizador 3 (T3) a ordem para a descarga elétrica sobre a fonte de ignição, que inicia a explosão, e o temporizador 2 (T2) desativa o sistema elétrico/eletrónico. O intervalo de contagem de tempo de cada temporizador até ser transmitido o sinal elétrico, pela ordem em que foram referidos, é obviamente crescente, para que a explosão ocorra com a eletroválvula fechada e que o circuito apenas seja desativado com todo o processo de explosão concluído.

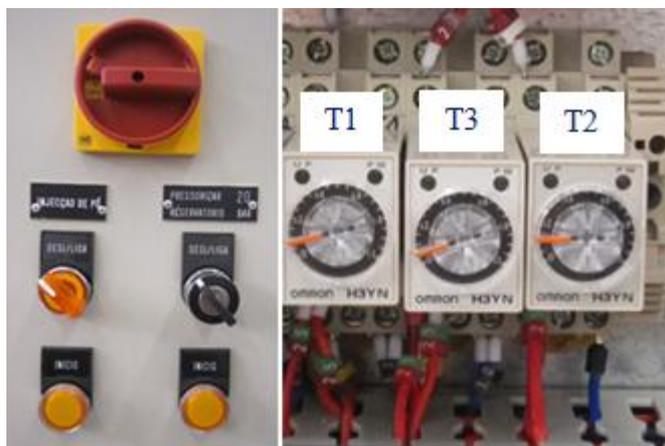


Figura 21 – Quadro elétrico/eletrónico da Unidade de controlo.

3.1.5. Sistema de medição de pressão

O sistema de medição de pressão utilizado inclui um sensor de pressão piezoelétrico 102B06 com uma sensibilidade de 1418 mV/MPa, um condicionador de sinal PCB 454B11 e um sistema de aquisição de dados, no entanto, segunda a norma EN 14034-1, devem ser utilizados dois sensores para comprovar a correção dos valores medidos. O sensor de pressão deve ser colocado com a cabeça à face da parede interna da câmara de explosão. É colocada uma proteção na cabeça do sensor para prevenir que os efeitos do aumento da temperatura o afetem. Ao longo da realização do trabalho experimental foram utilizados dois sistemas de aquisição de dados. Inicialmente utilizou-se um osciloscópio HP 54600B com 100 MHz de largura de banda, que tinha capacidade para recolha de apenas dois sinais analógicos e permitiu velocidade de aquisição de dois mil pontos por segundo. Depois instalou-se uma placa de aquisição, NATIONAL INSTRUMENTS, NI USB-6009, com capacidade para receber quatro sinais analógicos e permitiu uma

velocidade de aquisição de cinco mil pontos por segundo. Ambos os sistemas de aquisição transmitem os dados recolhidos para um computador com processador INTEL, 3 GHz, com *software* elaborado e programado por Liberato (2012), que permitiu a mostragem de um gráfico, logo após a realização dos ensaios, com a curva de pressão de explosão em função do tempo, e a recolha um ficheiro de texto com os dados recolhidos pelos vários canais. A partir deste ficheiro foi feito o tratamento de dados em Excel e obtiveram-se todos os parâmetros de explosividade para cada ensaio.

3.2. Procedimento experimental

1. Colocar o pó na estufa a uma temperatura de 100°C, pelo menos cinco horas antes de se realizar um ensaio, para que este seja seco;
2. Abrir a válvula principal da garrafa de ar comprimido e depois a válvula reguladora, cuidadosamente, até 30 bar no máximo;
3. Abrir a válvula de alimentação de ar comprimido e a válvula de seccionamento;
4. Fazer vácuo de -0,6 bar, em relação à pressão ambiente, abrindo a válvula de ligação entre a câmara de explosão e a bomba de vácuo. Fechar esta válvula depois do fazer vácuo. Garantir que está fechada a válvula de ligação entre a câmara de explosão e o exterior, durante este processo;
5. Fazer um ensaio apenas com enchimento de ar da câmara, sem colocar pó no recipiente de 0,76 l, verificando que o sistema se encontra a funcionar corretamente;
6. Abrir válvula de ligação ao exterior, de modo evacuar a câmara de explosão, libertando para o exterior o excesso de pressão gerado;
7. Colocar a massa de pó pretendida no recipiente do pó;
8. Colocação dos ignidores pirotécnicos no sistema de ignição, verificando, com um multímetro, a existência de contacto entre os eléctrodos, medindo a resistência eléctrica do ignidor pirotécnico;
9. Colocação do sistema de ignição na câmara de explosão;
10. Repetir o processo descrito no ponto 3;
11. Ligar a bateria aos eléctrodos, através dos condutores;
12. Abrir a torneira para passagem de água de refrigeração;

13. Premir os botões da unidade de controlo, provocando a pressurização do recipiente de pó e depois todo o processo de explosão;
14. Fechar a torneira de passagem de água de refrigeração;
15. Repetir o processo descrito no ponto 5;
16. Fechar a válvula principal da garrafa de ar comprimido e depois a válvula reguladora;
17. Fechar a válvula de ar comprimido e a válvula de seccionamento, retirando a pressão da linha;
18. Retirar o sistema de ignição e proceder à limpeza da câmara de explosão.

3.3. Caracterização do pó de carvão

O pó utilizado na realização deste trabalho experimental foi proveniente da Central Termoelétrica do Pego, sendo que o combustível utilizado nesta instalação é um carvão betuminoso, que apresenta as seguintes características (Planeamento e Produção de eletricidade, 2010/2011):

- 80 – 90 % de carbono;
- Grande teor de matéria volátil;
- Queima fácil, particularmente quando pulverizado;
- Cor negra.

Determinou-se o PCS deste pó de carvão através da realização de dois ensaios obtendo-se um valor médio de 27,15 kJ/g. Os resultados e procedimento de cálculo do PCS encontram-se representados no anexo C.

A visualização do tamanho e da forma das partículas do pó de carvão realizou-se através da observação de uma amostra deste pó no microscópio ótico ZEISS do Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra (CEMUC), com a colaboração de Farinha A. R. Uma das micrografias retiradas encontra-se representada na Figura 22. Conforme é visível as partículas apresentam uma forma aproximadamente esférica mas com algumas irregularidades.

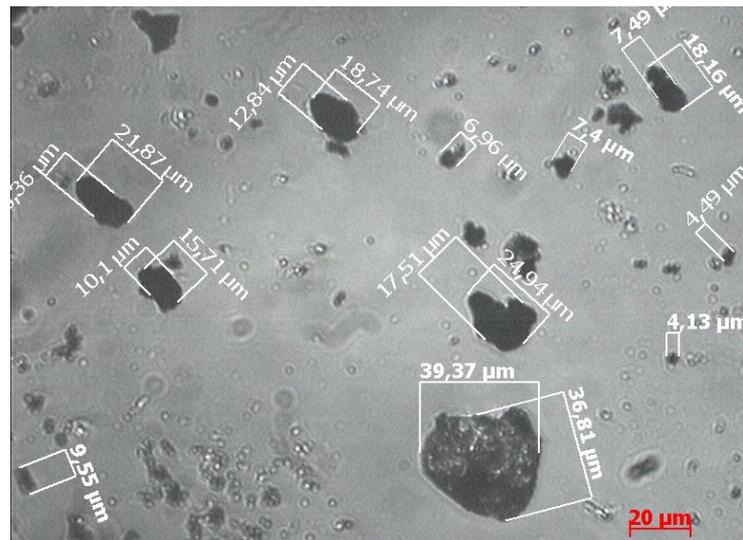


Figura 22 –Micrografia com ampliação de 500 X.

Solicitou-se um estudo de análise granulométrica ao pó de carvão, sendo os resultados apresentados na Figura 23. Desta análise conclui-se que 10% das partículas apresentam um diâmetro inferior a 2,844 µm, 50% das partículas têm um diâmetro inferior a 17,227 µm (mediana do tamanho das partículas de pó) e 90% das partículas têm tamanho inferior a 48,456 µm. O relatório completo deste estudo encontra-se representado na Figura 50 do anexo H.

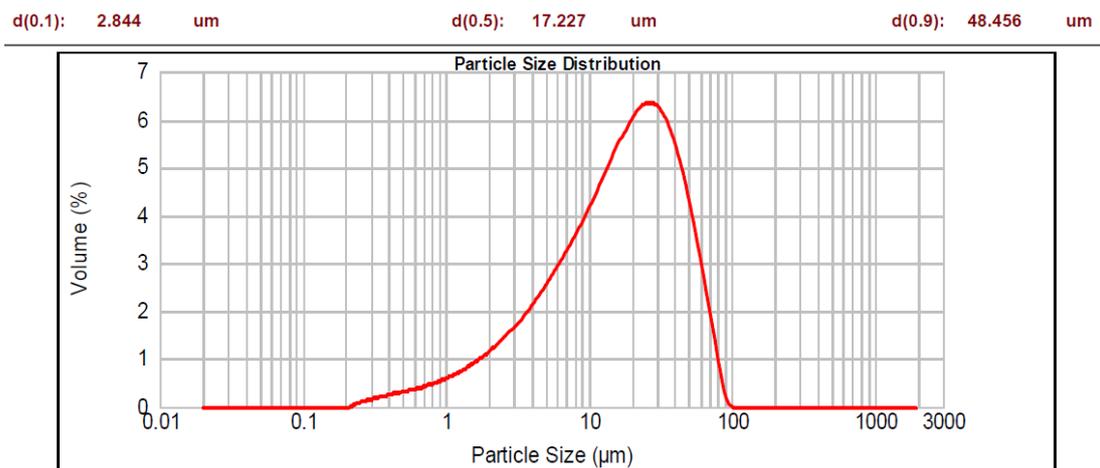


Figura 23 – Distribuição granulométrica das partículas de pó.

3.4. Gás da mistura poeiras/ar

Os ensaios de explosões de poeiras devem ser realizados com ar (79% N₂ + 21% O₂). Como não se dispõe de um compressor com capacidade para gerar a pressão de 18,89 bar, foi utilizado ar sintético (ar reconstituído K-Linde) com a seguinte composição (80% N₂ + 20% O₂).

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. Calibração do sistema de ensaio

O trabalho experimental iniciou-se com a calibração do sistema de ensaio realizando em simultâneo um estudo sobre a influência do intervalo de tempo de ignição sobre a pressão e velocidade de aumento de pressão de explosão máximas. O trabalho de calibração consistiu, essencialmente, na programação dos temporizadores instalados na unidade de controlo do sistema de explosão. De modo a perceber a sequência de processos que antecedem a explosão, analisa-se a Figura 24, que contém o registo dos sinais de acionamento da eletroválvula e de descarga eléctrica da bateria, e a curva de pressão em função do tempo de um ensaio.

O temporizador 1 controla o tempo indicado por t_e , que representa o intervalo entre os sinais eléctricos transmitidos para a abertura e o fecho da eletroválvula. Para determinar este intervalo fizeram-se ensaios, sem ignição e sem colocação de pó no respetivo recipiente, para determinar o tempo necessário que a eletroválvula precisa de estar aberta para que todo o gás seja libertado para a câmara de explosão, o que se confirma através da visualização de um máximo do valor de pressão medido pelo sensor de pressão instalado na câmara. Verificando o tempo correspondente a este ponto máximo, ajustou-se a programação do temporizador de modo a que a eletroválvula estivesse aberta o mínimo tempo possível para que todo o gás do recipiente do pó fosse libertado. O temporizador 3 controla o tempo t_i , entre a transmissão dos sinais eléctricos de fecho da eletroválvula e a descarga eléctrica sobre a fonte da ignição. A curva azul representa o desenvolvimento da pressão ao longo do tempo de ensaio. O sinal dado à eletroválvula provoca a sua abertura no final do intervalo representado por t_d , devendo o intervalo de tempo entre este instante e o sinal eléctrico de disparo do inflamador, t_v , ser da ordem de 60 ms (EN 14034-1). Programaram-se então os temporizadores, trabalhando com um intervalo de tempo, t_i , de modo a que t_v fosse próximo de 60 ms. No entanto, nestas condições de

As siglas identificadas na Figura 24 têm o seguinte significado:

- t_l é o intervalo de tempo entre a ativação da ignição e o ponto em que se verifica a pressão máxima;
- t_e é o intervalo de tempo entre os sinais elétricos de abertura e fecho da eletroválvula;
- t_i é o intervalo de tempo entre os sinais elétricos de fecho da eletroválvula e de disparo do inflamador;
- Δt_i é o intervalo de tempo entre o sinal elétrico de disparo do inflamador e o instante de início da subida de pressão;
- P_d é a pressão de expansão do recipiente do pó. Diferença entre a pressão de vácuo e a pressão inicial. O seu valor deve ser de -0,6 bar, no entanto são aceitáveis valores de 0,55 a 0,7 bar. (Manual 7.0 kuhner AG, 2011);
- t_d é o tempo entre o sinal elétrico de abertura da eletroválvula e o início do aumento de pressão;
- t_v é o intervalo de ignição. Influencia o nível de turbulência e este é o parâmetro de controlo mais importante. Tem que ser igual a $60 \pm (0,5)\text{ms}$ (Manual 7.0 kuhner AG, 2011).

4.1.1. Descrição da curva de pressão

A curva de pressão representada na Figura 24 inicia-se com um valor de -0,6 bar, relativamente à pressão ambiente. É feito vácuo com este valor antes de se realizar o ensaio para compensar o aumento de pressão na câmara de explosão causado pela libertação do pó, que se encontrava pressurizado no interior do mesmo recipiente. No final do período de tempo, representado por t_d a eletroválvula abre e existe subida da pressão até que se atinge a pressão ambiente (0 bar). Depois é dado o sinal elétrico para a ativação do inflamador que inicia a explosão, com um intervalo de tempo de atraso Δt_i . A partir deste instante observa-se uma rápida subida de pressão, sendo a fase inicial desta subida causada pela ativação dos ignidores pirotécnicos. Atingem-se valores máximos de pressão e

velocidade de aumento de pressão máximas, identificadas por P_{ex} e $(dP/dt)_{ex}$, respetivamente. Terminado o processo de combustão, a pressão baixa rapidamente.

