

Caracterização da Ignição Térmica do Pó da Casca de Pinheiro

Carlos Eduardo Leal de Pinho

Dissertação do MIEM

Orientadora no ISEP: Prof.^a Rosa Maria Barbosa Rodrigues Pilão

Co-Orientador na FEUP: Prof. Paulo José da Silva Martins Coelho



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2012

Dedicatória

Aos meus Pais

Resumo

Neste trabalho experimental caracterizaram-se as condições de auto-ignição térmica de misturas de pó de casca de pinheiro bravo e ar no domínio das explosões. O estudo da ignição térmica compreendeu a determinação experimental da temperatura mínima de ignição avaliando-se para tal o efeito da variação da concentração e da granulometria do pó neste parâmetro. Os estudos foram realizados no reator de 1,2 L de capacidade, conhecido como a fornalha de 1,2 L de US Bureau of Mines. A uniformidade da dispersão da nuvem de pó foi avaliada através de imagens recolhidas numa câmara de alta velocidade durante os ensaios de dispersão realizados num reator em acrílico de 1,5 L de capacidade.

Foram testadas quatro granulometrias de pó diferentes, com diâmetros medianos mássicos de 41 μm , 83 μm , 123 μm e 267 μm . A ignição de cada uma destas frações granulométricas foi estudada em função da concentração das amostras e da temperatura inicial, realizando-se ensaios à pressão inicial de 1 atm até concentrações de pó da ordem dos 550 g/m³. Os resultados revelaram que o comportamento da curva de auto-ignição térmica das quatro granulometrias de pó estudadas é semelhante sendo consistente com a observação prévia da ausência de um limite superior de inflamabilidade.

No caso particular das partículas de diâmetro mediano mássico de 41 μm claramente se consegue definir a curva de auto-ignição, permitindo definir a temperatura mínima de ignição térmica nos 510 °C assim como definir o domínio de inflamabilidade da mistura de pó de casca de pinheiro bravo em ar. No caso particular das partículas de diâmetro mediano mássico de 83 μm , na gama de temperaturas entre os 550 e os 575 °C, foi detetada alguma dificuldade na definição clara da concentração a partir da qual a ignição é independente da concentração de pó. Este comportamento foi atribuído ao facto de este pó, em determinadas condições, ser caracterizado por um comportamento bi-tápico de explosão. Para este tamanho de partículas a temperatura mínima de ignição foi definida para os 540 °C. No caso das partículas de diâmetro mediano mássico de 123 μm , a dificuldade em definir a concentração a partir da qual a ignição é independente da concentração de pó começou a detetar-se a partir dos 625 °C. Para esta granulometria foi definida a temperatura mínima de ignição de 580 °C. No caso das partículas com diâmetro mediano mássico de 267 μm não foi possível realizar o número suficiente de ensaios para a correcta definição da curva de auto-ignição térmica.

Relativamente ao efeito da granulometria na temperatura mínima de ignição térmica, verificou-se um aumento da temperatura mínima de ignição com o aumento da granulometria, não sendo claro que haja uma estabilização da temperatura mínima de ignição para diâmetros abaixo de 41 μm , ou seja, com os resultados obtidos não é possível identificar com segurança um diâmetro característico abaixo do qual se pode considerar que a *TMI* é independente da granulometria.

Os resultados obtidos permitiram definir o domínio de inflamabilidade e ignição térmica do pó de casca de pinheiro bravo.

Palavras-chave: pinheiro bravo, auto-ignição, explosão de pó, dispersão de pó.

Abstract

The main objective of this experimental work was to characterize the thermal autoignition conditions of air pine bark dust mixtures. The study of thermal autoignition conditions consisted on the determination of the minimum ignition temperature, and thus the importance of the dust cloud concentration the particle size on that temperature was evaluated. These studies was conducted in a 1.2 L furnace, also know as U.S. Bureau of Mines 1.2 L Furnace. The uniformity of the dust cloud dispersion was evaluated through motion pictures obtained by a high velocity video camera during the dispersion tests performed in a 1.5 L acrylic furnace.

Four particle sizes with 41 μm , 83 μm , 123 μm and 267 μm of mass median diameters were tested. Ignition of each one of these particle sizes was studied as a function of their concentration and inicial temperature, for an absolute pressure of 1 atm. The covered dust cloud concentration went up to 550 g/m^3 . Results shown that the shape of the thermal ignitability boundary curve is equivalent for the four particle sizes studied, and was consistent with previous observations of an absence of any upper flammability limit.

For pine bark particles with a mass median diameter of 41 μm , both the ignitability and the flammability curves were clearly defined. For this particle size, the obtained minimum ignition temperature was of 510 °C. For particles with a mass median diameter of 83 μm , some difficulties were detected in the 550 to 575 °C temperature range. It was difficult to determine the concentration value for which ignition is independent of dust concentration. This behavior is due to the fact that for certain conditions the systematic evolution of the explosion is different and consists on a two-step flame propagation process. For this particle size, the minimum ignition temperature was of 540 °C. For particles with a mass median diameter of 123 μm it was rather difficult to define the concentration value for which ignition was independent of dust concentration. This issue was detected from temperatures starting at 625 °C. For this particle size the minimum ignition temperature was defined as 580 °C. For particles with the mass median diameter of 267 μm it was not possible to achieve a correct thermal ignitability curve, due to lack of insufficient ignition tests.

As far as the influence of the particle size upon the minimum thermal ignition temperature is concerned, it was observed an increase of the minimum ignition temperature with the increase of particle size, but it was not clear that there was a flat temperature behaviour below the particle size of 41 μm . This means that the results obtained were not enough to clearly identify a characteristic diameter below which the minimum ignition temperature is independent of particle size.

The obtained results permit to define the thermal ignitability and flammability domain of air pine bark dust mixtures.

Keywords: Pine bark, autoignition, dust explosion, dust dispersion.

Agradecimentos

À Professora Rosa Pilão, orientadora no ISEP, um agradecimento especial pela ajuda a nível experimental, pelo saber e rigor científico, sempre presente e disponível nas fases de ensaio e escrita da dissertação.

Ao Professor Paulo Coelho, orientador na FEUP, pela partilha do saber científico e as suas contribuições para o trabalho.

À Professora Alexandra Pinto, do Departamento de Engenharia Química da FEUP, pela ajuda laboratorial na caracterização granulométrica das amostras testadas na dissertação.

Ao Professor Manuel Alves, do Departamento de Engenharia Química da FEUP, pela cedência da câmara de vídeo de alta velocidade para a visualização dos ensaios de dispersão das misturas de pó de casca de pinheiro bravo em ar. À doutora Patrícia Sousa pela ajuda no manuseamento da câmara de vídeo.

Ao Centro de Materiais da Universidade do Porto, pela análise ao pó de casca de pinheiro bravo ao microscópio eletrónico de varrimento.

Ao INEGI, pela cedência das instalações e pela flexibilidade que me proporcionaram para a realização do trabalho experimental desta dissertação.

Aos colegas do INEGI que de algum modo me apoiaram na realização do trabalho, ou que contribuíram para o seu sucesso.

À Mónica Santos, minha aliada do dia-a-dia, o companheirismo e carinho demonstrados ao longo desta jornada. Agradeço o estímulo e o encorajamento contínuo durante as minhas fases de angústias na fase final da dissertação.

Por fim, à minha família, especialmente aos meus pais, pelo apoio incondicional, compreensão nos momentos de maior indisponibilidade minha, e por estarem sempre presentes nos momentos mais difíceis. Pela educação que me deram, e por insistentemente me transmitirem que se deve terminar o que se começa, independentemente das dificuldades que possam surgir.

Índice de Conteúdos

Dedicatória	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Agradecimentos.....	v
Índice de Figuras	viii
Índice de Tabelas	xi
Notação e Glossário	xii
Introdução.....	1
1.1 – Enquadramento do problema	1
1.2 – Fundamentação do trabalho	2
1.3 – Objetivos.....	3
1.4 – Estrutura da dissertação	3
Considerações Gerais sobre Explosões de Pós.....	5
2.1 – Introdução.....	5
2.2 – Significado de ignição.....	5
2.3 – Pentágono da explosão de pó	5
2.4 – Diferenças básicas entre nuvens de pós e gases.....	6
2.5 – Definição de pó.....	7
2.6 – Classificação dos pós	8
2.7 – Teoria de propagação de chama em explosões de pós	10
2.8 – Características globais da explosibilidade do pó	16
2.9 – Fontes de ignição das explosões de pós.....	22
2.10 – Limites de ignição	25
Instalação e Ensaio Experimentais	35
3.1 – Instalação experimental	35
3.2 – Perfis de temperatura	38
3.3 – Ensaio de ignição térmica.....	41
3.4 – Visualização da dispersão do pó	45
O Pó de Casca de Pinheiro e a sua Dispersão em Ar	49
4.1 – Introdução.....	49
4.2 – Caracterização física do pó da casca de pinheiro bravo	50
4.3 – Estudo da dispersão do pó da casca de pinheiro bravo	53
Ignição Térmica do Pó de Casca de Pinheiro Bravo em Ar.....	61
5.1 – Introdução.....	61
5.1 – Comportamento de ignição térmica	61
5.2 – Domínios de ignição térmica	64
Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro.....	71
6.1 – Ignição térmica	71
6.2 – Sugestões para o trabalho futuro.....	71

Referências e Bibliografia	73
ANEXO A: Incerteza das Leituras Experimentais	77
A.1 – Introdução	77
A.2 – Incerteza na Leitura da Temperatura	80
A.3 – Incerteza na Leitura da Pressão.....	82
A.4 – Incerteza na Determinação do Volume da Fornalha de 1,2 L	85
A.5 – Incerteza na Determinação da Concentração Média	86
ANEXO B: Evolução Histórica das Fornalhas	89
B.1 – Introdução	89
B.1.1 – Fornalha de Godbert-Greenwald	89
B.1.2 – Fornalha de BAM	91
B.1.3 – Fornalha de 1,2 L	92
B.1.4 – Fornalha de 6,8 L	95
ANEXO C: Modelos Numéricos de Determinação da Temperatura Mínima de Ignição	99
C.1 – Modelo de Cassel e Liebman e Tanaka.....	99
C.2 – Modelo de Cassel Nagy e Surincik	100
C.3 – Modelo de Mitsui e Tanaka	101