4.1.2. Descrição do método de medição dos sinais elétricos

Ao premir-se o botão “INJEÇÃO DE PÓ – INICIO” da parte exterior do quadro elétrico/eletrónico representado na Figura 21, fecha-se um contacto do relé, identificado como K2 no esquema do circuito elétrico/eletrónico elaborado por Mendes R. e Ribeiro, J. (2010) apresentado na Figura 49 do anexo G. Nesse instante existe passagem de corrente elétrica na linha 28, o que provoca a abertura da eletroválvula e entram em funcionamento os temporizadores 1, 2 e 3. A placa de aquisição de dados deteta o sinal elétrico na linha 28, por intermédio do divisor de tensão 1 (Figura 25), necessário para diminuir a tensão para valores suportados pela placa de aquisição e construído para o efeito. A tensão aplicada à placa de aquisição traduz-se no aparecimento da linha verde representada na Figura 24 que tem a sua origem coincidente com o eixo vertical do gráfico. Ao fim de 105 ms o temporizador 1 provoca o fecho do contacto do relé K4, que por sua vez desativa a linha 28 e consequentemente fecha a eletroválvula. Este instante traduz-se pela quebra de tensão representada na linha verde do gráfico, correspondente ao instante final do intervalo de tempo t_e .

Decorridos 169 ms o temporizador 3 liga o relé K6, e este através de um contacto ativa a linha 32 que é alimentada pela bateria. Nesse instante dá-se a descarga elétrica nos ignidores, que é detetada pela placa de aquisição de dados por intermédio do divisor de tensão 2 (Figura 25), traduzindo-se no aumento de tensão do gráfico, representado pela linha de cor vermelha, que assinala o momento final do período de tempo t_i .

Ao fim de 3 segundos o temporizador 2 aciona o relé K5, que desativa todo o circuito elétrico/eletrónico.

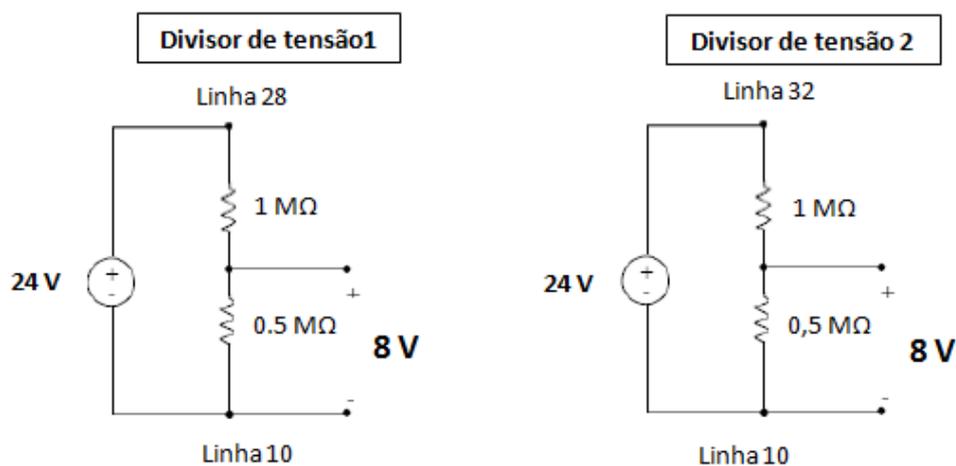


Figura 25 - Divisores de tensão do circuito elétrico/eletrônico.

4.1.3. Influência do intervalo de tempo de ignição

Durante o processo de calibração realizaram-se oito ensaios de explosão, sendo que nesta fase foi utilizado pó de farinha “Maizena”. Quando se iniciou o trabalho prático ainda não estava disponível o pó de carvão e portanto utilizou-se outro pó. Os ignidores pirotécnicos utilizados eram compostos pela composição 1 (83% de pólvora e 17% de alumínio). Para esta fase do trabalho não se controlou a massa da composição utilizada e, portanto, trabalhou-se com ignidores pirotécnicos com energia desconhecida. O trabalho de determinação do PCS foi realizado depois do processo de calibração do sistema de ensaio. Determinou-se que o poder calorífico superior da mistura utilizada no trabalho de calibração era de 9,08 kJ/g e cada carga pirotécnica tinha 2,65 g, concluindo-se que a fonte de ignição tinha uma energia de 24 kJ.

Nas Figuras 26 e 27 encontram-se representados os resultados obtidos para este trabalho. Os resultados demonstram a influência do tempo ($t_v + \Delta t_i$) sobre a pressão e velocidade de aumento de pressão de explosão máximas. É importante referir que o intervalo de tempo Δt_i não foi reprodutivo ao longo dos ensaios, pelo que este intervalo pode fazer com que para uma mesma programação dos temporizadores a explosão se alastre ou não até ao recipiente do pó. Por este motivo representa-se P_{ex} e $(dP/dt)_{ex}$ em função de $(t_v + \Delta t_i)$ e não apenas em função de t_v . Cada ponto dos gráficos representa o resultado de cada ensaio. Os pontos assinalados a vermelho representam ensaios em que a explosão se alastrou até ao recipiente de pó, enquanto o ponto verde representa a

programação final do temporizador que transmite o sinal elétrico de disparo do inflamador. Este foi o ponto de funcionamento do sistema em que se realizaram os restantes ensaios deste trabalho. Conforme se constatou no subcapítulo 2.6.4., com o aumento do intervalo de tempo de ignição, o grau de deposição dos pós aumenta e a turbulência inicial diminui.

Todos os ensaios de calibração foram realizados nas mesmas condições iniciais, com uma concentração de pó de 650 g/m^3 , à exceção do ensaio que é representado pelo último ponto e com o valor mínimo em ambos os gráficos, sendo que antes deste ensaio o pó não foi seco.

A pressão máxima de explosão, verificada em cada ensaio, apresenta uma tendência global de descida com o aumento do intervalo de ignição, no entanto esta tendência não se revela nos pontos representados a vermelho, dado que se verificou, nestes casos, que a explosão ocorreu num volume maior do que nos outros ensaios.

A velocidade máxima de aumento de pressão de explosão também diminui com o aumento do intervalo de ignição, mas de forma mais acentuada do que o parâmetro anterior, conforme seria de prever, dado que a velocidade máxima de aumento de pressão apresenta uma forte componente cinética que é reduzida devido à diminuição da turbulência inicial.

A evolução dos dois últimos parâmetros segue os resultados das referências bibliográficas, que estão representados nos gráficos A e B da Figura 7.

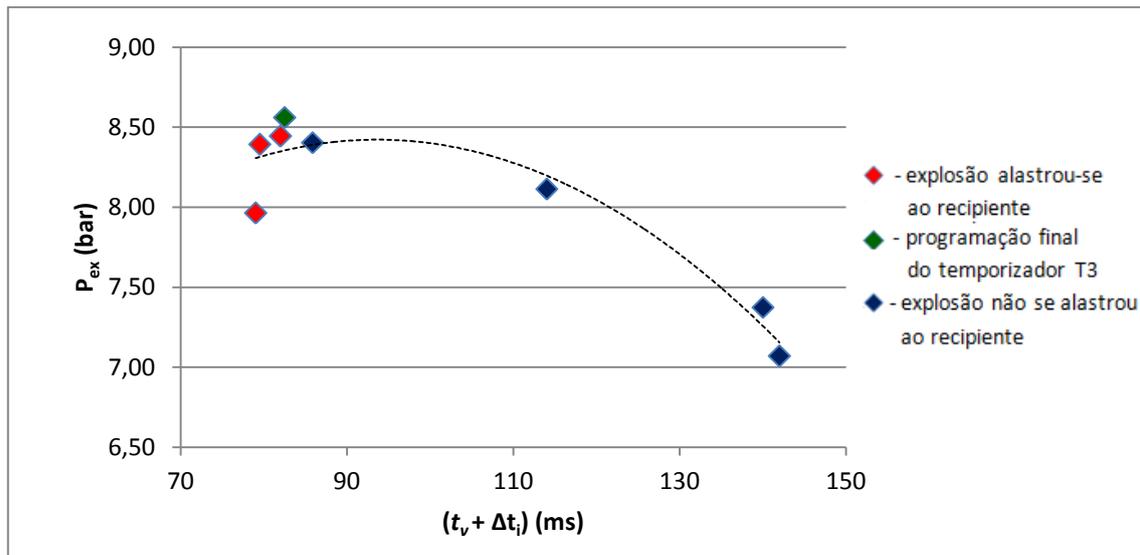


Figura 26 - Influência do intervalo de tempo de ignição sobre a pressão máxima de explosão.

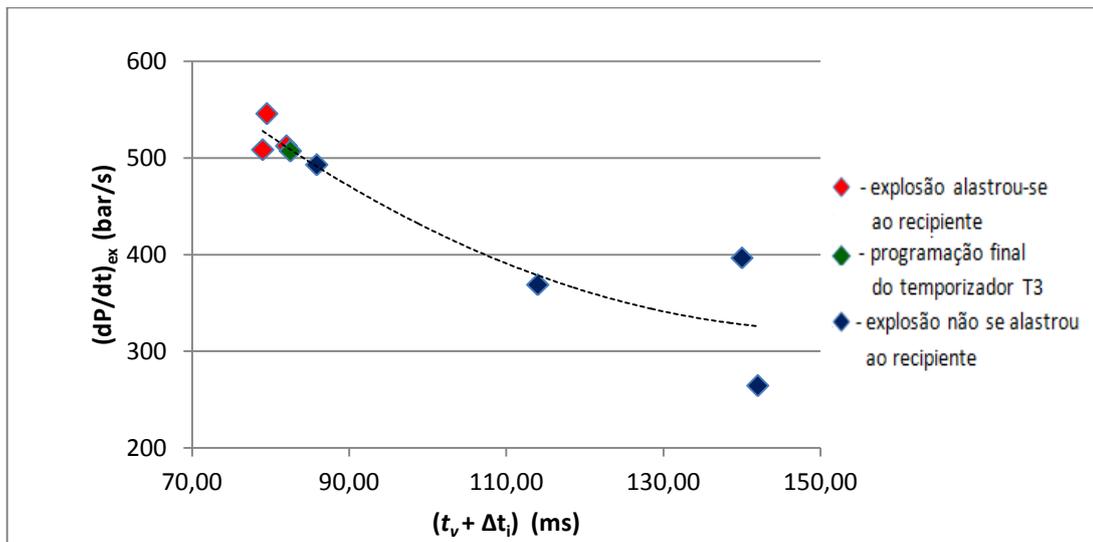


Figura 27 - Influência do intervalo de tempo de ignição sobre a velocidade máxima de aumento de pressão de explosão.

4.2. Determinação da pressão e velocidade de aumento de pressão de explosão máximas

A determinação experimental da pressão e velocidade de aumento de pressão de explosão máximas realizou-se através de um conjunto de dezasseis ensaios em que se variou a concentração de pó em suspensão de 70 g/m³ até 1000 g/m³.

Nas Figuras 28 e 29 encontram-se representadas três curvas de evolução da pressão e velocidade de aumento de pressão em função do tempo dos ensaios, correspondentes a três diferentes concentrações de pó. Os gráficos iniciam-se a partir do momento de ignição, aproximadamente 170 ms após ser dado o sinal elétrico de abertura da eletroválvula. Os valores máximos de ambos os parâmetros aumentam claramente com o aumento da concentração de pó, conforme seria de esperar. Os instantes iniciais, cerca de 15 ms, ilustrados nos gráficos, dizem respeito à ativação da fonte de ignição e à criação de uma esfera de combustão inicial, cujo volume depende da energia da fonte de ignição utilizada. Com o início da combustão de pó, a velocidade de chama aumenta e com ela cresce a turbulência, verificando-se a rápida progressão de chama, traduzida pelo rápido aumento de pressão no interior da câmara de explosão.

O sinal de pressão apresentado é construído com base nos dados recolhidos pelo sensor de pressão e que o *software* instalado no computador permite recolher num ficheiro de pressão em função do tempo com recolha de 5 pontos/ms. O sinal da dP/dt apresentado é construído através da derivada centrada de 31 pontos do sinal de pressão. Utiliza-se este número de pontos para a derivada com o objetivo de eliminar o ruído do sinal e evitar a apresentação de resultados erróneos. Deste modo existe um alisamento do sinal e um menor valor máximo resultante, em relação a uma derivada de dois pontos apenas.

A influência da concentração de pó sobre a P_{ex} e encontra-se representada nas Figuras 30 e 31. Nestas figuras estão representados os valores dos dois parâmetros referidos, obtidos em cada um dos dezasseis ensaios, correspondendo cada ensaio a um ponto dos gráficos.

Conforme foi analisado no gráfico C da Figura 6, a pressão máxima de explosão apresenta tendência para aumentar até uma determinada concentração de pó, a partir da qual tem tendência para estabilizar. Os resultados experimentais obtidos no presente trabalho reproduzem a previsão teórica, verificando-se um aumento claro da P_{ex}

até se atingir um valor máximo de 7,56 bar para uma concentração de 250 g/m³, existindo depois um ligeiro decréscimo e estabilização dos valores deste parâmetro. Aplicando a correção devida ao efeito do arrefecimento na câmara de 20 l, obtém-se um valor de pressão máxima de explosão para o pó de carvão de $P_{m\acute{a}x} = 7,94$ bar.

Os registos experimentais mostram que a velocidade de aumento de pressão de explosão máxima apresenta tendência a aumentar com a concentração de pó e depois tende a estabilizar, conforme seria de prever, através da análise teórica e dos resultados experimentais ilustrados no gráfico B da Figura 6. Cashdollar (1998) (*apud* Semenova, 2005) assume que se verifica maior dispersão nos valores da velocidade máxima de aumento de pressão do que nos valores da pressão máxima de explosão, sendo este fato devido, sobretudo, às características aleatórias e irreproduzíveis associadas à dispersão inicial do pó e ao processo de propagação de chama durante uma explosão. Esta teoria permite explicar a razão pela qual existe uma considerável dispersão nos resultados obtidos no presente trabalho, para o parâmetro referido.

A velocidade máxima de aumento de pressão de explosão obtida é $k_{st} = 79,96$ bar.m.s⁻¹ para uma concentração de 600 g/m³.

Os registos gráficos dos ensaios para os quais se obtiveram $P_{m\acute{a}x}$ e k_{st} encontram-se representado no anexo E.

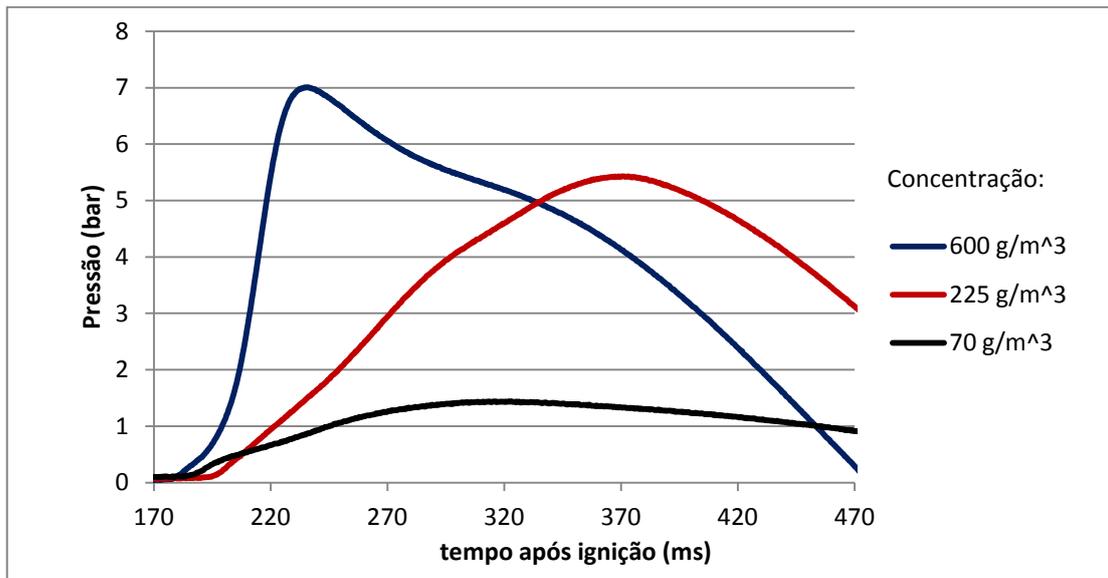


Figura 28 – Efeito da concentração de pó na evolução da pressão de explosão.

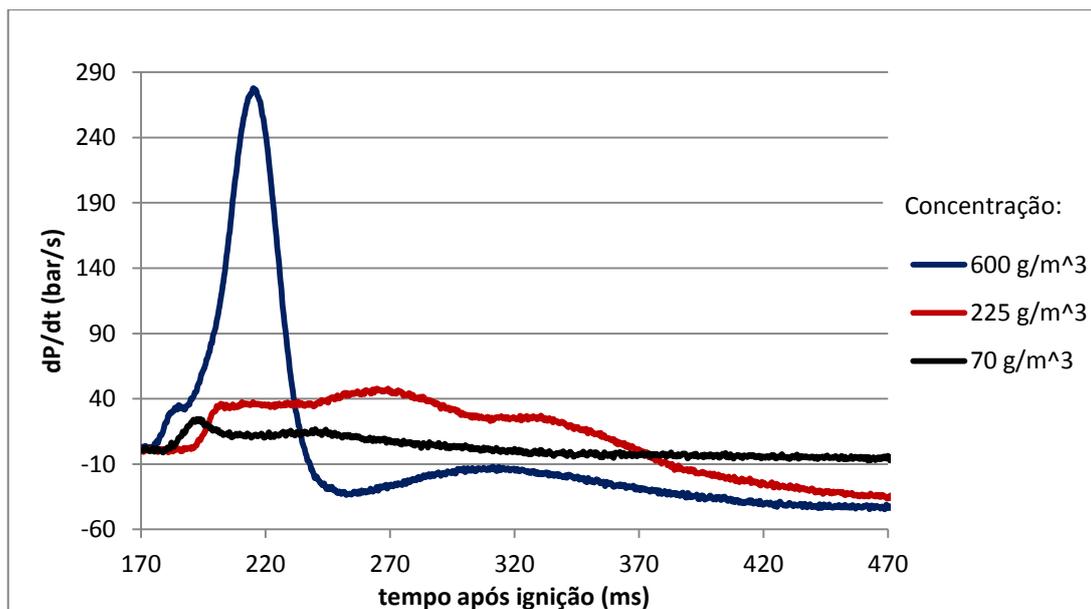


Figura 29 - Efeito da concentração de pó na evolução da velocidade de aumento de pressão de explosão.

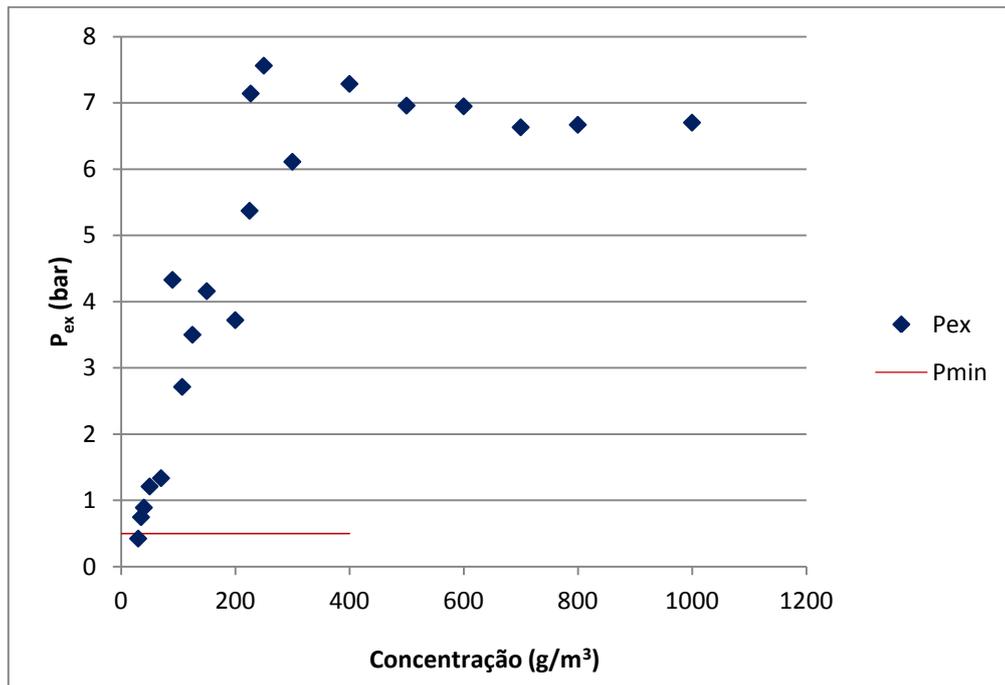


Figura 30 – Efeito da concentração de pó sobre a pressão máxima de explosão.

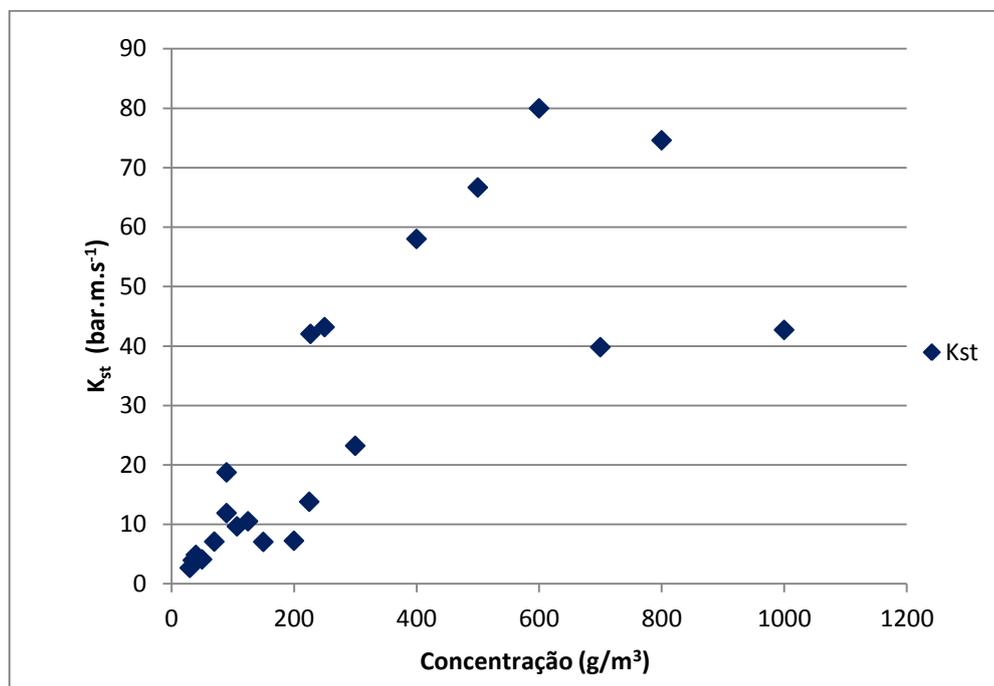


Figura 31 - Efeito da concentração de pó sobre a velocidade máxima de aumento de pressão de explosão, adimensionalizada em relação ao volume da câmara de explosão.

4.3. Concentração mínima de pó de explosão

A CME é a menor concentração de uma poeira combustível, misturada com ar, para a qual ainda ocorre explosão. Considera-se a ocorrência de explosão se o aumento de pressão, relativamente à pressão ambiente for, pelo menos, de 0,5 bar.

Nos ensaios experimentais de determinação deste parâmetro devem ser utilizados ignidores pirotécnicos de 2 kJ, no entanto, os ignidores com esta energia e com a composição utilizada não têm capacidade para iniciar a explosão, qualquer que seja a concentração de pó utilizada. Por este motivo, utilizaram-se também neste estudo ignidores pirotécnicos com 10 kJ de energia.

Para determinar este parâmetro, realizaram-se ensaios partindo de uma concentração de pó de 50 g/m³ e reduziu-se a concentração até que deixou de ocorrer explosão para uma concentração de 30 g/m³. A menor concentração deste pó para a qual ainda ocorre explosão é de 35 g/m³. Os resultados deste estudo encontram-se representados nas Figuras 30 e 31, conjuntamente com os resultados de determinação da pressão e velocidade de aumento de pressão de explosão máximas. A linha horizontal ilustrada na Figura 30 estabelece o valor limite de pressão que define se o ensaio é, ou não, considerado explosivo.

O registo gráfico do ensaio para o qual se obteve a CME encontra-se representado no anexo E.

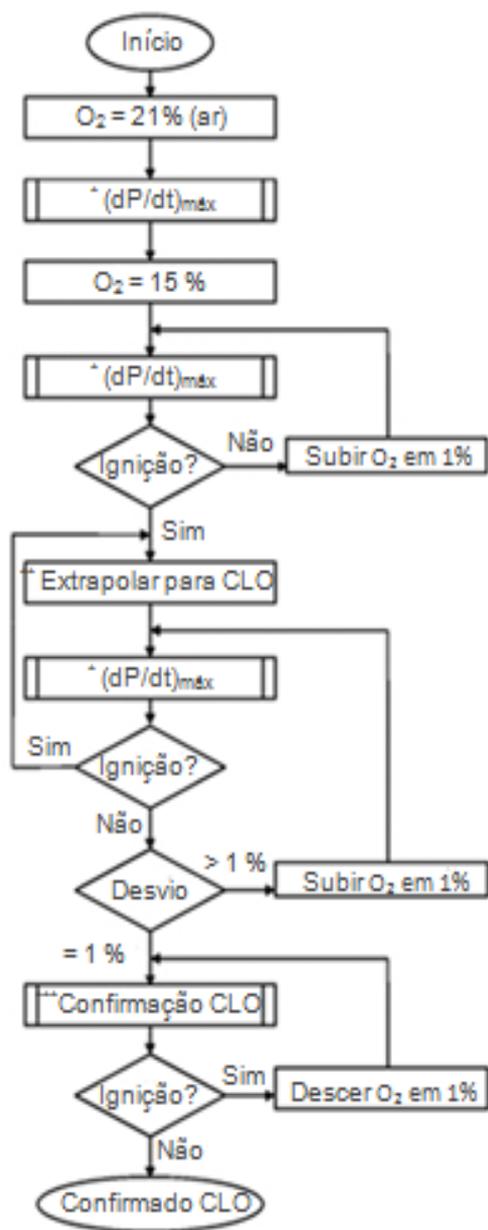
4.4. Concentração limite de oxigénio de explosão

A CLO é a máxima concentração de oxigénio numa mistura de pó/ar/gás inerte, para a qual não podem ocorrer explosões de pó. No presente trabalho determinou-se este parâmetro para apenas uma concentração de pó de 500 g/m³.