Índice de Figuras

Figura 2. 1 – (a) Curva de distribuição acumulada do tamanho de partícula de pó. (b) Distribuição de frequência do tamanho da partícula de pó: (A) Área superficial e (B) Massa ou volume (Adaptado de Abbasi <i>et al.</i> , 2007).....	8
Figura 2. 2 – Influência do diâmetro da partícula na concentração mínima de explosão do pó de carvão de Pittsburgh (adaptado de Hertzberg e Zlochower, 1990).....	18
Figura 2. 3 – Efeito da concentração na energia mínima de ignição para pó de um antioxidante com 40 μm (Bartknecht, 1981).	26
Figura 2. 4 – Domínio de ignição térmica do pó de carvão (adaptado de Cashdollar, 1998).	28
Figura 2. 5 – Domínio de inflamabilidade e ignição do pó de carvão (adaptado de Hertzberg e Cashdollar, 1987).....	29
Figura 2. 6 – Efeito do diâmetro da partícula na temperatura mínima de ignição do pó de carvão (Hertzberg <i>et al.</i> , 1982).	30
Figura 3. 1 – Corte vertical da fornalha de 1,2 L de capacidade (adaptado de Pilão, 2003).	36
Figura 3. 2 – Fornalha de 1,2 L de capacidade (Pilão, 2003) a) aspeto exterior, b) reator cerâmico.....	36
Figura 3. 3 – Evolução da pressão durante um ensaio com ignição negativa a 575 °C, para uma suspensão de 200 g/m ³ de partículas com 123 μm de diâmetro mediano mássico.	37
Figura 3. 4 – Localização dos pontos onde se efetuaram as medições de temperatura no interior do reator da fornalha de 1,2 L.....	39
Figura 3. 5 – Perfil de temperatura radial no reator da fornalha de 1,2 L.....	40
Figura 3. 6 – Perfil de temperatura axial no reator da fornalha de 1,2 L.	41
Figura 3. 7 – Esquema da instalação experimental de ensaios de ignição (adaptado de Pilão, 2003).	42
Figura 3. 8 – Mapa típico para a determinação da temperatura mínima de ignição do pó de polietileno (adaptado de ASTM E 1491).	43
Figura 3. 9 – Reator em acrílico de 1,5 L de capacidade.	45
Figura 3. 10 – Esquema da instalação experimental de ensaios de dispersão.....	46
Figura 3. 11 – Máquina de alta velocidade da Casio.....	47
Figura 4. 1 – Distribuição da frequência relativa do tamanho das partículas por granulometria.....	51
Figura 4. 2 – Morfologia das partículas de pó de casca de pinheiro bravo com 83 μm diâmetro mediano mássico. a) ampliação de 50 $\times$; b) ampliação de 5000 $\times$	52

Figura 4. 3 – Morfologia das partículas de pó de casca de pinheiro bravo com 123 μm diâmetro mediano mássico. a) ampliação de 50 $\times$; b) ampliação de 500 $\times$	52
Figura 4. 4 – Ilustração de dois tipos de dispersão (figura adaptada de Eckhoff, 2009).....	53
Figura 4. 5 – Ensaio de dispersão de partículas de diâmetro mediano mássico de 41 μm e concentração de 60 g/m^3	55
Figura 4. 6 – Ensaio de dispersão partículas de diâmetro mediano mássico de 41 μm e concentração de 400 g/m^3	56
Figura 4. 7 – Ensaio de dispersão partículas de diâmetro mediano mássico de 123 μm e concentração de 60 g/m^3	57
Figura 4. 8 – Ensaio de dispersão partículas de diâmetro mediano mássico de 123 μm e concentração de 240 g/m^3	58
Figura 5. 1 – Evolução da pressão durante um ensaio com ignição negativa a 575 $^{\circ}\text{C}$, para uma suspensão de 200 g/m^3 de partículas com 123 μm de diâmetro mediano mássico.	62
Figura 5. 2 – Evolução da pressão durante um ensaio positivo a 650 $^{\circ}\text{C}$, para uma suspensão de 200 g/m^3 de partículas com 123 μm de diâmetro mediano mássico.	62
Figura 5. 3 – Evolução da pressão durante um ensaio positivo a 650 $^{\circ}\text{C}$, para uma suspensão de 163 g/m^3 de partículas com 123 μm de diâmetro mediano mássico.	63
Figura 5. 4 – Evolução da pressão durante um ensaio positivo a 750 $^{\circ}\text{C}$, para uma suspensão de 75 g/m^3 de partículas com 123 μm de diâmetro mediano mássico.	64
Figura 5. 5 – Ignição térmica de suspensões de pó de casca de pinheiro bravo com 41 μm de diâmetro mediano mássico.	65
médio mássico.....	65
Figura 5. 6 – Ignição térmica de suspensões de pó de casca de pinheiro bravo com 83 μm de diâmetro mediano mássico.	65
Figura 5. 7 – Ignição térmica de suspensões de pó de casca de pinheiro bravo com 123 μm de diâmetro mediano mássico.	66
Figura 5. 8 – Ignição térmica de suspensões de pó de casca de pinheiro bravo com 267 μm de diâmetro mediano mássico.	66
Figura 5. 9 – Domínio de inflamabilidade e ignição térmica do pó de casca de pinheiro bravo.....	69
Figura 5. 10 – Efeito da granulometria na temperatura mínima de ignição da casca de pinheiro bravo, traço interrompido evolução extrapolada.	70
Figura A. 1 – Variação da incerteza na leitura da pressão.	85
Figura A. 2 – Variação da incerteza na determinação da concentração.	87
Figura B. 1 – Fornalha de Godbert-Greewald para determinação da temperatura mínima de ignição de nuvens de pó (figura adaptada de Eckhoff, 2003).	90
Figura B. 2 – Fornalha BAM para determinação da temperatura mínima de ignição de nuvens de pó (figura adaptada de Eckhoff, 2003).....	91
Figura B. 3 – Corte vertical da fornalha 1,2 L para determinação da temperatura mínima de ignição de nuvens de pó (figura adaptada de Conti <i>et al.</i> , 1993).	93

Figura B. 4 – Perspetiva da fornalha de 1,2 L (figura adaptada de Conti <i>et al.</i> , 1993).....	94
Figura B. 5 – Corte vertical da fornalha 6,8 L para determinação da temperatura mínima de ignição de nuvens de pó (figura adaptada de Conti <i>et al.</i> , 1993).	96
Figura B. 6 – Perspetiva da fornalha de 6,8 L (figura adaptada de Conti <i>et al.</i> , 1993).....	97
Figura B. 7 – Sistema de dispersão (figura adaptada de Conti <i>et al.</i> , 1993).	98

Índice de Tabelas

Tabela 3. 1 – Características das resoluções permitidas pela câmara de alta velocidade	47
Tabela 4. 1 – Composição química geral de casca de pinheiro bravo (% w/w base seca) (Semenova, 2005).....	50
Tabela 4. 2 – Relação das granulometrias das amostras de pós estudadas	51
Tabela A. 1 – Erros sistemáticos de aquisição e de conversão A/D	80
Tabela A. 2 – Incerteza associada à medição da temperatura.....	81
Tabela A. 3 – Limite de precisão para a leitura da temperatura	82
Tabela A. 4 – Incerteza total na leitura da temperatura.....	82
Tabela A. 5 – Erros sistemáticos de aquisição e de conversão A/D	83

Notação e Glossário

A	Constante	—
A_f	Área de frente de chama esférica	m^2
A^*	Constante	—
A_s	Área superficial da fornalha	m^2
B	Constante	—
B_r	Coeficiente de radiação	$cal \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1} \cdot K^{-4}$
B^*	Constante	—
c	Calor específico dos reagentes	$J \cdot kg \cdot K$
c_d	Calor específico médio do pó	$cal \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$
c_{pi}	Calor específico médio do constituinte i na mistura	$cal \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$
C_d	Concentração inicial do pó	$kg \cdot m^{-3}$
C_{dn}	Concentração da nuvem de pó	$g \cdot cm^{-3}$
$C_{dP/dtmax}$	Concentração para a violência de explosão ótima	$g \cdot m^{-3}$
C_{dr}	Concentração do pó não convertido em butileno	$kg \cdot m^{-3}$
C_{dra}	Concentração das partículas remanescentes à temperatura T_i	$kg \cdot m^{-3}$
C_f	Concentração do butileno à temperatura da reação T_r	$kg \cdot m^{-3}$
C_{fp}	Concentração do butileno	% V/V
C_g	Concentração de oxigénio	$g \cdot cm^{-3}$
C_{ga}	Concentração de oxigénio na superfície da partícula	$g \cdot cm^{-3}$
C_{gF}	Concentração de oxigénio à temperatura de reação ou da fornalha	$mol \cdot cm^{-3}$
C_{me}	Concentração de pó mais facilmente inflamável	$g \cdot m^{-3}$
C_{min}	Concentração mínima de explosão	$g \cdot m^{-3}$
C_o	Concentração de oxigénio à temperatura da reação T_r	$mol \cdot m^{-3}$
C_{Pmax}	Concentração correspondente à pressão máxima	$g \cdot m^{-3}$
$(dP/dt)_{max}$	Velocidade máxima de aumento de pressão	$bar \cdot s^{-1}$
d_c	Diâmetro médio da partícula	cm
D	Diâmetro da partícula desvolatilizada	m
$D_o=d_p$	Diâmetro inicial da partícula	m
D_p	Diâmetro inicial da partícula de pó	cm
D_{pn}	Diâmetro do pó à temperatura T_i	cm
E	Energia de ativação	$kcal \cdot mol^{-1}$
E_o	Energia de ativação da reação de oxidação	$cal \cdot mol^{-1}$
E_{eff}	Energia efetiva dissipada	J
E_{min}	Energia mínima de ignição	mJ
f	Fator de frequência	$cm \cdot s^{-1}$
F	Fator de forma	—
$\dot{G}$	Taxa de geração de calor	$cal \cdot s^{-1}$
G_a	Massa das partículas	g
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção	$cal \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$
h_n	Coeficiente de transferência de calor por convecção das gotas de pó liquefeito para os vapores	$cal \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$
h_o	Coeficiente de transferência de calor por convecção entre a chapa da fornalha e o ambiente	$cal \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$
H	Calor de reação	$cal \cdot mol^{-1}$