Para a determinação experimental deste parâmetro também devem ser feitos ensaios com ignidores pirotécnicos de 2 kJ, mas conforme se justificou foi necessário realizar os ensaios com ignidores de 10 kJ.

O procedimento experimental de determinação deste parâmetro é ligeiramente diferente do procedimento seguido nos estudos anteriores, dado que se adiciona um gás inerte, azoto, à mistura pó/ar. A conseqüente redução de oxigénio, a partir de uma

determinada percentagem, inibe a ocorrência de explosão. As etapas de realização deste estudo encontram-se especificadas no diagrama da Figura 32:



* Determinação de $(dP/dt)_{máx}$:

Determinar $(dP/dt)_{máx}$ através da variação da concentração de pó, seguindo o procedimento global dado em EN 14034-2:2006+A1:2011, capítulo 6. As seguintes gamas de concentrações de pó devem utilizadas:

60,125,250,500,750,1000,1250,1500, ...g.m⁻³.

**Extrapolação para CLO:

Registrar os valores de $(dP/dt)_{máx}$ em função da concentração de O₂ e obter uma estimativa de CLO através de uma extrapolação linear para $(dP/dt)_{máx} = 0$ bar.s⁻¹.

***Confirmação de CLO:

Confirmação da CLO através de 3 ensaios sem ocorrência de explosão para cada concentração de pó em que se verificou explosão para uma concentração de oxigénio 1% superior.

Figura 32 – Fluxograma de determinação da concentração limite de oxigénio.

Este trabalho iniciou-se com a realização de um ensaio sem adição de azoto, no qual se observou, conforme era esperado, a ocorrência de explosão, com $P_{ex} = 6,96$ bar e $(dP/dt)_{ex} = 231,40$ bar/s. De seguida, fizeram-se ensaios em que se reduziu a

concentração inicial de oxigénio. Conforme já foi referido, a redução da quantidade inicial de oxigénio foi conseguida através da adição de azoto ao ar de dispersão. Foi necessário, portanto, determinar uma relação entre a pressão de azoto introduzida na câmara de explosão e a percentagem de oxigénio inicial. Esta relação encontra-se descrita no anexo A.

O segundo ensaio foi realizado com uma concentração inicial de oxigénio de 15%. Para atingir 15% de O₂, foi feito vácuo na câmara de explosão até -0,8 bar, adicionando de seguida N₂ até a pressão ser de -0,6 bar. Os resultados foram, $P_{ex} = 5$ bar e $(dP/dt)_{ex} = 56,28$ bar/s. Registaram-se graficamente os valores de $(dP/dt)_{ex}$ em função da concentração de oxigénio, obtidos nos dois ensaios anteriores para concentrações de 20% e 15% de oxigénio e fez-se uma extrapolação linear para $(dP/dt)_{ex} = 0$ bar. Desta extrapolação resulta o valor da concentração inicial de oxigénio a ser utilizado no ensaio seguinte, sendo este procedimento repetido até se deixar de registar a ocorrência de explosão.

Na Tabela 3 encontram-se representados os resultados dos cinco ensaios realizados para determinação deste parâmetro. A CLO obtida foi de 13,2%, tendo sido efetuados dois ensaios para confirmar este valor.

Nas Figuras 33 e 34 encontram-se representadas quatro curvas de evolução da pressão e velocidade de aumento de pressão em função do tempo dos ensaios, correspondentes às quatro diferentes concentrações iniciais de oxigénio. Os gráficos iniciam-se a partir do momento de ignição.

Os valores máximas obtidos para a pressão e velocidade de aumento de pressão de explosão, em função da concentração inicial de oxigénio estão ilustrados graficamente nas Figuras 35 e 36. É visível que ambos os parâmetros apresentam tendência a diminuir com a redução da concentração de oxigénio, sendo este efeito ainda mais notório sobre velocidade máxima de aumento de pressão, conforme seria de esperar de acordo com a previsão teórica apresentada no subcapítulo 2.6.5 e dos resultados representados na Figura 9. A reta representada na Figura 36 é a reta de extrapolação através da qual se determinou a concentração inicial de oxigénio utilizada no ensaio final, para a qual se obteve a CLO.

O registo gráfico de um dos ensaios para o qual se confirmou a CLO encontra-se representado no anexo E.

Tabela 3 – Resumo dos resultados obtidos para determinação da concentração limite de oxigénio.

ρ_p (g/m ³)	% O ₂	Pressão N ₂ (bar)	Pressão de vácuo (bar)	P_{ex} (bar)	$(dP/dt)_{ex}$ (bar/s)
500	20,0	0,00	-0,60	6,96	231,40
500	15,0	0,20	-0,80	5,00	56,28
500	13,4	0,30	-0,90	0,56	8,09
500	13,2	0,31	-0,91	0,28	10,89
500	13,2	0,31	-0,91	0,13	3,30

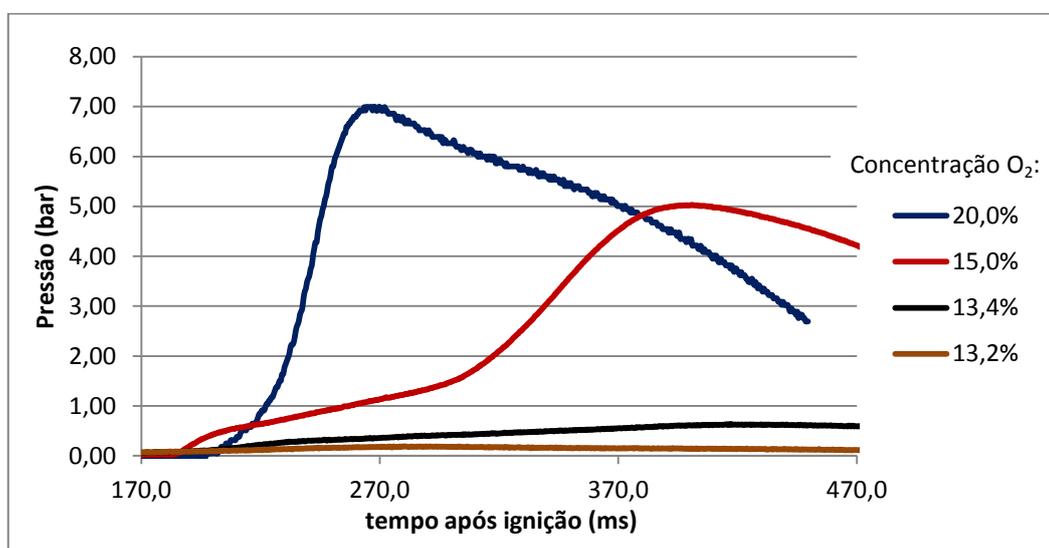


Figura 33 – Efeito da concentração de O₂ na evolução da pressão de explosão.

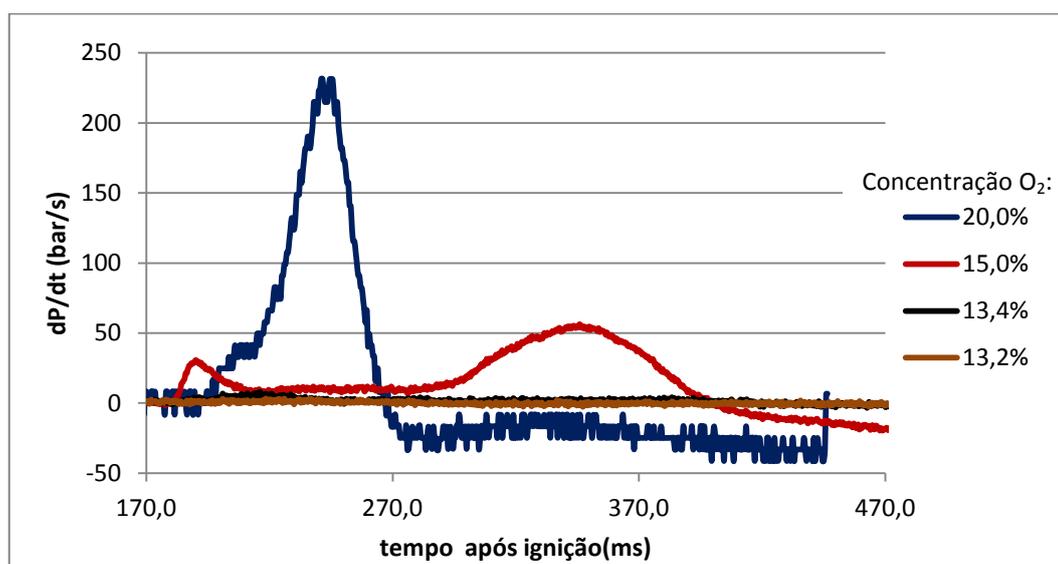


Figura 34 – Efeito da concentração de O₂ na evolução da velocidade de aumento de pressão.

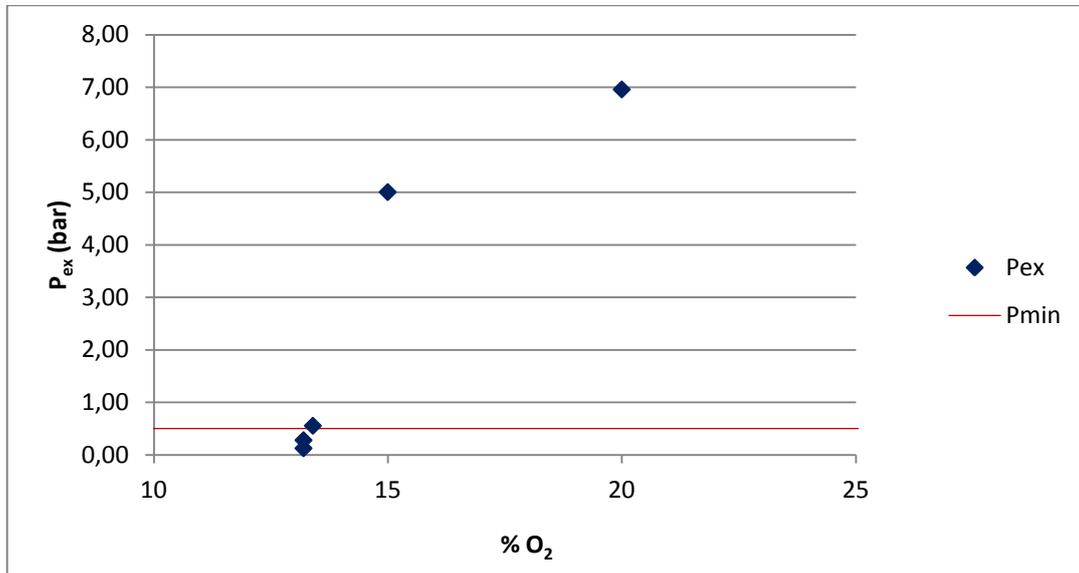


Figura 35 - Efeito da concentração de oxigênio sobre a pressão máxima de explosão, para uma concentração de pó de 500 g/m³.

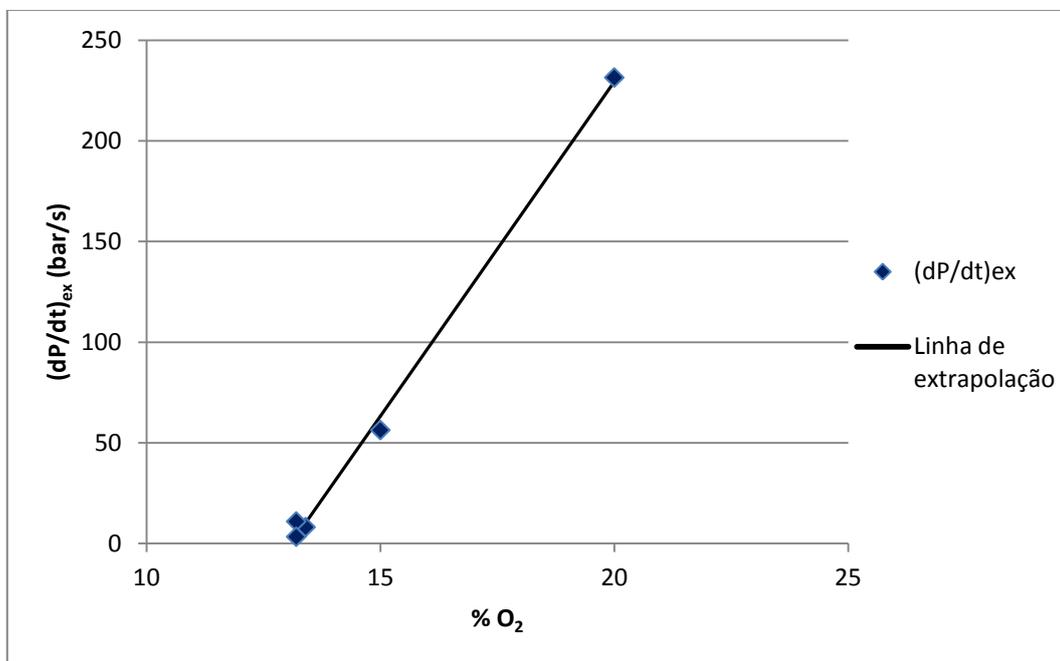


Figura 36 - Efeito da concentração de oxigênio sobre a velocidade máxima de aumento de pressão de explosão, para uma concentração de pó de 500 g/m³.