k	Condutividade térmica do ar	$\text{cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
k_c	Coefficiente de transferência de calor	$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$
k_i	Condutividade térmica do isolamento da fornalha	$\text{cal}\cdot\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
k_m	Condutividade térmica da mistura à temperatura da reação T_r	$\text{cal}\cdot\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
k_r	Constante da taxa de reação	$\text{cal}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^3$
k_s	Condutividade térmica da chapa em inox da fornalha	$\text{cal}\cdot\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
k_t	Condutividade térmica do reator cerâmico da fornalha	$\text{cal}\cdot\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
K_s	Constante da taxa de reação	$\text{cm}\cdot\text{K}^{-1/2}\cdot\text{s}^{-1}$
K_{st}	Índice de deflagração	$\text{bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
l	Diâmetro da nuvem de pó	cm
L'	Espessura da nuvem de pó	cm
m	Massa de uma partícula	g
m_0	Massa de reagente inicial	kg
m_u	Massa de reagente não queimado	kg
M_{dt}	Massa do pó	g
M_{ot}	Massa do oxigénio	g
n	Número de partículas	—
n_p	Número de partículas de pó na fornalha ou numa nuvem de pó	—
N_i	Número de moles do constituinte i na mistura	—
$P_0=P_i$	Pressão inicial	bar
$P_m=P_{max}$	Pressão máxima de explosão	bar
$\dot{Q}$	Calor de reação	$\text{cal}\cdot\text{g}^{-1}$
$\dot{Q}_G$	Taxa de geração de calor por unidade de volume	$\text{cal}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-3}$
$\dot{Q}_{Ga}$	Taxa de geração de calor por unidade de área superficial da partícula de pó	$\text{cal}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$
$\dot{Q}_L$	Taxa de perda de calor por unidade de volume	$\text{cal}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-3}$
$\dot{Q}_{La}$	Taxa de perda de calor por unidade de área superficial da partícula de pó	$\text{cal}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$
r_d	Raio das partículas de pó	cm
r_f	Raio da chama	m
r_s	Raio externo da parede em chapa da fornalha	cm
r_{si}	Diâmetro externo do isolamento da fornalha	cm
r_{ti}	Raio interno do tubo cerâmico da fornalha	cm
r_{to}	Raio externo do tubo cerâmico da fornalha	cm
R	Constante dos gases perfeitos	$\text{cal}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
R_0	Raio do reator	m
S	Área superficial do reator	m^2
S_d	Fator relativo à área superficial específica do pó	—
S_e	Velocidade de expansão dos produtos de reação	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
S_f	Velocidade de chama	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
S_u	Velocidade de queima	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$S_{u,r}$	Velocidade de queima no estado de referência (300 K e 1 atm)	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
t	Constante de tempo	s
T	Temperatura	K
T_{in}	Temperatura de ignição	K
T_0	Temperatura inicial	K
T_a	Temperatura ambiente	K
T_b	Temperatura final (dos reagentes queimados)	K
T_d	Temperatura de desvolatilização/decomposição das gotículas	K
T_F	Temperatura da fornalha	K
T_i	Temperatura da parede da fornalha	K

T_m	Temperatura de fusão	K
T_r	Temperatura de reação	K
T_S	Temperatura da superfície da partícula	K
T_s	Temperatura da superfície sólida	K
T_u	Temperatura dos gases por queimar	K
$\dot{U}$	Coeficiente global de transferência de calor da parede da fornalha para a envolvente	$\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$\dot{U}_{np}$	Taxa de perda de calor da nuvem de pó	$\text{cal}\cdot\text{s}^{-1}$
$\dot{V}'$	Taxa de perda de calor por unidade de volume para as paredes da fornalha	$\text{cal}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-3}$
V_f	Volume da fornalha	cm^3
Vol	Percentagem volúmica de voláteis	%
x_0	Velocidade da onda de desvolatilização	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Y	Altura da fornalha	cm

Letras gregas

α	Difusibilidade térmica do gás	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
α_t	Fator de turbulência	—
β	Constante empírica	—
γ	Constante adiabática	—
γ_e	Constante empírica	cm
ΔP	Gradiente pressão	bar
ε_1	Emissividade da chama	—
ε_2	Emissividade da partícula	—
ε_3	Emissividade da parede da fornalha	—
θ_i	Coeficiente de sensibilidade	—
θ	Percentagem de voláteis queimados	%
π	Razão entre o perímetro da circunferência e o diâmetro de um círculo	—
ρ	Massa volúmica	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ_s	Massa volúmica do sólido	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
ρ_u	Massa volúmica dos gases por queimar	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}\cdot\text{s}^{-1}$
τ	Tempo médio de reação	s
τ_c	Constante de tempo de combustão	s
τ_d	Constante de tempo de desvolatilização	s
τ_m	Constante de tempo de mistura	s

Lista de Siglas

ASTM	American Society for Testing and Materials
CETERM	Unidade Térmica Industrial do INEGI
EN	European Norm
INEGI	Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
ISO	International Organization for Standardization
NFPA	National Fire Protection Association

Introdução

1.1 – Enquadramento do problema

As explosões de pós constituem um risco para a vida e para o património em muitos estabelecimentos comerciais e industriais. Se aliarmos aos pós a presença de gases inflamáveis, a segurança no trabalho, como por exemplo nas indústrias mineiras, é substancialmente agravada. Apesar dos efeitos destrutivos das explosões de pós e gases serem semelhantes, o risco de explosão de pós é mais imprevisível. Nas minas de carvão e mesmo em minas pouco profundas a emissão de gases é pouco frequente. O mesmo acontece em indústrias ou lares em que normalmente as pequenas fugas são eliminadas por diluição ou removidas por ventilação forçada. Por outro lado o pó não é removido eficientemente por ventilação e acumula-se nos sistemas de ventilação. Assim, a probabilidade de explosão aumenta continuamente pelo aumento da presença de pó depositado e só pode ser minimizado tomando-se precauções adequadas para eliminar e neutralizar o pó acumulado (Conti *et al.*, 1983).

No pior período da história mineira dos Estados Unidos, de Dezembro de 1907 a Dezembro de 1908, mais de 1.000 mineiros foram mortos devido a explosões. A reação do público a estes incidentes conduziu à criação da Bureau of Mines, pela parte do Congresso, investida de autoridade para inquirir as causas desses desastres. Ao longo das décadas do século passado, à medida que se foram apurando as causas desses acidentes e se introduziram medidas preventivas para as minimizar, e também à medida que foram sendo implementadas regras de segurança, verificou-se que o nível da taxa de mortalidade decaiu nas décadas subsequentes. Nos anos 70 a taxa de mortalidade devida às explosões foi de sete mortes por ano. Lamentavelmente, como resultado de diversos desastres, o período de Abril de 1981 a 1982 foi o pior desde a assinatura do Ato de 1969 de Segurança e Saúde das Minas de Carvão. A nova década de 80 começou com quatro grandes desastres dando-se mais de 43 fatalidades no decorrer desse período anual de 81 a 82. (Conti *et al.*, 1983).

O carvão que é queimado para produzir vapor e gerar eletricidade é previamente pulverizado em pó, e depois é transportado pneumáticamente para alimentar o queimador da caldeira. O risco de explosão é considerável em todos os estágios da produção de eletricidade, desde a produção do carvão na mina até à combustão do mesmo na central elétrica. O risco de explosão não é somente devido à acumulação intencional do pó nas instalações industriais mas também devido à acumulação do mesmo em equipamentos que são usados para transporte, limpeza, secagem, pulverização e queima do carvão (Conti *et al.*, 1983).

Para além do risco de explosão na indústria mineira este também pode ocorrer em espaços confinados tais como silos e armazéns para armazenamento de produtos agrícolas e industriais, por serem locais fechados, pouco ventilados e por isso perigosos. Estes produtos

podem ser farinhas de trigo, milho, soja, cereais, açúcares, arroz, chás, cacau, couro, enxofre, magnésio e outros.

As indústrias que processam produtos alimentícios e as unidades armazenadoras de grãos, apresentam pois alto potencial de risco de incêndios e explosões. O trabalho nessas unidades consiste basicamente em receber os produtos, armazenar, transportar e descarregar. O processo inicia-se com a chegada dos camiões graneleiros e ao descarregar o produto nas moegas, produzem uma enorme nuvem de poeira, em condições e concentrações propícias a uma explosão. As poeiras acumuladas no local de trabalho, depositada nos pisos, elevadores, túneis e transportadores, apresentam também um risco de explosão muito grande.

Em Portugal também é comum a ocorrência de explosões em indústrias. Mais recentemente, em Maio de 2006, ocorreu uma explosão num silo de serradura numa empresa em Tomar.

Em Janeiro de 2007 deflagrou um incêndio numa fábrica de óleos do Pocinho na freguesia de Vila Nova de Foz Côa. Uma falha humana poderá ter estado na origem do incêndio, pois o ventilador de arrefecimento de partículas esteve demasiado tempo sem funcionar o que provocou um aquecimento abrupto do material que circula nas tubagens, provocando uma ascensão das partículas incandescente que deram início à explosão/queima.

Em Janeiro de 2008 ocorreu numa fábrica em Cantanhede, num silo com serradura, uma explosão. Segundo um dos responsáveis da fábrica a origem da explosão terá estado nas faíscas provocadas por uma lixa que se partiu, numa das máquinas da fábrica. Algumas faíscas foram aspiradas através das condutas de aspiração do pó e da serradura, chegando ao silo. Dentro do silo, matéria incandescente terá então provocado a explosão e consequente incêndio.

Em Maio de 2011 deflagrou um incêndio seguido de explosões num silo no porto de Aveiro durante a operação de descarga de um camião que transportava pellets de madeira. Segundo um dos responsáveis da unidade fabril a origem deveu-se ao facto da carga já ter vindo em combustão lenta que ao entrar na boca dos silos provocou uma pequena explosão.

1.2 – Fundamentação do trabalho

A utilização de fontes renováveis para a produção de energia foi incentivada e fortemente divulgada na Europa e nos Estados Unidos da América a partir dos finais dos anos setenta. Neste contexto, a produção de energia a partir de biomassa vegetal constitui uma componente importante, inicialmente valorizando os resíduos agrícolas, florestais e agro-industriais já existentes, e posteriormente dando cada vez mais importância à produção de biomassa com fins energéticos. Em Portugal, a principal fonte de biomassa é, sem dúvida, a floresta a qual representa um terço da área total do País.

Com o objetivo de minimizar os custos de transporte, opta-se por utilizar biomassa densificada ou, em alguns casos, misturando a biomassa com um combustível fóssil como por exemplo turfa, sob a forma de pellets ou briquetes. É no contexto da produção, corte e manuseamento das pellets que pode haver o desenvolvimento incontroado de reações de explosão em pós de casca de pinheiro.

Já na indústria da transformação da madeira, para a obtenção de serradura, pode também dar-se o caso de haver reações incontroadas de explosão dos pós aquando da

refinação das aparas assim como no processo de mistura da serradura a alta temperatura para a obtenção do produto final, tais como os painéis termoplásticos. De fato não existem (ou são muitos escassos) estudos e levantamentos sistemáticos das condições e mecanismos que conduzam à iniciação, desenvolvimento e subsequente propagação de explosões de pó de casca de pinheiro em ar. Este trabalho pretende pois minorar esta lacuna, iniciando o estudo das condições de ignição de pós de casca de pinheiro.

1.3 – Objetivos

Pretende-se desenvolver um trabalho experimental no domínio das explosões de forma a caracterizar as condições de ignição térmica das misturas de pó de casca de pinheiro bravo e ar. A caracterização da ignição térmica diz respeito à determinação experimental da temperatura mínima de ignição e da sua dependência relativamente à concentração e ao tamanho das partículas sólidas. Serão testados quatro tamanhos de partículas com diâmetros medianos mássicos de 41 μm , 83 μm , 123 μm e 267 μm , e para cada granulometria serão realizados ensaios com concentrações até cerca de 550 g/m^3 . Será, ainda, avaliado o mecanismo de ignição e propagação de chama seguido pela mistura do pó de casca de pinheiro em ar assim como será avaliado o estado da nuvem de pó criada durante o intervalo de tempo onde a probabilidade de ignição térmica existe.

1.4 – Estrutura da dissertação

A dissertação está estruturada sob a forma de 6 capítulos. Sendo que nos primeiros três introduz-se o tema, apresenta-se a teoria subjacente, necessária para a compreensão dos fenómenos, e descreve-se a instalação experimental. Pretende-se deste modo introduzir o leitor e facilitar a interpretação do trabalho. Nos restantes capítulos, 4, 5 e 6 apresenta-se a contribuição realizada no âmbito do trabalho científico.

Mais concretamente, no Capítulo 2 é apresentada alguma teoria sobre explosão de pós com respetivo levantamento bibliográfico. Explica-se a diferença entre nuvens de pós e gases assim como se explica a teoria de propagação de chama em explosões de pós. Explana-se também os fatores que influenciam a explosibilidade dos pós assim como se apresenta uma listagem das fontes de ignição que podem proporcionar o desencadeamento das explosões de pós. Os parâmetros que limitam a ignição são também apresentados. Por fim, faz-se referência a modelos numéricos para a previsão da temperatura mínima de ignição térmica.

O Capítulo 3 descreve a instalação experimental com toda a sua panóplia instrumental, fundamental para a realização do estudo da explosão do pó de pinheiro bravo e da visualização da dispersão das suspensões de pó em ar, e ainda apresenta a metodologia dos ensaios a realizar.

O Capítulo 4 serve para introduzir a casca de pinheiro e o seu pó. Apresentam-se as suas propriedades químicas e físicas, a sua estrutura morfológica e o estudo da sua dispersão.

No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos sobre a ignição do pó de casca de pinheiro bravo analisando-se o efeito resultante da variação da concentração e do tamanho das partículas de pó.

Finalmente no último capítulo, Capítulo 6, apresenta as principais conclusões do trabalho e indicam-se recomendações para trabalhos futuros.

Considerações Gerais sobre Explosões de Pó

2.1 – Introdução

A probabilidade de ocorrência de uma explosão de pó em qualquer sistema é o produto da probabilidade de ocorrência de dois eventos ou condições que são independentes entre si. A primeira condição envolve a presença de uma região inflamável dentro do sistema, isto é, pó deve estar presente num estado tal de dispersão e concentração acima do seu ponto limite de inflamabilidade. A segunda condição envolve a presença de uma fonte energética capaz de iniciar uma onda de combustão. Ambas as condições são necessárias para que haja ou se dê uma explosão (Conti *et al.*, 1983).

2.2 – Significado de ignição

A palavra ignição tem significado apenas quando aplicada a substâncias capazes de auto sustentarem-se numa combustão ou numa onda de decomposição exotérmica. Ignição pode assim ser definida como o processo pelo qual a propagação é iniciada. A ignição ocorre quando a taxa de geração de calor no mesmo volume de substância excede a taxa de dissipação de calor desse volume e continua em tal progressão à medida que a temperatura vai aumentando. Eventualmente é atingida uma temperatura tal que a difusão dos reagentes controla a taxa de geração de calor e é atingido um estado estável de combustão ou decomposição.

A dimensão característica do volume para a qual a ignição ou não ignição é decidida é da ordem de grandeza da espessura da frente de chama auto sustentada pela mistura. A propagação da frente de chama pode ser considerada como uma onda contínua que expõe progressivamente novas zonas da nuvem para condições onde a taxa de geração excede a taxa de dissipação de calor (Eckhoff, 2003).

2.3 – Pentágono da explosão de pó

Enquanto um incêndio é devido a três fatores, combustível, oxidante e ignição, que se juntam para que se dê o chamado “triângulo de fogo”, a explosão de pó reclama mais dois fatores: mistura (de pó com o ar) e confinamento (da nuvem de pó). O “pentágono da explosão de pó” é formado quando estes cinco fatores ocorrem em simultâneo, ou seja,

- i) presença de um combustível de uma forma finamente repartida;

- ii) disponibilidade de oxidante;
- iii) presença de uma fonte de ignição;
- iv) algum grau de confinamento;
- v) estado da mistura dos reagentes.

É de notar que apesar de uma nuvem poder estar parcialmente confinada isso não implica que não haja explosão altamente destruidora. Também nestes casos, a nuvem de pó comporta-se numa maneira similar a nuvens inflamáveis de gases (Abbasi *et al.*, 2007).

2.4 – Diferenças básicas entre nuvens de pós e gases

As misturas explosivas de gases e as nuvens explosivas de pós, quando existem, têm de fato ignição e propriedades de combustão similares (Eckhoff, 2006). No fundo, o fenómeno de explosão de pós pode ser analisado usando os conceitos e ferramentas que existem para o estudo das explosões envolvendo gases (Abbasi *et al.*, 2007). Assim no que respeita às explosões de pós estas comportam-se de maneira similar às explosões de misturas de gás no que toca a:

- limites de explosibilidade;
- velocidades laminar de queima e distâncias de congelamento;
- resposta da velocidade de queima à turbulência da nuvem;
- fenómeno de detonação;
- pressões de explosão adiabática a volume constante de magnitudes iguais;
- energia mínima de ignição bem definida;
- temperatura mínima de ignição.

Quanto à dinâmica das partículas de pós comparativamente com a dinâmica molecular de um gás podemos afirmar o seguinte. A partir do momento em que um combustível gasoso é homogeneamente misturado com ar, a mistura, em praticamente todas as situações, manter-se-á homogénea devido ao movimento molecular aleatório. No entanto para as nuvens de pó, as partículas do combustível são geralmente maiores que as moléculas do ar e são afetadas pelas forças inerciais e força gravítica em vez de serem afetadas pelo movimento aleatório molecular. Além disso, onde as colisões entre as moléculas de gás são elásticas, no caso das partículas de pó podem encaminhar para aglomeração de partículas e provocar deposição das mesmas. Em alguns equipamentos de processos industriais algum do pó é mantido em suspensão através da rotação e vibração de toda a unidade, movimentos de partes móveis ou pelo escoamento de ar. Assim, suspensões de nuvens explosivas de pós podem ou não existir em normais situações de operacionalidade fabril em função do tipo de processo de transformação. Moedores, alguns tipos de misturadores e secadores de pó, coletores de pó e as respetivas condutas, condutas de transporte pneumático de pós e elevadores de êmbolo são exemplos deste tipo de equipamentos.

As nuvens de pó de tamanho considerável, isto é, da ordem de 1 m^3 , podem ser intencionalmente ou não geradas fora do ambiente fabril. No entanto, a duração do processo de geração da nuvem é normalmente curto. As partículas de pó começarão a depositar-se após a conclusão do processo de geração da nuvem e tipicamente a vida útil destas nuvens, fora da zona dos equipamentos, é da magnitude do segundo. Exceções seriam as pequenas fugas de curta duração de, por exemplo, em flanges e em linhas pneumáticas de transporte, mas nestes casos os volumes das nuvens produzidas são normalmente pequenos. Devido ao tamanho superior das partículas de pó comparativamente com as moléculas de gás, estas não viajam através de buracos/furos e fendas da ordem de 1 mm de diâmetro ou menor como as moléculas de gás assim o fariam. Em princípio as partículas de pó podem ser transportadas por passagens estreitas pelo escoamento de ar gerado pelo diferencial de pressão. No entanto, as partículas do pó podem facilmente aderir à área circundante da entrada da passagem e eventualmente bloqueá-la. Além disso, as partículas de pó que tenham tido a capacidade para passar por essas zonas estreitas, depositar-se-ão assim que a velocidade do ar baixe para valores negligenciáveis. Portanto, partículas de pó que entrem nestas condições nestes recintos não ficarão suspensas e não criarão condições para uma nuvem explosiva, mas depositar-se-ão em camadas nas superfícies internas do recinto (Eckhoff, 2006).

2.5 – Definição de pó

O tamanho da partícula é o critério fundamental para a definição de pó como determinado por várias organizações. Por exemplo, a National Fire Protection Association (NFPA) define o pó combustível como:

Qualquer sólido material devidamente partido/dividido de 420 μm tamanho de diâmetro capaz de passar no peneiro No.40 da Norma Americana e que representa risco de fogo ou explosão quando devidamente disperso no ar.

Adicionalmente, a antiga US Bureau of Mines desenvolveu a seguinte classificação baseada no tamanho da partícula:

- Pó (minas de carvão): partículas $< 850 \mu\text{m}$;
- Pó (indústria): partículas $< 425 \mu\text{m}$;
- Pó de carvão: partículas $< 75 \mu\text{m}$;
- Pó de minério: partículas $< 850 \mu\text{m}$ com 20% de partículas $< 75 \mu\text{m}$. (Amyotte *et al.*, 2007).

A Figura 2.1 mostra a distribuição acumulada e de frequência do tamanho das partículas de um pó típico. Tais curvas de frequência são vantajosas na visualização da distribuição do tamanho da partícula de pó. O tamanho da partícula de pó pode ser calculado pelo diâmetro médio superficial e ou pelo diâmetro mediano mássico. Mas como é a área de superfície da partícula de pó que desempenha o papel mais importante no processo de combustão, o diâmetro médio da partícula que reflete a área de superfície é a característica mais apropriada que a baseada na massa (Abbasi *et al.*, 2007).