4.5. Caracterização do processo de ignição

O efeito do aumento de pressão causado pelos ignidores pirotécnicos foi contabilizado através de dois ensaios em que se procedeu à ignição de dois ignidores com a composição 2, sem introdução de pó na câmara de explosão. A Figura 37 ilustra a curva de pressão referente a um dos ensaios mencionados, em que se registou uma subida de pressão de 0,46 bar:

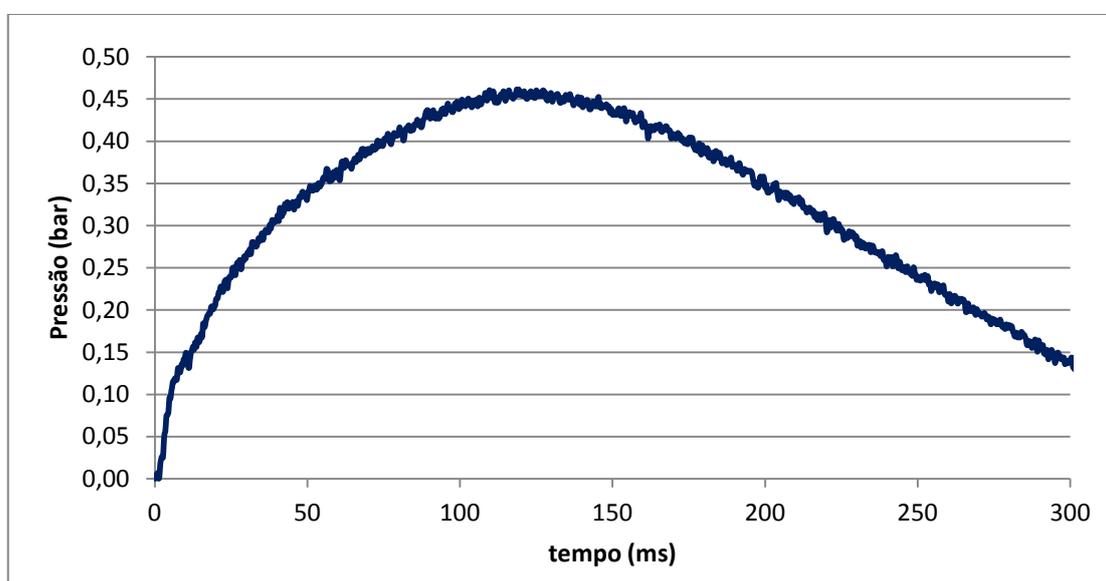


Figura 37 – Ignição de um ignidor com a composição 2.

Com o objetivo de avaliar e comparar a influência da composição utilizada nos ignidores pirotécnicos sobre a explosividade de suspensão de poeiras, realizaram-se dois ensaios em que se utilizaram as composições 1 (83% de pólvora e 17% de alumínio) e 2 (60% de pólvora e 40% de alumínio), com as mesmas condições iniciais e para uma mesma concentração de carvão de 500 g/m³. As duas curvas de pressão resultantes encontram-se representadas na Figura 38 e iniciam-se a partir do momento de ignição, sendo visíveis claras diferenças. A maior capacidade de geração e transmissão de calor por parte da composição 2 traduziu-se num valor bastante mais elevado da velocidade de aumento de pressão e um valor ligeiramente superior da pressão máxima. Do ensaio realizado com a composição 2 verificaram-se os seguintes resultados, $P_{ex} = 6,96$ bar e

$(dP/dt)_{ex} = 231,40$ bar/s. Para o ensaio realizado com a composição 1 obteve-se, $P_{ex} = 6,68$ bar e $(dP/dt)_{ex} = 131,96$ bar/s.

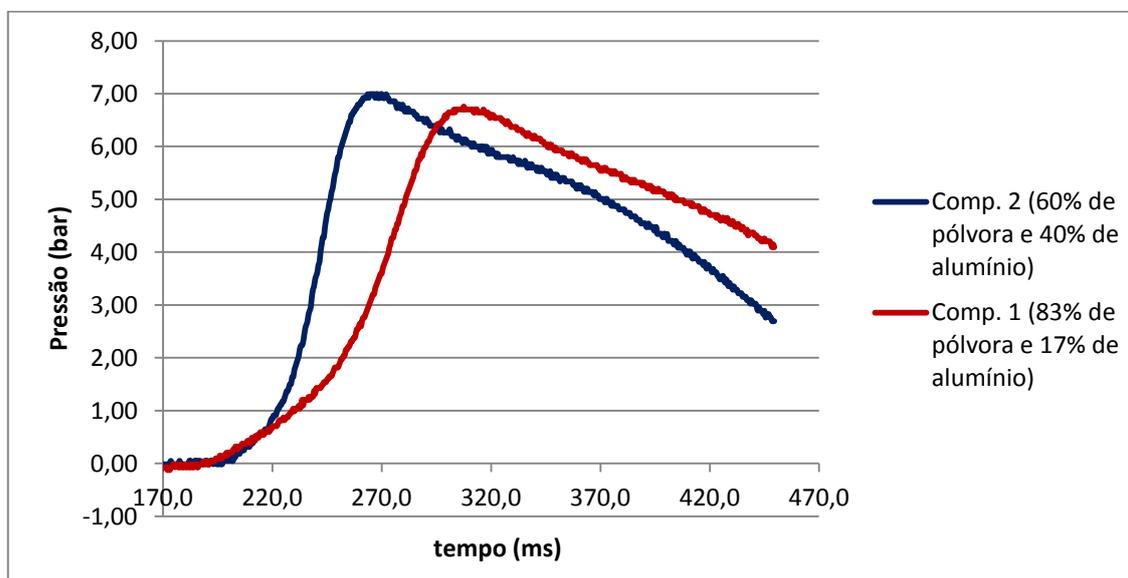


Figura 38 – Influência da composição dos ignidores pirotécnicos na explosividade da suspensão de poeira.

4.6. Avaliação dos valores obtidos para os parâmetros de explosividade

Os resultados obtidos para os parâmetros de explosividade no presente trabalho são comparados com os resultados obtidos no estudo realizado por Cashdollar (1996) referentes a uma mediana de tamanho de partículas de 11 μm , que corresponde ao valor mais próximo da mediana do tamanho das partículas de pó utilizadas neste trabalho. É importante referir que esta análise não tem como objetivo comparar a exatidão dos resultados obtidos no presente trabalho, mas apenas para ter uma noção da ordem de grandeza dos valores. Convém realçar que a granulometria é ligeiramente diferente nos dois trabalhos e que no estudo de Cashdollar (1996) a energia de ignição utilizada em todos os ensaios foi de 2,5 kJ, e o intervalo de ignição da ordem de 500 ms. A Tabela 4 apresenta o registo dos valores para os dois estudos:

Tabela 4 – Resultados dos parâmetros de explosividade do presente trabalho e de Cashdollar (1996).

	P_{ex} (bar)	k_{st} (bar.m.s ⁻¹)	CME (g/m ³)	Mediana das partículas (µm)
Resultados Cashdollar (1996)	6,10	59,00	85	11
Resultados do presente trabalho	7,56	79,96	35	17

Os valores de P_{ex} e k_{st} obtidos no presente trabalho apresentam um valor superior em relação aos resultados obtidos por Cashdollar (1996), o que se justifica pela maior energia de ignição utilizada e pelo menor intervalo de tempo de ignição. Os efeitos dos dois fatores referidos sobre estes parâmetros de explosividade encontram-se representados nas Figuras 7 e 14.

Os valores da CME nos dois estudos apresentam uma considerável diferença, justificada pela clara dependência deste parâmetro em relação à energia de ignição conforme é visível na Figura 15, embora se refira a um estudo para outro pó.

Em relação ao valor da CLO não faz sentido a comparação entre os dois estudos, dado que no presente trabalho apenas se determinou este parâmetro para uma concentração de pó e não para uma vasta gama de concentrações conforme foi levado a cabo por Cashdollar (1996).

5. CONCLUSÃO

Com a realização deste trabalho experimental foi possível calibrar o sistema de ensaio, com a determinação do seu ponto de funcionamento ideal, tendo em conta as limitações impostas pelo tempo de reação da eletroválvula, que obrigou a trabalhar-se com um intervalo de tempo de ignição superior ao normalizado. Ao longo deste trabalho procederam-se a várias alterações no sistema de ensaio, permitindo que neste momento os mesmos possam ser realizados sem qualquer preocupação com a organização e preparação da unidade de controlo, bem como com todo o material experimental.

Foi possível determinar os parâmetros de explosividade do pó de carvão e comparar os resultados com os obtidos em outros estudos.

A pressão máxima de explosão variou com a concentração de pó de forma coerente com a teoria de explosividade de suspensão de poeiras.

A velocidade máxima de aumento de pressão de explosão apresenta o comportamento que seria previsto, no entanto existe uma elevada dispersão nos resultados obtidos.

No estudo da concentração mínima de pó de explosão e concentração limite de oxigénio de explosão não foi possível realizar os ensaios nas condições normalizadas, dado que foi necessário determinar estes parâmetros realizando ensaios com maior energia de ignição do que seria suposto. No entanto, observou-se claramente a influência da concentração de pó e de oxigénio na explosividade da suspensão de poeiras.

A partir deste estudo, em que se simulam ambientes industriais, comprovou-se a possibilidade da ocorrência de explosão, avaliou-se a sua violência e, acima de tudo, compreendeu-se a utilidade da determinação da explosividade dos pós na prevenção de acidentes na indústria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Campos, J.A. (1982), “Risco de explosão em instalações de transporte pneumático”, Publicação apresentada no Seminário sobre transporte pneumático, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Secção Autónoma de Engenharia Mecânica.
- Cashdollar, K.L. (1996), “Coal Dust Explosibility”, J. Loss Prev. Process Ind., Vol. 9.
- CEN/TS 14918 (2005). “Solid Biofuels – Method for the determination of Calorific Value”.
- Cristoph C., Siewek R. (2011, 23 de Março), “Manual 7.0 Kuhner AG”.
- Eckhoff (1997), “Dust Explosions in the Process Industries”, 2th Edition, Butterworth-Heineman.
- EN 14034-1 (2004). “Determination of explosion characteristics of dust clouds - Part 1: Determination of the maximum explosion pressure Pmax”.
- EN 14034-2 (2006). “Determination of explosion characteristics of dust clouds - Part 2: Determination of the maximum rate of explosion pressure rise (dP/dt)max”.
- EN 14034-3 (2006). “Determination of explosion characteristics of dust clouds - Part 3: Determination of the lower explosion limit LEL”.
- EN 14034-4 (2004). “Determination of explosion characteristics of dust clouds - Part 4: Determination of the limiting oxygen concentration LOC”.
- EN 14460 (2006). “Explosion Resistant Equipment”.
- Liberato A. (2012). Documento interno.
- Operating Instruction Manual No. 204 M (2008, 9 de Março).
- Planeamento e Produção de Eletricidade (2110/2011). “Centrais Termoelétricas”, DEEC.
- R. Pilão, E. Ramalho, C. Pinho (2005), “Overall characterization of cork dust explosion”, Journal of Hazardous Materials.
- Semenova, O. (2005). “Estudo da Explosão de Pó da Casca de Pinheiro Bravo”, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

ANEXO A

Na realização dos ensaios experimentais de determinação da concentração limite de oxigénio de explosão é necessário conhecer a relação entre a pressão de azoto introduzida na câmara de explosão e a percentagem de oxigénio inicial. Esta relação obtém-se recorrendo à equação dos gases perfeitos:

$$P \times V_0 = N \times R \times T \quad (\text{A.1})$$

O número de moles de ar e azoto introduzidos na câmara de explosão são representados por N_{ar} e N_{N_2} :

$$N_{ar} = \frac{P_{ar} \times V_0}{R \times T} \quad (\text{A.2})$$

$$N_{N_2} = \frac{P_{N_2} \times V_0}{R \times T} \quad (\text{A.3})$$

A percentagem de oxigénio existente traduz-se da seguinte forma, sendo a constante de 0,2 correspondente à parcela de oxigénio existente no ar utilizado:

$$\% O_2 = \frac{0,2 \times N_{ar}}{N_{ar} + N_{N_2}} \quad (\text{A.4})$$

Substituindo os dados das equações (A.2) e (A.3), na equação (A.4), obtém-se:

$$\% O_2 = \frac{0,2 \times P_{ar}}{P_{ar} + P_{N_2}} \quad (\text{A.5})$$

ANEXO B

Para o cálculo do volume da câmara de explosão, encheu-se o seu interior com água que foi transportada num garrafão. Pesou-se sempre o garrafão, antes e depois de se encher, de modo a calcular a massa de água introduzida. Na Tabela 5 contabilizam-se o número de despejos do garrafão necessário para preencher por completo o volume da esfera de explosão:

Tabela 5 – Registo de enchimento da câmara de explosão.

	Garrafão 1	Garrafão 2	Garrafão 3	Garrafão 4	Garrafão 5	Garrafão 6	Garrafão 7	
Massa com água (g)	3645,4	4101,3	4439,2	4594,8	4830,8	2777,9	2001,6	
Massa sem água (g)	102,2	103,2	100	102,2	101,6	102,3	1554,3	
Massa de água retida (g)	3543,2	3998,1	4339,2	4492,6	4729,2	2675,6	447,3	24225,2

As três janelas laterais da câmara de explosão ficaram preenchidas com água, ocupando assim um volume que será ocupado pelos sensores e saídas da esfera, e portanto terá de ser calculado e descontado:

$$V = \pi \times r^2 \times d \quad (\text{B.1})$$

$$V_1 = 1,20 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$V_2 = 4,97 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$V_3 = 3,00 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

O volume ocupado pelo dispersor terá que ser igualmente descontado. Sabendo a massa do dispersor e a sua massa volúmica calcula-se o volume:

$$m_{\text{dispersor}} = 599,40 \text{ g} = 0,5994 \text{ Kg}$$

$$\rho_{\text{dispersor}} = 8 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$$

$$V_{\text{dispersor}} = \frac{m_{\text{dispersor}}}{\rho_{\text{dispersor}}} = \frac{0,5994}{8 \times 10^3} = 7,49 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (\text{B.2})$$

Sendo o volume específico da água, a 23,4 °C (temperatura da água no momento das medições), igual a 0,00100268 m³/kg obtém-se a massa volúmica da água, 997,327 kg/m³.

Para o cálculo do volume da esfera, tem-se de calcular o volume correspondente aos 24,2252 kg de água colocada, com o desconto de uma massa correspondente a 20 ml de água, que estava em excesso na esfera e foi posteriormente retirada. Depois subtrai-se o volume que a água ocupa nas três janelas laterais e ainda o volume do dispersor.

$$V_{\text{água total}} = \frac{m_{\text{água total}}}{\rho_{\text{água}}} = \frac{24,2252}{997,327} = 2,43 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \quad (\text{B.3})$$

$$\begin{aligned} V_0 &= 2,43 \times 10^{-2} - 1,20 \times 10^{-6} - 4,97 \times 10^{-6} - 3,00 \times 10^{-6} - 7,49 \times 10^{-5} = \\ &= 2,39 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

O volume do recipiente do pó é determinado da mesma forma, calcula-se a massa de água que preenche o seu interior e o volume correspondente:

$$m_{\text{recipiente do pó vazio}} = 2129,50 \text{ g}$$

$$m_{\text{recipiente do pó com água}} = 2886,10 \text{ g}$$

$$m_{\text{água no recipiente do pó}} = 756,60 \text{ g} = 0,75566 \text{ kg}$$

$$V_{\text{recipiente do pó}} = \frac{m_{\text{água no recipiente do pó}}}{\rho_{\text{água}}} = \frac{0,7566}{997,327} = 7,586 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \quad (\text{B.5})$$

ANEXO C

Neste anexo apresentam-se os registos de temperatura/tempo obtidos ao longo de um ensaio de calorimetria (Tabela 6), os cálculos que permitem a obtenção do PCS da composição 1 utilizada nos ignidores pirotécnicos neste trabalho e um resumo dos resultados obtidos para todos os ensaios realizados. Para o cálculo deste parâmetro foi necessário determinar a energia equivalente do calorímetro, sendo o seu cálculo e resultados igualmente apresentados neste anexo.

Os calorímetros são os principais instrumentos utilizados para medir os valores calóricos de amostras sólidas e líquidos inflamáveis. Os ensaios de calorimetria consistem na combustão de amostras no interior de um vaso metálico, que é pressurizada a 25 bar com oxigénio e colocado num recipiente com dois litros de água. Este conjunto encontra-se envolto por um revestimento isolante para evitar transientes térmicos durante a combustão, que é iniciada pela ignição de um fio fusível localizado no interior do vaso metálico e em contato com a amostra. Através de um sensor de temperatura em contato com a água e de uma placa de aquisição de dados com um mostrador digital, registam-se os valores da temperatura ao longo do ensaio.

A partir deste registo, obtém-se um gráfico com uma curva típica de temperatura (Figura 39), na qual se identificam pontos caraterísticos necessários ao cálculo do PCS.

Estes ensaios foram preparados com base na informação descrita na Norma Europeia, para determinação do valor calórico de biocombustíveis (CEN/TS 14918, 2005) e no manual de operações do equipamento (Operating Instrucion Manual No. 204M, 2008).

Folha de registo do calorímetro:

Amostra: Pólvora (83%) e Alumínio (17%)

Massa de água: 2000,3 g

Massa amostra: 0,505 g

Pressão O₂: 25 bar**Tabela 6 – Registo dos valores temperatura/tempo de ensaio.**

tempo [min:seg]	temperatura [°C]	tempo [min:seg]	temperatura [°C]
05:00	24,159	15:00	24,608
06:00	24,161	16:00	24,616
07:00	24,163	17:00	24,620
08:00	24,165	18:00 (<i>c; T_c</i>)	24,623
09:00	24,166	19:00	24,625
10:00 (<i>a; T_a</i>)	24,169	20:00	24,627
10:45	24,344	21:00	24,628
11:00	24,393	22:00	24,628
11:15	24,433	23:00	24,629
11:30	24,465	24:00	24,630
11:45	24,494	25:00	24,630
12:00	24,514	26:00	24,631
12:15	24,513	27:00	24,632
12:30	24,546	28:00	24,632
12:45	24,556	29:00	24,633
13:00	24,567	30:00	24,633
14:00	24,593	31:00	24,634

Massa de resíduos: Não se registaram resíduos da amostra.

Quantidade de fio não queimado: 12,70 cal.

Cálculo do PCS

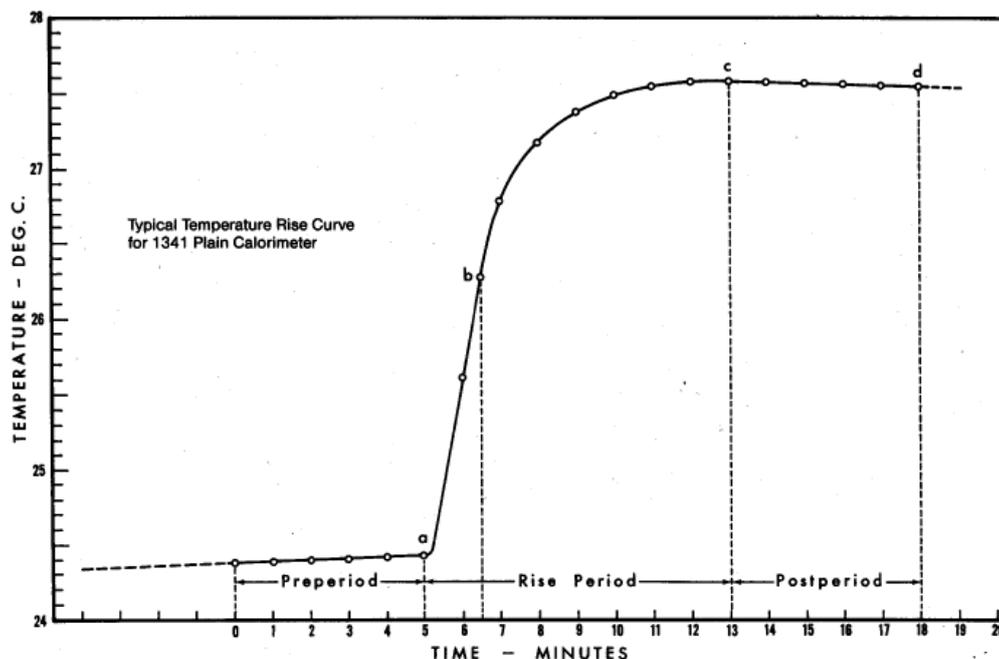
O valor do PCS é definido como sendo o calor libertado por unidade de massa de uma amostra queimada com oxigénio, a volume constante. Para o cálculo deste parâmetro as contribuições de todas as reações e combustões auxiliares devem ser consideradas (Operating Instrucion Manual No. 204M, 2008):

$$PCS = \frac{W \times T_t - Q_{fuse} - Q_{ign} - Q_N - m_2 \times q_{v,2}}{m_1} - \frac{Q_s}{m_1} \text{ [cal/g]} \quad (C.1)$$

Onde:

- W é a energia equivalente do calorímetro;
- Q_s é a correção por se considerar a formação de dióxido de enxofre a partir do ácido sulfúrico;
- m_1 é a massa da amostra de combustível;
- m_2 é a massa do combustível auxiliar (caso seja relevante);
- $q_{v,2}$ é o poder calorífico superior do combustível auxiliar;
- T_t é o aumento da temperatura;
- Q_{fuse} é a contribuição da combustão do fusível;
- Q_{ign} é a contribuição da oxidação do fio de ignição;
- Q_N é a contribuição da formação de ácido nítrico.

Registo dos pontos característicos na curva de aumento temperatura (Operating Instrucion Manual No. 204M, 2008):



- a - tempo do disparo;
- b - tempo (aproximadamente 0,1 min), em que a temperatura atinge 60% do aumento total;
- c - tempo no início do período (após o aumento de temperatura) em que a variação da temperatura passa a ser constante;
- T_a - Temperatura no momento do disparo;
- T_c - Temperatura, no instante “ c ”;
- r_1 - Subida da temperatura, por unidade de tempo, nos 5 minutos anteriores ao disparo;
- r_2 - Subida da temperatura, por unidade de tempo, nos 5 minutos posteriores ao instante “ c ”.

Figura 39 – Pontos característicos da curva de temperatura (Operating Instrucion Manual No. 204M, 2008).

Tabela 7 – Registo dos valores obtidos da curva de temperatura para determinação do PCS.

Tempo/Temperatura de descarga.	a [min]	10,00	T_a [°C]	24,169
Tempo correspondente a 60% variação total da temperatura.	b [min]	11,32		
Tempo/Temperatura de estabilização.	c [min]	18,00	T_c [°C]	24,623
Taxa (T/t) de variação da temperatura dos 5 min antes da descarga.	r_1 [°C/min]	0,0020		
Taxa (T/t) de variação da temperatura dos 5 min antes do final (c).	r_2 [°C/min]	0,0012		

$$T_t = T_c - T_a - r_1 \times (b - a) - r_2 \times (c - b) = 0,443 \quad (\text{C.2})$$

$$PCS = \frac{T_t \times W_2 - Q_{\text{fuse}}}{m_1} = \frac{0,443 \times 2502,68 - 10,3}{0,505} = 2176,75 \frac{\text{cal}}{\text{g}} = 9,11 \text{ kJ/g} \quad (\text{C.3})$$

O resultado da equação (C.3) apresenta o resultado da determinação do PCS para a amostra referida, no qual não foram contabilizados os valores de Q_{ign} , Q_N e Q_S . Foram realizados nove ensaios para a contabilização deste parâmetro para as duas composições utilizadas nos ignidores pirotécnicos, e para o carvão que foi utilizado nos ensaios explosivos.

Com o objetivo de não tornar este documento demasiado extenso e para evitar a apresentação de informação repetitiva, de seguida apresentam-se, apenas, os resultados obtidos para as várias amostras, representados nas Tabelas 8, 9 e 10:

Tabela 8 – Resultados do PCS obtidos para a primeira composição utilizada nos ignidores pirotécnicos.

Ensaio	Massa da amostra	Massa da amostra c/ fita-cola	Massa de resíduos	Poder calorífico superior experimental	
	[g]	[g]	[g]	cal/g	kJ/g
Pólvora (83%) e Alumínio (17%) [1]	0,505	0,505	0,0	2176,75	9,11
Pólvora (83%) e Alumínio (17%) [2]	0,504	0,504	0,0	2268,42	9,49
Pólvora (83%) e Alumínio (17%) [3]	0,500	0,500	0,0	2125,99	8,90
Pólvora (83%) e Alumínio (17%) [4]	0,502	0,571	0,00	2205,13	9,23
Pólvora (83%) e Alumínio (17%) [5]	0,505	0,548	0,00	2117,55	8,86
Pólvora (83%) e Alumínio (17%) [6]	0,504	0,555	0,00	2129,66	8,91
			Média	2170,58	9,08
			σ	58,79	0,25

Tabela 9 – Resultado do PCS obtido para a segunda composição utilizada nos ignidores pirotécnicos.

Ensaio	Massa da amostra	Massa da amostra c/ fita-cola	Massa de resíduos	Poder calorífico superior experimental	
	[g]	[g]	[g]	cal/g	kJ/g
Pólvora (60%) e Alumínio (40%)	0,601	0,647	0,0	2735,58	11,45

Tabela 10 - Resultados do PCS obtidos para o carvão.

Ensaio	Massa amostra	Massa de resíduos	Poder calorífico superior experimental	
	[g]	[g]	cal/g	kJ/g
Carvão, Central do Pego [1]	0,965	0,060	6566,34	27,47
Carvão, Central do Pego [2]	0,968	0,055	6410,15	26,82
		Média	6488,25	27,15
		σ	110,44	0,46

Determinação da energia equivalente do calorímetro

Antes de se determinar o PCS de uma amostra é necessário determinar a energia equivalente do calorímetro, sendo este valor dado pela soma das capacidades caloríficas dos seus componentes: vaso metálico, recipiente de água e a água. A determinação deste parâmetro é obtida através da realização de um ensaio e calcula-se através da seguinte equação (Operating Instrucion Manual No. 204M, 2008):

$$W = \frac{m_r \times PCS_r + Q_{fuse} + Q_{ign} + Q_N}{T_t} \text{ [cal/}^\circ\text{C]} \quad (\text{C.4})$$

Os parâmetros da equação anterior têm o seguinte significado:

- m_r é a massa da amostra de referência;
- PCS_r é o poder calorífico superior da amostra de referência.

Tabela 11 - Registo dos valores obtidos da curva de temperatura para determinação de W .

Tempo/Temperatura de descarga	a [min]	10,00	T_a [°C]	23,961
Tempo correspondente a 60% variação total da temperatura.	b [min]	11,44		
Tempo/Temperatura de estabilização	c [min]	20,00	T_c [°C]	26,627
Taxa (T/t) de variação da temperatura dos 5 min antes da descarga	r_1 [°C/min]	0,0010		
Taxa (T/t) de variação da temperatura dos 5 min antes do final (c)	r_2 [°C/min]	0,0048		

$$T_t = T_c - T_a - r_1 \times (b - a) - r_2 \times (c - b) = 2,623 \quad (\text{C.5})$$

$$W_2 = \frac{m_r \times PCS_r + Q_{fuse}}{T} = \frac{1,037 \times 6318 + 13,9}{2,623} = 2502,68 \text{ cal/g} \quad (\text{C.6})$$

Determinou-se a energia equivalente do calorímetro, sem contabilização dos valores de Q_{ign} , Q_N e Q_s , através da realização de dois ensaios com as águas de dois garrafões que se utilizam nos ensaios deste equipamento. Utilizam-se duas águas diferentes para que seja possível realizar vários ensaios sem ser necessário esperar pelos seus arrefecimentos.