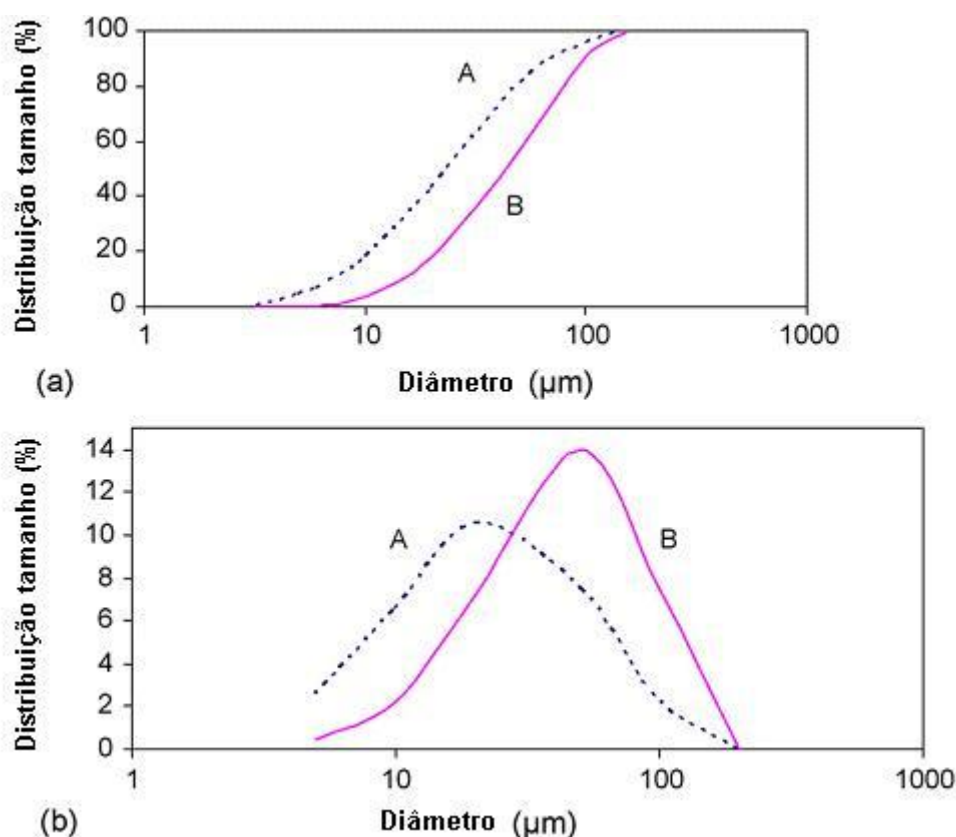


Figura 2. 1 – (a) Curva de distribuição acumulada do tamanho de partícula de pó. (b) Distribuição de frequência do tamanho da partícula de pó: (A) Área superficial e (B) Massa ou volume (Adaptado de Abbasi *et al.*, 2007).

No entanto, na comunidade científica existe grande discussão à volta do diâmetro a adotar pelo que neste trabalho seguiu-se a metodologia utilizada pelos trabalhos de Pilão (2003) e Semenova (2005), ou seja, utilizou-se o diâmetro mediano mássico como diâmetro de referência.

2.6 – Classificação dos pós

Se a composição de um pó for conhecida então é possível saber-se se é ou não explosivo consultando para tal a lista de pós testados experimentalmente e publicada pela HM Factory Inspectorate of the Department of Employment no Reino Unido. De acordo com essa classificação, os pós com propagação de chama quando inflamados são classificados como pertencentes ao Grupo A. Os pós, quando inflamados (mas não termicamente), sem propagação de chama são classificados como pertencentes ao Grupo B. Esta classificação é aplicável a pós que estão perto ou à temperatura atmosférica de 25 °C na altura da ignição. A elevadas temperaturas alguns pós do Grupo B podem-se tornar explosivos. Pós que são inflamáveis mas não explosivos podem-se tornar explosivos se misturados com pó combustível, por exemplo, as cinzas da combustão do carvão que são inflamáveis mas não explosivas quando misturadas com pó combustível pulverizado ou com coque de petróleo tornam-se explosivas. Isto ocorre devido ao aumento da matéria volátil fornecida pelo pó combustível (Abbasi *et al.*, 2007).

Uma segunda classificação dos pós é baseada no valor de K_{St} , este termo representa a velocidade máxima de aumento de pressão que ocorre num reservatório esférico de 1 m³ de capacidade quando o pó é inflamado. Por outras palavras, K_{St} é o índice de deflagração e representa a “violência explosiva de um pó”. O conceito de K_{St} foi introduzido por Bartknecht (citado em Eckhoff, 2003) que descreveu a Lei Cúbica como:

$$\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max} V^{1/3} = \text{const} = K_{St} \quad (2.1)$$

que confirma o comportamento experimental de uma variedade de pós em reservatórios de volume desde os 0,04 m³. O índice de deflagração (bar.m/s) sendo numericamente identificado como $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$ (bar/s) no reservatório de 1 m³ de capacidade pela Norma ISO é denotado como sendo a constante específica do pó. A abreviatura “St” tem a sua origem na palavra alemã “staub” que significa pó.

A explosibilidade é categorizada da seguinte forma:

K_{St}	Grupo St0: não explosivo;
$0 < K_{St} < 200$	Grupo St1: fraco;
$200 < K_{St} < 300$	Grupo St2: forte;
$300 < K_{St}$	Grupo St3: muito forte.

Tem de ser realçado que a Lei Cúbica é válida para reservatórios geometricamente similares, isto é, caso a espessura de chama seja negligenciável face ao raio do reservatório e caso a velocidade de queima função da pressão e temperatura seja idêntica em todos os volumes. Assim, o índice de deflagração, K_{St} , está ligado à medida arbitrária da violência da explosão. Este fato tem sido muitas vezes negligenciado quando discutido o índice relativamente à prática industrial. Na verdade o índice de um dado material, determinado por diferentes reservatórios/aparelhos, pode diferir de várias ordens de grandeza mesmo por coeficientes de 20. É pois essencial obter o índice pelos testes da norma ISO 6184/1.

A antiga US Bureau of Mines desenvolveu um índice de explosibilidade que relaciona os pós em comparação com o carvão de Pittsburgh. O índice de explosibilidade, IE , é o produto da severidade da explosão, SE , pela sensibilidade da ignição, SI :

$$IE = SI \times SE \quad (2.2)$$

$$SI = \frac{(TMI \times EMI \times CME)_{carvãoPitts.}}{(TMI \times EMI \times CME)_{amostra}} \quad (2.3)$$

$$SE = \frac{(PME \times VMAP)_{carvãoPitts.}}{(PME \times VMAP)_{amostra}} \quad (2.4)$$

onde CME é a concentração mínima de explosão, PME é a pressão máxima de explosão, EMI é a energia mínima de ignição, TMI é a temperatura mínima de ignição e $VMAP$ é a velocidade máxima de aumento de pressão (Abbasi *et al.*, 2007).

2.7 – Teoria de propagação de chama em explosões de pós

A velocidade de propagação de uma chama S_f , numa explosão de pó não se consegue prever tão facilmente como no caso da explosão de um gás (Eckhoff, 1997). Na explosão de gases, a velocidade de chama atinge o seu máximo para o valor da concentração estequiométrica ou perto dela, enquanto a velocidade de chama, na explosão de um pó, atinge o máximo para um excesso de pó, relativamente à quantidade estequiométrica, e só diminui significativamente para concentrações de pó muito superiores à estequiométrica.

Os pós originam explosões mais destrutivas que os gases porque, em primeiro lugar, a velocidade de chama é inferior, no caso da explosão de pós, e como consequência o tempo de explosão é maior provocando impactos totais superiores. Em segundo lugar, como os sólidos possuem massas volúmicas muito superiores às dos gases, um dado volume contendo um pó explosivo disperso em ar, pode conter uma energia maior que o mesmo volume de uma mistura de combustível gasoso mantido disperso em ar.

A velocidade de chama não é constante e depende de variáveis como, composição química, tamanho de partículas, concentração de pó, teor de humidade do pó e do estado de turbulência do gás no qual é disperso o pó.

Para se entender a estrutura da chama e o mecanismo de propagação de chama numa explosão, considera-se existir uma zona de reação distinta, ou frente de chama que se desloca através de uma mistura de combustível/ar. Após a ignição, a frente de chama, move-se através da nuvem de pó com uma velocidade S_f . Esta velocidade é a soma de três velocidades, a velocidade devida à expansão dos produtos de reação, S_e , a velocidade devida à alteração do número de moléculas gasosas função da conversão de reagentes em produtos de reação, S_n , e a velocidade fundamental de queima, S_u , que se considera ter um valor constante para uma dada nuvem de pó. Assim, a mistura de reagentes a jusante da frente de chama desloca-se com uma velocidade que é a soma de S_e e S_n . Logo, a frente de chama entra na mistura não queimada com a velocidade de queima S_u , que determinará a velocidade de produção de energia e a velocidade de consumo de matéria reagente. A velocidade de queima deve, portanto, ser encarada como um parâmetro chave na modelação de deflagrações, e alterações do seu valor influenciarão o desenvolvimento de pressão e consequentemente a velocidade máxima de aumento de pressão. A espessura da frente de chama é também um parâmetro chave neste assunto, uma vez que, a ela se deve o fato de a velocidade máxima de aumento de pressão

ocorrer num instante anterior à pressão máxima durante a explosão de um pó (www.dct.tudelft.nl; Pilão, 2003).

2.7.1 – Propagação unidimensional de chama em nuvens de pós

Apesar das diferenças existentes entre chamas gasosas e em nuvens de pó, os resultados experimentais obtidos com vários pós explosivos para a velocidade fundamental de queima S_u , mostram que os conceitos da teoria gasosa se podem aplicar à combustão de nuvens de pós (Eckhoff, 2007).

Vários investigadores desenvolveram modelos para obtenção de equações representativas da velocidade fundamental de queima. Eckhoff (1997) apresenta um resumo de algumas destas teorias. No entanto, um dos modelos mais utilizado e que melhor representa a explosão de pós carbonáceos é o desenvolvido por Hertzberg *et al.* (1982). Estes autores propuseram um modelo para o mecanismo de propagação de chama através de uma mistura de ar/pó onde estão envolvidos três processos: primeiro, o aquecimento e desvolatilização das partículas de pó à medida que elas se aproximam e entram na frente de chama; segundo, a mistura dos voláteis emitidos com o ar no espaço entre partículas e terceiro, a combustão na fase gasosa da mistura ar/voláteis resultante. A cada um destes processos foi associada uma constante de tempo característica: de desvolatilização (τ_d), de mistura (τ_m) e de combustão (τ_c).

O aquecimento e desvolatilização das partículas envolvem a combinação complexa da transferência de calor por condução, convecção e radiação entre os produtos queimados e os reagentes não queimados. A simplicidade do modelo proposto é conseguida considerando implicitamente estes processos na velocidade fundamental de queima S_u , que caracteriza a velocidade média de propagação de chama (Hertzberg *et al.*, 1982).

Uma chama de pó propagando-se à velocidade S_u tem uma espessura de frente de chama δ , definida por $\delta = \alpha / S_u$, onde α é a difusibilidade efetiva do gás através da frente de chama. O tempo médio de reação, para espécies que passam através da zona de reação, é limitado pelo tempo de viagem da chama através da espessura de frente de chama e define-se como,

$$\tau = \frac{\delta}{S_u} = \frac{\alpha}{S_u^2} \quad (2.5)$$

sendo por definição, $\tau = \tau_d + \tau_m + \tau_c$. A maior das constantes de tempo determina qual o processo controlador do mecanismo de propagação de chama. De acordo com Hertzberg *et al.* (1982), o processo de mistura é tão rápido que não representa uma limitação significativa ($\tau_m \rightarrow 0$). Portanto, serão os valores de τ_d e τ_c que determinarão o processo controlador da propagação de chama (Hertzberg *et al.*, 1986).

Este modelo supõe que a onda de desvolatilização progride linearmente a uma velocidade finita x_0 , no interior de cada partícula de pó, supostamente esférica. A velocidade da onda de desvolatilização é normalmente proporcional ao fluxo de energia introduzido na

sua superfície, o qual, para partículas a entrarem na frente de chama, se considera igual ao fluxo de energia proveniente da chama, dado por $S_u c \rho (T_b - T_u)$, onde c e ρ são respectivamente o calor específico e a massa volúmica da mistura reagente não queimada e T_b e T_u as temperaturas dos produtos queimados e dos reagentes não queimados. Assim, define-se a velocidade da onda de desvolatilização como,

$$x_0 = k S_u c \rho (T_b - T_u) \quad (2.6)$$

onde k é a constante de velocidade do processo de desvolatilização. Segundo esta teoria, a velocidade de desvolatilização das partículas controla o processo de propagação de chama para elevadas concentrações de pó, para partículas de grandes dimensões e para elevadas taxas de reação.

Em situações em que as partículas de pó não desvolatilizam completamente com a passagem da frente de chama, define-se o diâmetro de material não desvolatilizado no instante t , após a partícula ter entrado na zona de reação, como $D(t) = D_0 - 2x_0 t$ onde D_0 é o diâmetro inicial da partícula e $x_0 t$ a profundidade de penetração da onda de desvolatilização (Pilão, 2003).

Definindo a razão entre os voláteis que realmente contribuem para a propagação de chama e os voláteis totais existentes no pó por θ , obtém-se a fração da partícula que desvolatiliza até ao instante t ,

$$\theta = 1 - \left[\frac{D}{D_0} \right]^3 = 1 - \left[1 - \frac{2x_0 t}{D_0} \right]^3 \quad (2.7)$$

O tempo disponível para a geração de voláteis que possam contribuir para a propagação de chama, é igual ao tempo médio de reação τ (Pilão, 2003).

2.7.2 – Propagação de chama em reatores fechados

O comportamento característico da explosão de suspensões de pós em ar contidas em reatores fechados é semelhante ao da explosão de gases em reatores fechados. Assim, a evolução da pressão em sistemas a volume constante pode ser prevista pela teoria clássica da combustão. Várias equações têm sido desenvolvidas para descrever a evolução da pressão com o tempo durante uma explosão confinada. A forma mais conveniente de começar uma análise teórica no domínio das explosões de pós é considerar a combustão de uma mistura gasosa uniforme, num reator esférico, assumindo que:

- A equação de estado para gases ideais é aplicável;
- A ignição é central e a adição de energia associada à ignição forçada é negligenciável;
- A viscosidade e os calores específicos dos reagentes e produtos de combustão são iguais e permanecem constantes durante a explosão;

- A velocidade de queima é pequena comparada com a velocidade do som, ou seja, a pressão é espacialmente uniforme em todo o reator num dado instante;
- A espessura da zona de reação que propaga é negligenciável quando comparada com o raio do reator (Pilão, 2003).

Lewis e Von Elbe (1961) deduziram uma expressão muito simples que relaciona a fração da mistura queimada num reator esférico fechado com a fração de aumento de pressão nesse mesmo reator,

$$\frac{m_u}{m_0} = \frac{P_m - P}{P_m - P_0} \quad (2.8)$$

onde P_0 é a pressão absoluta inicial, P a pressão no instante de propagação t , P_m a pressão máxima de explosão, m_u e m_0 são respetivamente as massas de reagente não queimado, que se desloca a jusante da frente de chama, e a massa inicial.

Considerando uma propagação laminar de chama, com os reagentes não queimados, ou pó disperso, a entrarem sem turbulência na frente de chama temos, pela definição de velocidade de chama, que os reagentes entram na frente de chama com uma velocidade igual a menos a velocidade de queima S_u . Portanto, pela conservação de massa a velocidade de consumo de reagentes é dada por,

$$\frac{dm_u}{dt} = -\rho_u A_f S_u \quad (2.9)$$

onde dm_u/dt é o caudal de gases não queimados que entram na frente de chama, ρ_u é a massa volúmica da mistura ar/pó e A_f a área da frente de chama esférica igual a $4\pi r_f^2$.

Diferenciando a equação (2.8) em ordem ao tempo e substituindo na equação (2.9) obtém-se para a evolução da pressão com o tempo a seguinte expressão:

$$\frac{dP}{dt} = 4\pi r_f^2 \rho_u S_u \frac{(P_m - P_0)}{m_0} \quad (2.10)$$

Numa primeira análise sabendo que o volume do reator é dado por $V_o = V_b + V_u$ e admitindo uma compressão “isotérmica” dos reagentes não queimados, onde se considera T_u constante e igual a T_o antes da ignição e a temperatura dos produtos de combustão T_b , constante e igual à temperatura média quando toda a mistura queimou e a chama atinge as paredes do reator, pode-se exprimir a massa volúmica ρ_u , e o raio da chama r_f , em função da pressão pelas expressões:

$$\frac{\rho_u}{\rho_o} = \frac{P}{P_o} \quad (2.11)$$

$$r_f = R_0 \left[1 - \left(\frac{P_m - P}{P_m - P_0} \right) \left(\frac{P_0}{P} \right) \right]^{1/3} \quad (2.12)$$

onde R_0 é o raio do reator. Também segundo os mesmos autores, substituindo as expressões anteriores na equação (2.10) obtém-se,

$$\frac{dP}{dt} = \frac{3S_u}{R_0} \left(\frac{P}{P_0} \right) (P_m - P_0) \left[1 - \left(\frac{P_m - P}{P_m - P_0} \right) \left(\frac{P_0}{P} \right) \right]^{2/3} \quad (2.13)$$

O valor máximo de dP/dt obtém-se para P_m . Fazendo a substituição chega-se à velocidade máxima de aumento de pressão,

$$\left. \frac{dP}{dt} \right|_{m\acute{a}x} = \frac{3S_u}{R_0} (P_m - P_0) \frac{P_m}{P_0} \quad (2.14)$$

Nagy e Verakis (1983) desenvolveram, para o processo “isotérmico”, a seguinte expressão para uma forma arbitrária do reator:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\alpha_t S_{u,r} S T_0^2 P_r^\beta P_m^{2/3}}{V_0 T_r^2 P_0} (P_m - P_0)^{1/3} \left(1 - \frac{P_0}{P} \right)^{2/3} P^{(1-\beta)} \quad (2.15)$$

onde S é a área superficial do reator, α_t o fator de turbulência, superior à unidade, que relaciona a velocidade de queima laminar com a velocidade de queima turbulenta, mais apropriada ao estudo das explosões de pó em que a turbulência inicial, devida à dispersão do pó no interior do reator, é elevada e por último, $S_{u,r}$ é a velocidade de queima no estado de referência de 300 K e 1 atm. Os resultados experimentais, referentes à queima de misturas gasosas em reatores confinados, mostram que a velocidade de queima varia um pouco com a pressão e temperatura da mistura reagente e que, a sua dependência, pode ser empiricamente expressa pela seguinte equação (Nagy e Verakis, 1983):

$$S_u = S_{u,r} \left(\frac{T_u}{T_r} \right)^2 \left(\frac{P_r}{P} \right)^\beta \quad (2.16)$$

onde β é uma constante empírica que assume o valor de 0 para o processo isotérmico e 0,25 para o processo adiabático.

Considerando $T_o = T_r$, $P_o = P_r$, $S_{u,r} = S_{u,o}$ e $\beta = 0$ e substituindo P por P_m obtém-se, através da equação (2.15), a expressão para a velocidade máxima de aumento de pressão. Alterando o tratamento isotérmico e passando a adotar um tratamento adiabático, mais realista, em que a temperatura dos reagentes T_u , e dos produtos de reação T_b , não se consideram constantes mas relacionadas com o grau de compressão isentrópico, aplicam-se as seguintes expressões:

$$T_u = T_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{1-\frac{1}{\gamma}} \quad (2.17)$$

$$T_b = T_m \left(\frac{P}{P_m} \right)^{1-\frac{1}{\gamma}} \quad (2.18)$$

$$\rho_u = \rho_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (2.19)$$

$$r_f = R_0 \left[1 - \left(\frac{P_m - P}{P_m - P_0} \right) \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.20)$$

onde γ é o valor médio da razão dos calores específicos a pressão constante e volume constante dos gases não queimados e queimados, isto é, trata-se da constante adiabática média dos gases queimados e não queimados.

Substituindo as equações anteriores na equação (2.10) obtém-se para a evolução da pressão com o tempo,

$$\frac{dP}{dt} = \frac{3S_u}{R_0} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} (P_m - P_0) \left[1 - \left(\frac{P_m - P}{P_m - P_0} \right) \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (2.21)$$

que é a expressão indicada por Bradley e Mitcheson (1976). Uma vez mais, a velocidade máxima de aumento de pressão obtém-se para $P=P_m$. Fazendo esta substituição, temos para a velocidade máxima de aumento de pressão,

$$\frac{dP}{dt_{m\acute{a}x}} = \frac{3S_u}{R_0} \left(\frac{P_m}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} (P_m - P_0) \quad (2.22)$$

Nagy e Verakis (1983) sugerem, para um reator não esférico considerando a compressão adiabática dos produtos de combustão, a seguinte expressão,

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\alpha_t \gamma S_{u,r} P_r^\beta P_m^{\frac{2}{3\gamma}}}{V_0 P_0^{2-\frac{1}{\gamma}}} \left(P_m^{\frac{1}{\gamma}} - P_0^{\frac{1}{\gamma}} \right)^{\frac{1}{3}} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right]^{\frac{2}{3}} P^{3-\frac{2}{\gamma}-\beta} \quad (2.23)$$

que tem em conta o efeito da pressão e temperatura dos reagentes não queimados na velocidade fundamental de queima e o efeito da turbulência inicial da nuvem de pó.