Na Tabela 12 encontram-se representados os dois resultados obtidos:

Tabela 12 – Resultados da energia equivalente.

Ensaio	Massa amostra	Massa de resíduos	Energia equivalente do calorímetro
	[g]	[g]	cal/°C
Calibração [W_1]	1,035	0,040	2498,57
Calibração [W_2]	1,037	0,026	2502,68

ANEXO D

A pressão de expansão do recipiente do pó, P_d deve ser de 0,6 bar (EN 14034-1). É então necessário determinar a pressão a que é colocado o recipiente do pó para que o acréscimo de pressão provocado na câmara de explosão seja de 0,6 bar. Para determinar este valor recorre-se à equação dos gases perfeitos, já identificada na equação (A.1).

O número de moles da mistura pó/ar existente no interior do recipiente do pó é o mesmo após esta ser transportada para a câmara de explosão. Pode-se então fazer a seguinte igualdade:

$$\left(\frac{P \times V}{R \times T}\right)_{\text{câmara de explosão}} = \left(\frac{P \times V}{R \times T}\right)_{\text{recipiente do pó}} \quad (\text{D.1})$$

$$0,6 \times 23,9 = P_{\text{recipiente do pó}} \times 0,759 \quad (\text{D.2})$$

$$P_{\text{recipiente do pó}} = 18,89 \text{ bar} \quad (\text{D.3})$$

ANEXO E

Neste anexo mostra-se o registo gráfico dos ensaios para os quais se obtiveram os parâmetros de explosão em estudo: $P_{máx}$, $(dP/dt)_{máx}$, CME e CLO. É também apresentado um resumo dos resultados e registos de todos os ensaios explosivos realizados com o pó de carvão.

Nas Figuras referidas a seguir, apresenta-se a evolução da pressão e velocidade de aumento de pressão durante a explosão em cada ensaio:

- As Figuras 40 e 41 correspondem ao ensaio em que se registou $P_{máx}$, para uma concentração de pó de $\rho_p = 250 \text{ g/m}^3$;
- As Figuras 42 e 43 correspondem ao ensaio em que se registou o $(dP/dt)_{máx}$, para uma concentração de pó de $\rho_p = 600 \text{ g/m}^3$;
- As Figuras 44 e 45 correspondem ao ensaio em que se registou a CME, sendo a concentração de pó de $\rho_p = 35 \text{ g/m}^3$;
- As Figuras 46 e 47 correspondem a um dos ensaios em que se confirmou a CLO, para uma concentração de pó de $\rho_p = 500 \text{ g/m}^3$.

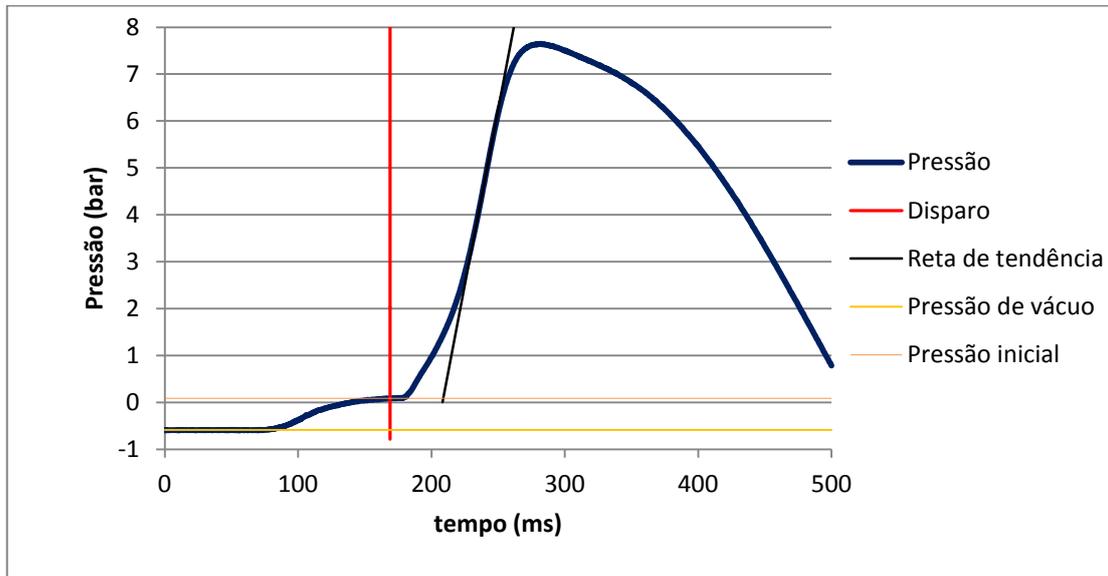


Figura 40 – Evolução da pressão durante a explosão da suspensão de pó de carvão com concentração de 250 g/m³.

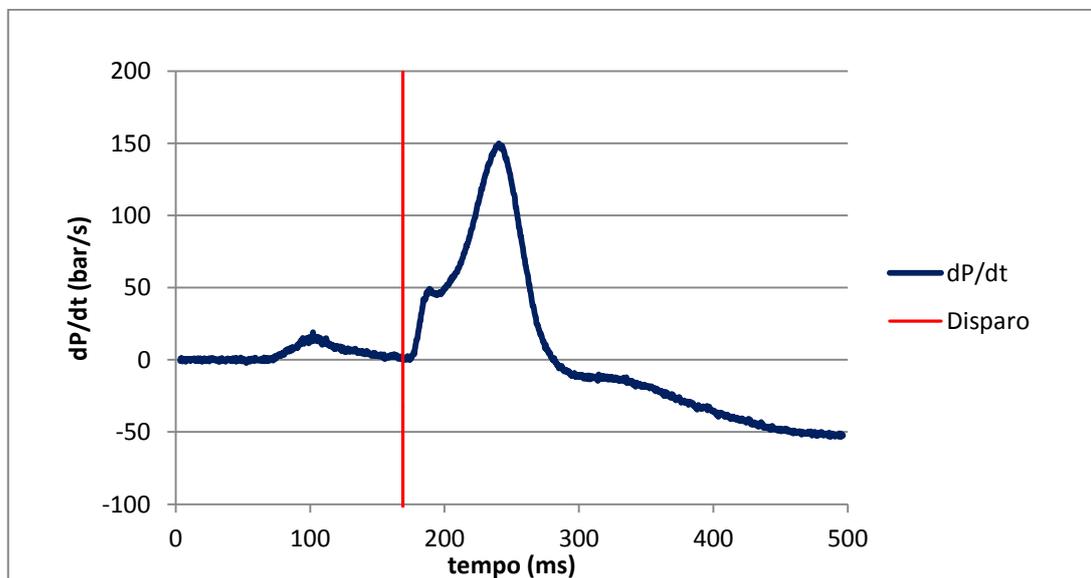


Figura 41 - Evolução da velocidade de aumento de pressão durante a explosão da suspensão de pó de carvão com concentração de 250 g/m³.

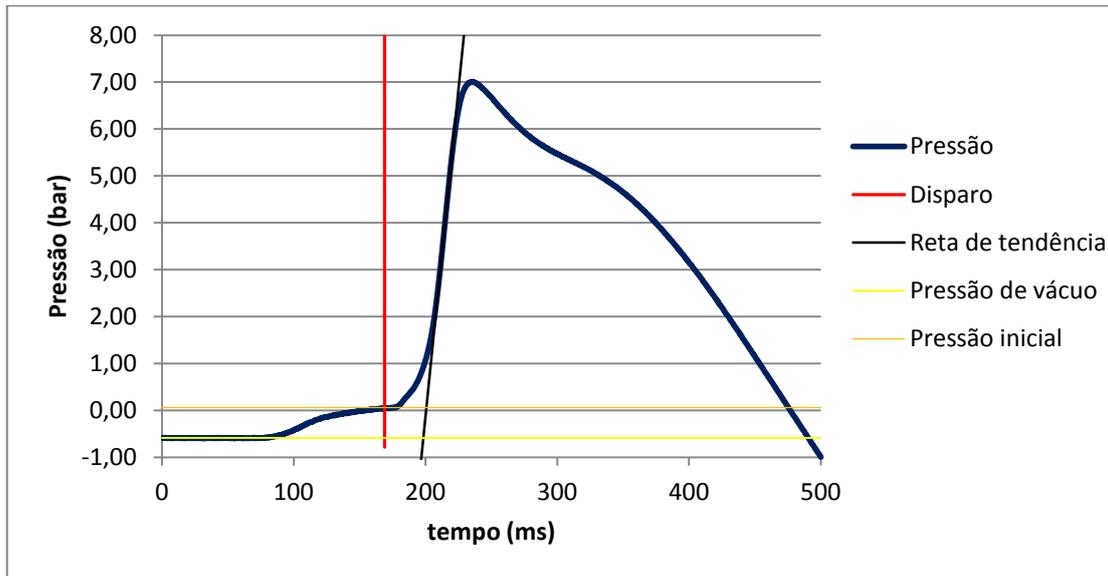


Figura 42 - Evolução da pressão durante a explosão da suspensão de pó de carvão com concentração de 600 g/m³.

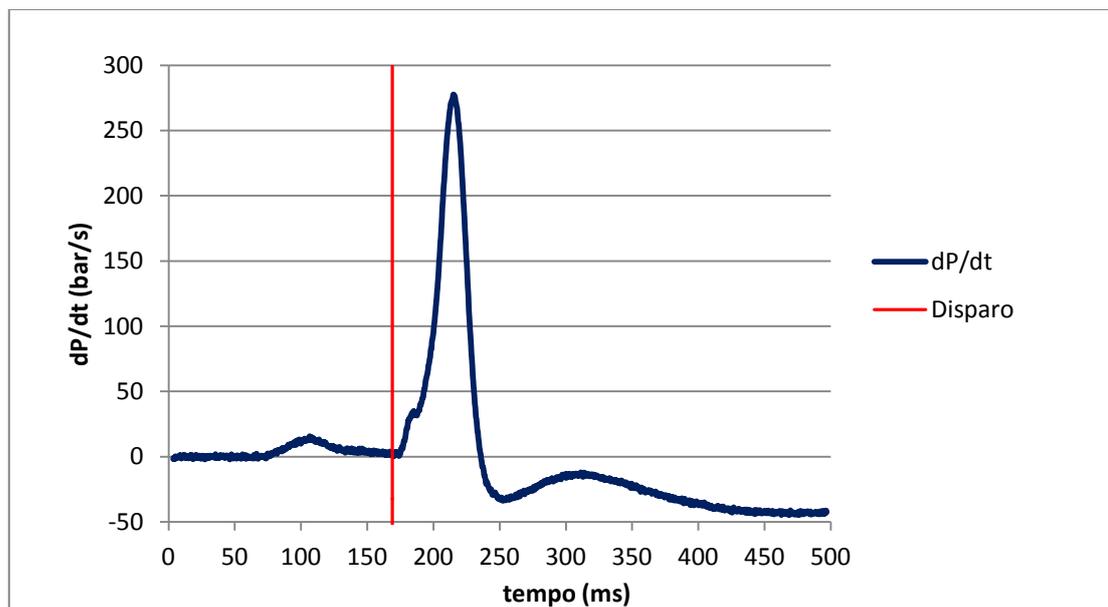


Figura 43 - Evolução da velocidade de aumento de pressão durante a explosão da suspensão de pó de carvão com concentração de 600 g/m³.

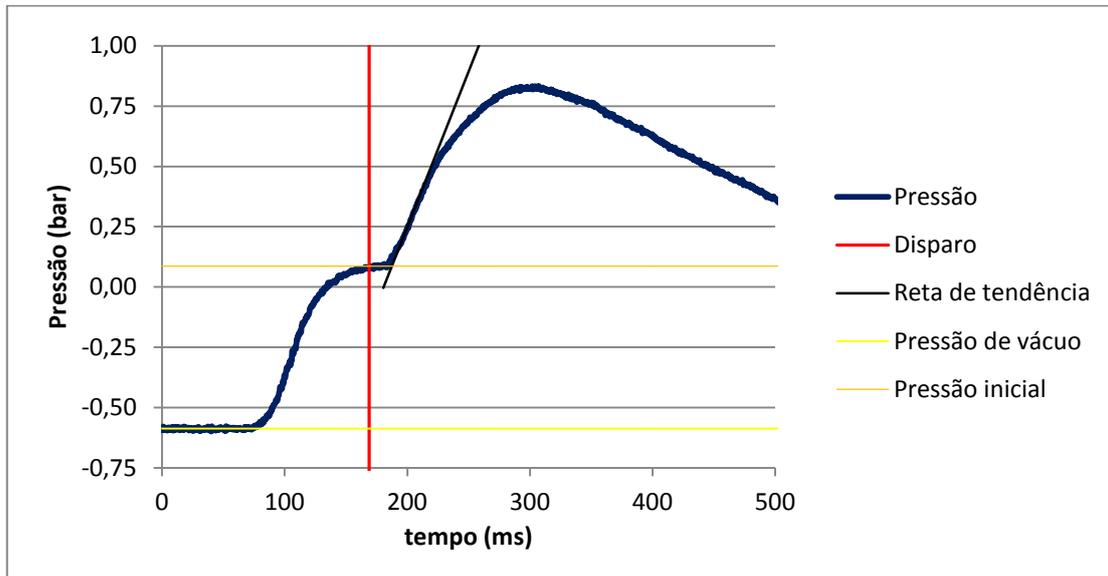


Figura 44 - Evolução da pressão durante a explosão da suspensão de pó de carvão com concentração de 35 g/m³.