Outros modelos têm sido desenvolvidos partindo de abordagens do problema diferentes. Exemplos disso são, por exemplo, as teorias de Nomura e Tanaka e a de Ogle *et al.* cujos resumos podem ser consultados em Eckhoff (1997) (Pilão, 2003).

2.8 – Características globais da explosibilidade do pó

Uma série de fatores influenciam a explosibilidade dos pós. De forma a controlar o risco de explosão de pós é necessário quantificar esses fatores, a saber:

- Tamanho da partícula;
- Concentração do pó;
- Concentração do oxidante;
- Temperatura de ignição;
- Turbulência da nuvem de pó;
- Valor da energia de ignição;
- Mistura ou dose de concentração de inertes;
- Presença de gases inflamáveis.

A explosibilidade de uma nuvem de pó é normalmente caracterizada pela determinação experimental dos seguintes parâmetros característicos de explosão: concentração mínima de explosão, $C_{\min}$, pressão máxima de explosão, $P_{\max}$, e velocidade máxima de aumento de pressão, $(dP/dt)_{\max}$. Estes parâmetros de explosão são obtidos a partir de ensaios de explosão realizados em reatores fechados sob uma vasta gama de concentrações, com a fonte de ignição colocada no centro do reator (Amyotte *et al.*, 1989).

2.8.1 – Tamanho da partícula

Quanto maior a área de superfície por unidade de massa de uma partícula de pó maior é a disponibilidade de risco de explosão. No entanto, em alguns casos, existe a probabilidade de aglomeração dos pós em pedaços. Caso isto aconteça, a explosibilidade do pó diminui e quando o tamanho da partícula aumenta acima dos 500 μm pode até não ser inflamável. A explosibilidade dos pós não varia linearmente com a área superficial da partícula apesar de depender dela. Esta dependência é dependente da velocidade de combustão dos voláteis e da concentração dos pós (Abbasi *et al.*, 2007).

O tamanho da partícula é decisivo no processo de combustão. As partículas de pó de maior tamanho participam ineficientemente no processo de propagação de chama, onde as partículas mais finas do mesmo material são mais susceptíveis de reagirem mais rapidamente e mais eficientemente durante a combustão. Isto é assim porque as partículas mais finas têm uma maior área de superfície por unidade de massa e são de mais fácil dispersão no ar e permanecem nele por mais longos períodos que as partículas maiores (Pilão, 2003).

2.8.2 – Concentração dos pós

A nuvem de pó explode quando a concentração está entre certos limites. Estes são geralmente:

- 50-100 g/m³ : baixa concentração;
- 2-3 kg/m³: concentração máxima.

Para a maioria dos pós não foi possível determinar um valor para o limite superior, ao contrário dos gases. De acordo com Hertzberg *et al.* (1988) deve ser rapidamente gerada, em fase gasosa, a concentração estequiométrica de voláteis, provenientes de uma fase sólida de combustíveis, para a propagação de chama pela mistura antes de mais voláteis serem produzidos. Isto indica que o limite inferior de concentração é determinado pela quantidade mínima de partículas combustíveis que existem de forma a criar em fase gasosa uma mistura capaz de sustentar a combustão. O limite superior de concentração é ditado pela quantidade mínima de oxigénio necessária para a explosão (Pilão, 2003).

Ishihama, (Enomoto e Matsuda, 1986) desenvolveu a seguinte equação para estimar a concentração mínima de explosão de carvões,

$$CME = 2 \times 10^6 d_c^{2,5} + 4,4 \times 10^6 VOL^{-3,5} + 15 \quad (2.24)$$

onde CME é a concentração mínima de explosão (g/m³), d_c é o diâmetro médio da partícula (cm) e VOL é o conteúdo de voláteis (v/v %).

A equação mostra que, à medida que o diâmetro da partícula diminui a importância do primeiro termo também diminui e que, a concentração mínima de explosão se torna independente do diâmetro da partícula para valores inferiores a 50 µm.

A influência do diâmetro da partícula no valor da concentração mínima de explosão assume, normalmente, um comportamento como o apresentado na Figura 2.2 (Hertzberg e Zlochower, 1990).

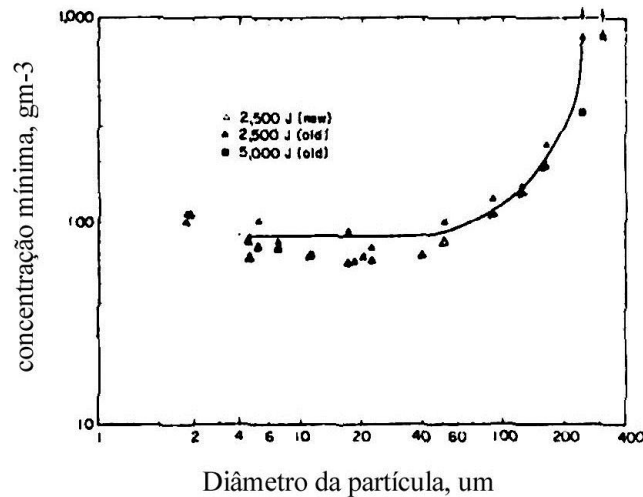


Figura 2.2 – Influência do diâmetro da partícula na concentração mínima de explosão do pó de carvão de Pittsburgh (adaptado de Hertzberg e Zlochower, 1990).

A região inicial plana mostra que a concentração mínima de explosão para as partículas finas é praticamente independente do diâmetro da partícula. À medida que as partículas vão aumentando de tamanho, aparece, acima de um dado diâmetro a que se chama característico, uma dependência da concentração mínima de explosão em relação ao diâmetro, após o que, a concentração mínima de explosão aumenta rapidamente com o diâmetro até se atingir um diâmetro crítico, acima do qual o pó é essencialmente não explosivo (Pilão, 2003).

Convém pois realçar estes dois diâmetros de partículas, o diâmetro característico acima do qual passa a haver uma dependência da concentração mínima de explosão com o tamanho das partículas e o diâmetro crítico, dimensão de partículas acima da qual deixa de haver explosão, qualquer que seja a concentração de pó utilizada. Hertzberg e Zlochower (1990) estudaram os pós de polimetilmetacrilato e de carvão betuminoso de Pittsburgh obtendo valores de diâmetros característicos de 100 µm e 50 µm, respectivamente. Cashdollar (1994) indica diâmetros característicos de 20 µm e 15 µm para os pós de alumínio e ferro respectivamente. Este comportamento tem a ver com o mecanismo de propagação de chama, que para muitos pós, se deve à combustão em fase gasosa dos voláteis emitidos pelas partículas aquecidas até ao ponto de desvolatilização ou de pirólise, sendo a queima do resíduo carbonoso de somenos importância para os intervalos de tempo característicos das explosões de pós. Há, no entanto, alguns pós para os quais a propagação de chama se processa através da oxidação direta à superfície das partículas, como é o caso dos metais (Hertzberg e Zlochower, 1990).

A parte plana da curva até ao diâmetro característico deve-se à completa desvolatilização das partículas finas. Portanto, são os voláteis combustíveis totais provenientes das partículas finas e a reação dos hidrocarbonetos desvolatilizados, queimando homogeneamente na fase gasosa, que determinam a concentração mínima de explosão. O aumento exponencial da curva, que se verifica a partir do diâmetro característico, deve-se ao fato de as partículas se tornarem demasiado grandes para que o processo de desvolatilização se complete na zona da frente de chama, passando o processo a ser controlado pela velocidade de desvolatilização. Como para as partículas maiores, apenas a superfície das partículas sofre desvolatilização com a passagem da frente de chama, é necessário fornecer uma maior massa

de pó a fim de gerar a concentração mínima de voláteis combustíveis na fase gasosa (Pilão, 2003).

2.8.3 – Concentração do oxidante

Um dos lados do pentágono da explosão de pós é o oxidante que é usualmente o oxigénio. Este influencia o processo de explosão do pó em toda a sua extensão. A concentração de oxidante acima de 21 % tende a aumentar a velocidade de queima do combustível mas para concentrações abaixo de 21 % a velocidade de queima é reduzida. Isto acontece porque o oxigénio é consumido pelo combustível no processo de combustão e por isso diminui a concentração do oxidante. Como consequência a velocidade da combustão do pó decai. Eventualmente, a combustão pode cessar, ou caso aconteça uma explosão, pode ser menos severa. A chama é apenas sustentada se a concentração do oxigénio for superior a 10 % (Abbasi *et al.*, 2007).

Wiemann (1987) investigou a influência do conteúdo de oxigénio na fase gasosa no valor da pressão máxima e da velocidade máxima de aumento de pressão, obtidos durante a explosão de pó de carvão num reator fechado de 1 m³. Os resultados mostram, que ambos os parâmetros diminuem com a diminuição do conteúdo de oxigénio e que a zona da concentração de pó explosiva é estrangulada, em particular, no lado rico da mistura. Mostram ainda que a redução da pressão máxima é aproximadamente proporcional à redução do conteúdo de oxigénio, como era esperado dos conceitos termodinâmicos, e que a velocidade de aumento de pressão é fortemente afetada pela variação da concentração de oxigénio da atmosfera oxidante, o que reflete a forte influência do teor de oxigénio na cinética do processo de combustão (Pilão, 2003).

Nagy e Verakis (1983) estudaram o efeito da concentração inicial de oxigénio da atmosfera no valor da pressão máxima desenvolvida pela explosão de vários pós, concluindo que, geralmente, uma pequena redução da concentração de oxigénio relativamente à do ar, provocava uma diminuição moderada na pressão máxima de explosão, mas que, à medida que se aproximava a concentração de oxigénio limitante, a pressão máxima de explosão diminuía rapidamente. Concluíram ainda que, a velocidade de aumento de pressão diminuía quase sempre linearmente, com a diminuição da concentração de oxigénio (Pilão, 2003).

A influência do conteúdo de oxigénio do gás oxidante no valor da concentração mínima de explosão de pó de carvão, com alto teor em voláteis, foi estudada por Hertzberg e Cashdollar (1987). Estes autores concluíram que, para partículas com dimensões inferiores a 10 µm, a redução do teor de oxigénio provocava apenas um aumento moderado da concentração mínima de explosão, enquanto que, quando o tamanho da partícula aumentava, a influência da redução do conteúdo de oxigénio provocava um rápido incremento do valor da concentração mínima de explosão (Pilão, 2003).