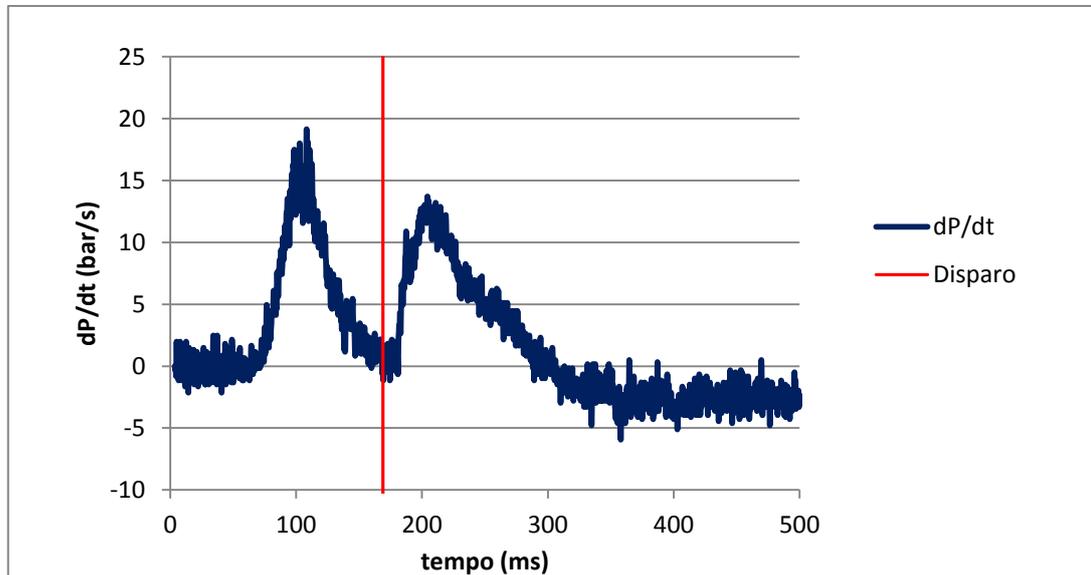


Figura 45 - Evolução da velocidade de aumento de pressão durante a explosão da suspensão de pó de carvão com concentração de 35 g/m³.

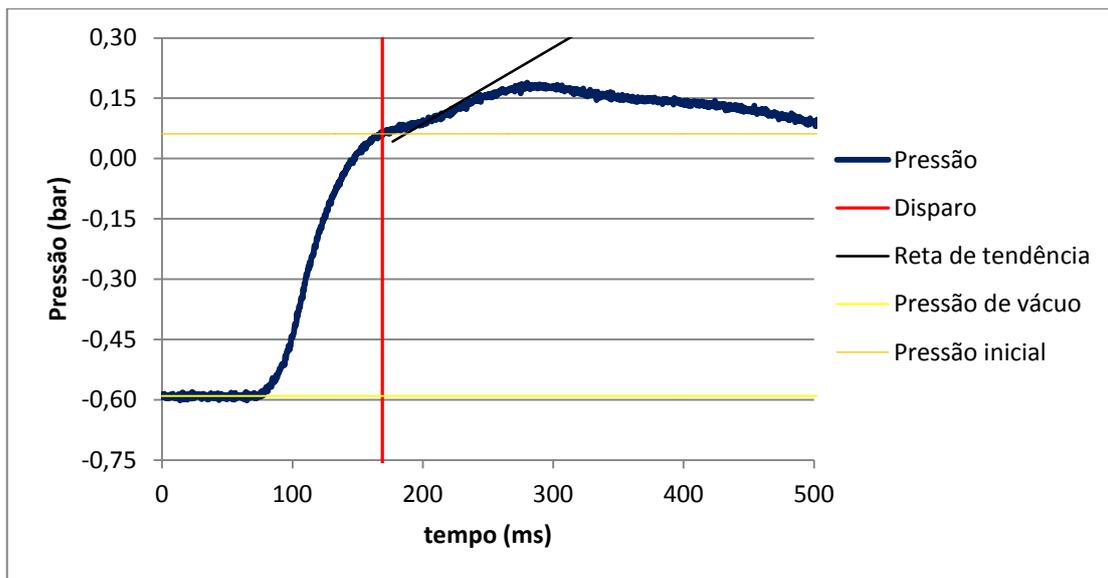


Figura 46 - Evolução da pressão durante um ensaio não explosivo da suspensão de pó de carvão com concentração de 500 g/m^3 e 13,2% de oxigénio.

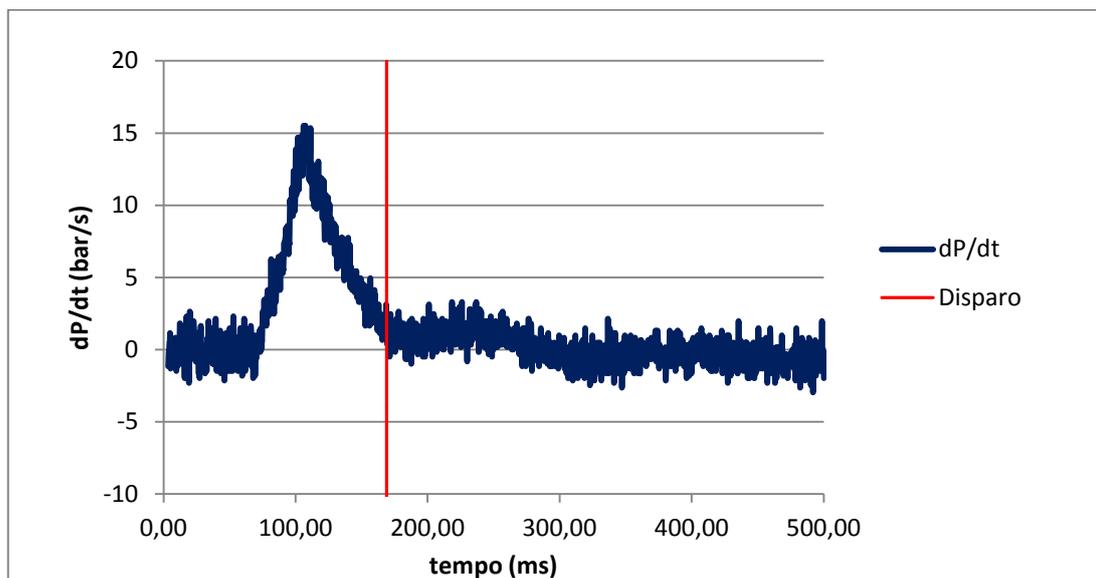


Figura 47 - Evolução da velocidade de aumento de pressão durante em ensaio não explosivo da suspensão de pó de carvão com concentração de 500 g/m^3 e 13,2% de oxigénio.

Na tabela 13 apresenta-se um resumo dos resultados dos ensaios realizados com pó de carvão, numa gama de concentração de 30 a 1000 g/m³. Os registos temporais das ações que antecedem a explosão nestes ensaios encontram-se representados na Tabela 14.

Tabela 13 – Resumo dos resultados dos ensaios realizados numa gama de concentração de pó de $\rho_p= 30$ a 1000 g/m³.

ρ_p (g/m ³)	P_{ex} (bar)	$(dP/dt)_{ex}$ (bar/s)	P_d (bar)
30	0,42	9,24	0,70
35	0,75	13,70	0,67
40	0,89	16,83	0,69
50	1,21	14,19	0,71
70	1,34	24,59	0,69
90	4,33	41,26	0,70
107	2,71	33,50	0,64
125	3,50	36,48	0,66
150	4,16	24,43	0,70
200	3,72	25,09	0,66
225	5,37	47,86	0,64
227	7,14	145,90	0,68
250	7,56	149,86	0,68
300	6,11	80,54	0,63
400	7,29	201,36	0,67
500	6,96	231,40	0,64
600	6,95	277,61	0,65
700	6,63	138,14	0,66
800	6,67	258,96	0,64
1000	6,70	148,21	0,70

Tabela 14 – Registo temporal das ações que antecedem a explosão nos ensaios realizados numa gama de concentração de pó de $\rho_p = 30$ a 1000 g/m^3 .

$\rho_p \text{ (g/m}^3\text{)}$	$t_d \text{ (ms)}$	$t_e \text{ (ms)}$	$t_i \text{ (ms)}$	$\Delta t_i \text{ (ms)}$	$t_1 \text{ (ms)}$	$t_v \text{ (ms)}$
30	77,40	105,00	64,00	35,80	157,00	91,60
35	81,60	105,00	64,00	16,60	119,40	87,40
40	77,40	105,00	64,00	16,00	149,40	91,60
50	79,80	105,00	64,00	29,40	169,20	89,20
70	84,60	105,00	64,00	14,20	142,00	84,40
90	81,60	105,00	64,00	7,80	201,80	87,40
107	79,20	105,00	64,00	21,20	226,60	89,80
125	84,40	105,00	64,00	14,60	245,20	84,60
150	80,60	105,00	64,00	26,40	263,00	88,40
200	83,60	105,00	64,00	14,80	221,60	85,40
225	84,60	105,00	64,00	15,00	142,80	84,40
227	81,60	105,00	64,00	24,40	133,40	87,40
250	83,60	105,00	64,00	15,20	111,20	85,40
300	86,20	105,00	64,00	15,40	143,20	82,80
400	83,20	105,00	64,00	15,60	100,40	85,80
500	101,50	107,00	62,00	15,80	95,50	67,50
600	83,60	105,00	64,00	16,00	143,80	85,40
700	82,60	105,00	64,00	16,20	118,80	86,40
800	80,20	105,00	64,00	16,40	81,20	88,80
1000	83,80	105,00	64,00	29,40	155,20	85,20

ANEXO F

Na Figura 48 encontra-se representada uma fotografia do sistema experimental utilizado no presente trabalho:



Figura 48 – Fotografia do sistema experimental.

ANEXO H

Na Figura 50 encontra-se representado o relatório da análise granulométrica ao pó de carvão:

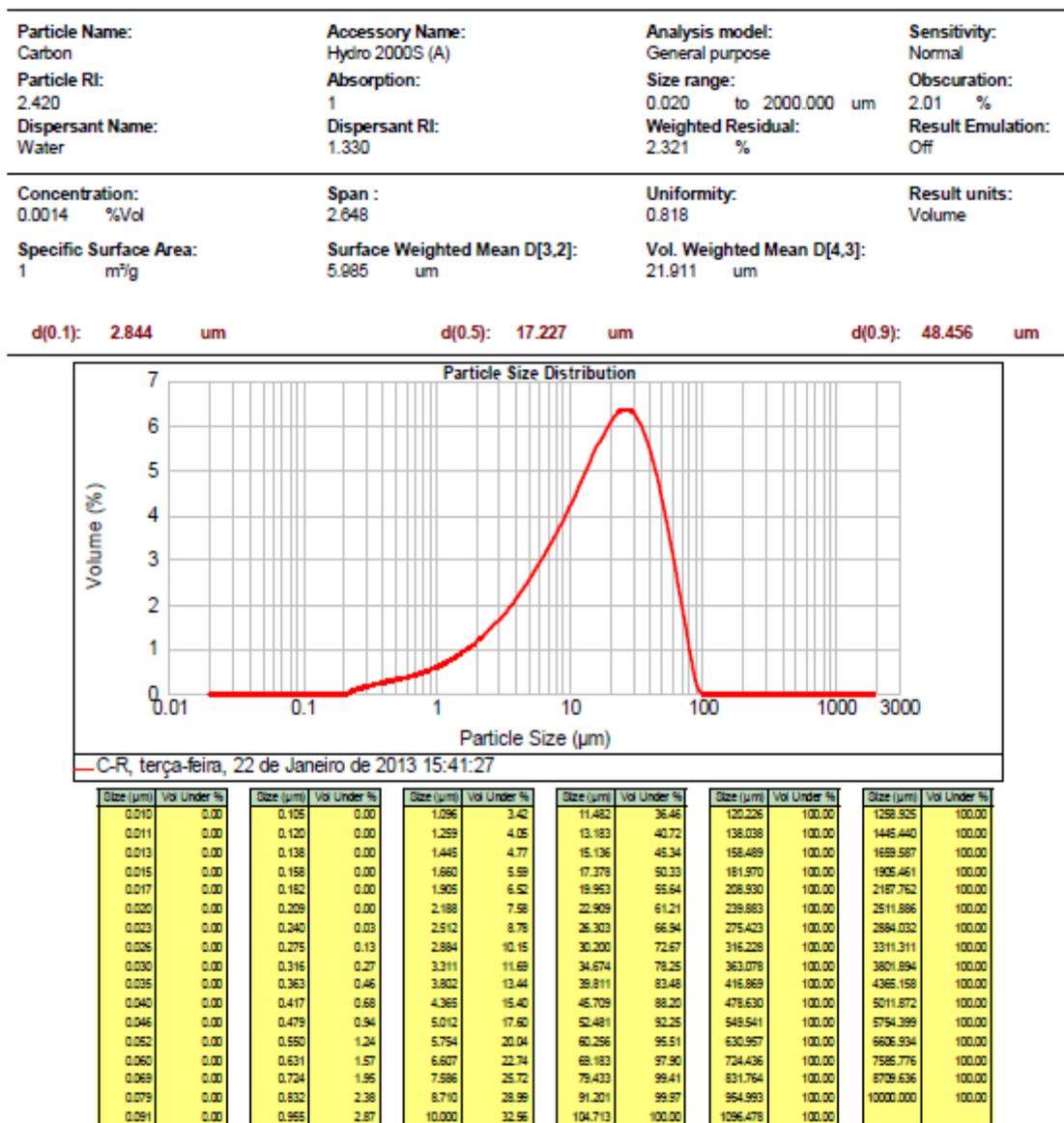


Figura 50 – Relatório da análise granulométrica do carvão.