2.8.4 – Temperatura de ignição

Se uma mistura inflamável de pó e ar é aquecida eventualmente pode inflamar. A temperatura mínima à qual ocorre tal ignição é caracterizada como sendo a temperatura

mínima de ignição. Esta aumenta com a presença de humidade ou outros inertes na nuvem de pó mas diminui com a diminuição do tamanho da partícula e com o aumento de matéria volátil e da concentração de oxigénio. Medir a temperatura mínima de ignição é essencial para eliminar fontes de ignição e para desenvolver mecanismos de supressão de explosões. Quando as nuvens de pó são sujeitas a temperaturas crescentes superiores à temperatura mínima de ignição, o limite inferior de inflamabilidade e a concentração mínima de explosão das nuvens decrescem expetativamente, mas a pressão máxima de explosão também diminui.

A relação inversa da pressão máxima de explosão com a temperatura é expectável segundo a lei dos gases perfeitos porque existem, no caso do carvão, menores quantidades de moléculas de oxigénio para reagir com o carvão a temperaturas mais elevadas (Cashdollar, 1996).

As típicas temperaturas de ignição de pós comuns com humidade relativas entre os 30 e os 90 % são:

- Farinha de trigo: 410-430 °C;
- Amido de milho: 410-450 °C;
- Pó de centeio: 430-500 °C.

De fato, a maioria dos pós de cereais podem ser inflamados se forem expelidos de encontro a superfícies quentes a temperaturas da ordem dos 400 a 500 °C. Até temperaturas na casa dos 200 °C as nuvens de pós podem estar propícias à ignição se houver condições favoráveis, tais como, baixa humidade relativa, tamanho pequeno da partícula ou elevada turbulência (Abbasi *et al.*, 2007).

2.8.5 – Papel da turbulência

O movimento rápido e mais ou menos aleatório de pequenos elementos constituintes da nuvem de pó em espaços tri-dimensionais é denominado de turbulência. Quando tal nuvem inflama, a turbulência gerará um efeito de remoinho misturando as partes quentes e frias da nuvem gerando um laminado tridimensional de zonas queimadas e não queimadas. Ou seja, uma chama propagar-se-á rapidamente através de uma nuvem de pó se esta última tiver um grau elevado de turbulência resultando numa violenta explosão. A turbulência afeta a velocidade máxima de aumento de pressão muito mais que a pressão máxima de explosão.

Por outro lado, quando em ignição, uma nuvem menos turbulenta liberta uma quantidade inicial de calor que está localmente concentrada devido à sua baixa taxa de dissipação de calor. A propagação adicional de chama produzida na nuvem de pó é totalmente devida ao grau de dispersão da nuvem que melhora a queima.

Existem dois tipos de turbulência, diferindo da sua origem, que são gerados por processos industriais que envolvem pós. O primeiro é gerado pela operação de produção do pó tais como o engenho de jato de ar, o misturador, o filtrador de saco, a conduta de transporte pneumático e o elevador. Este tipo de turbulência é normalmente chamado de turbulência inicial. O segundo tipo de turbulência é gerado durante o processo de combustão depois de ocorrer a ignição da nuvem de pó. A velocidade do fluxo e as constrições geométricas presentes na operação governam o grau de turbulência gerado. Por exemplo, aberturas de

ventilação e obstáculos tais como os êmbolos do elevador, proporcionam a geração de turbulência. Por comparação a turbulência gerada pela frente de chama é muito maior que a turbulência inicial.

Dado que a taxa de combustão e outras reações químicas associadas às explosões de pós são caracterizadas através de um conjunto fundamental de propriedades tais como a velocidade de chama, a turbulência tem sido considerada por alguns autores como “o fator mais importante cujos efeitos têm de ser incorporados no modelo das explosões de pós” (Abbasi *et al.*, 2007).

2.8.6 – Valor da energia de ignição

A pré-condição necessária para determinar quando é que uma chama se pode propagar livremente num dado sistema é a presença de uma onda de combustão inicial. O fracasso da propagação de chama numa dada experiência pode ser explicado como sendo devido à presença de uma mistura não explosiva com uma concentração para lá dos limites de explosibilidade, apenas se estivermos certos de que a fonte de ignição utilizada é suficientemente forte para iniciar uma potencial onda de combustão. A energia libertada pela fonte de ignição tem de ser tão forte quanto a necessária para assegurar que o resultado é independente da energia de ignição, mas ao mesmo tempo não sendo excessivamente forte de forma a não sobre-induzir pressões e temperaturas que levem a interpretações erróneas sobre o início e consequente desenvolvimento de reações de explosão. Só assim se pode assegurar que a concentração mínima de explosão seja independente da energia de ignição utilizada na sua determinação experimental (Pilão, 2003).

2.8.7 – Doses de concentração de inertes

Experiências de Chatrathi e Going (2000) na eliminação do efeito do bicarbonato de sódio, do bicarbonato de potássio, do fosfato de mono-amónio e do carbonato de cálcio em nuvens de pós de carvão, de polietileno, etc, demonstraram que as curvas de inflamabilidade podem ser criadas para nuvens de mistura de combustível e inertes. As curvas de inflamabilidade para os pós tinham as mesmas características das curvas de inflamabilidade para misturas gasosas, onde eram caracterizadas por um limite inferior e superior de inflamabilidade e por uma concentração mínima de inertes. Os resultados dessa supressão demonstraram que elevados índices de deflagração, K_{St} , e deflagração de nuvens de metal podem ser extintos podendo a pressão máxima de explosão ser reduzida a níveis aceitáveis. A eficiência do agente inibidor usado era dependente da compatibilidade do pó combustível com o pó inerte. Calor específico, condutividade térmica, absorção, geometria e decomposição das partículas pareceram ter um papel crítico na eficiência na supressão dos efeitos dos inertes. Estes fatores juntamente com a temperatura de chama e o calor de combustão podem explicar a variação na severidade da explosão e na eficácia da extinção (Abbasi *et al.*, 2007).

2.8.8 – Presença de gases inflamáveis

Se um gás inflamável está presente juntamente com o pó, a explosibilidade deste último é favorecida. A concentração mínima de explosão, a temperatura mínima de ignição e a energia mínima de ignição são todas reduzidas crescendo a velocidade máxima de aumento de pressão. Assim um gás inflamável pode tornar explosivo uma mistura de gás/pó a uma concentração de pó abaixo do seu limite inferior de inflamabilidade e a uma concentração de gás inferior ao limite inferior de explosibilidade do gás. Também pode tornar explosivo um pó constituído por partículas grandes que noutro caso não seria explosivo. Por exemplo, pós do grupo S_{10} podem mudar para os grupos seguintes quando se lhes é adicionado metano. Para misturas híbridas de ar/metano em pós de cortiça Pilão *et al.* (2004) observaram que o risco de explosão aumenta com o aumento da concentração de metano. A energia mínima de ignição de um pó misturado com um gás inflamável é também inferior caso o pó não estivesse misturado (Abbasi *et al.*, 2007).

2.9 – Fontes de ignição das explosões de pós

Em teoria, o risco de explosão pode ser eliminado pela modificação processual numa indústria mas, na prática, apenas algumas delas conseguem manter sua viabilidade económica após tal mudança. O que está ao nosso alcance é reduzir drasticamente esse risco identificando para tal alguns pontos essenciais e apostar na segurança. A primeira segurança contra as explosões de pós é identificar os fatores que a provocam e prevenir que esses mesmos atuem. As fontes de ignição que podem ocorrer dentro das indústrias são de particular importância, tais como, as fontes devidas a materiais incandescentes, superfícies quentes, faíscas e eletricidade estática (Abbasi *et al.*, 2007).

Uma breve descrição das fontes de ignição mais importantes é a seguir apresentada onde numa primeira fase refere-se ao domínio da temperatura mínima de ignição e numa segunda ao domínio da energia de ignição.

2.9.1 – Domínio da temperatura mínima de ignição

2.9.1.1 – Chama e calor direto

Esta fonte de ignição pode ser eliminada recorrendo a fontes indiretas de calor, a temperatura mais baixa e controlada, como seja a circulação de água quente ou vapor através de condutas e usando banhos quentes de água/vapor (Abbasi *et al.*, 2007).

2.9.1.2 – Geração automática de calor

A geração automática de calor ou combustão espontânea pode ocorrer devido às reações exotérmicas. Uma grande variedade de reações pode gerar calor. Estas incluem as reações de oxidação assim como as reações de certos pós misturados em água ou madeiras. Na maioria dos casos a taxa de reação acelera com a temperatura, mas também existem reações auto-catalíticas que podem acelerar devido à produção de um agente catalítico ou à remoção de um inibidor. Os tempos de indução podem ser longos e a geração de calor pode ser lenta no começo mas pode prosseguir indetetável durante longos períodos. Contaminantes como óleos e produtos de degradação térmica podem também contribuir para a geração automática de calor. A temperatura do pó durante o processo e armazenamento deve ser controlada. Um destes aspetos é controlo de superfícies quentes, que podem notar-se em normais condições. Acumulação inesperada de depósitos de pós, que pode sentenciar a geração automática de calor, deve ser evitada. Situações onde existe uma grande quantidade de massa de pó armazenada a elevadas temperaturas, para manter o pó seco, representam um risco elevado. Pós amontoados têm uma alta área de superfície e ar de circulação suficiente para que ocorra própria geração de calor. O risco de acidente é ainda mais propício durante a descarga de pó quente de um secador para o local de armazenamento. Nestes casos pode ser necessária arrefecer o pó antes do armazenamento. Outra medida é muitas das vezes fazer recircular o pó quente através de um sistema de arrefecimento antes do pó ser manuseado (Abbasi *et al.*, 2007).

2.9.1.3 – Ambiente quente

Geração excessiva de calor durante operações de soldadura e corte podem obviamente desencadear uma explosão ainda mais quando um pó de baixa ignição (100 °C-200 °C) se encontra nas redondezas. Os acidentes ocorrem porque o risco de explosão é menosprezado e o pó não é limpo do equipamento quente antes deste começar a trabalhar (Abbasi *et al.*, 2007).

2.9.1.4 – Material incandescente

Partículas que ardem a fogo lento e outros materiais incandescentes podem provocar a explosão do pó dentro dos equipamentos de manuseamento de pós. A explosão pode viajar através das condutas e dos reservatórios interligados. Sistemas diretos de aquecimento são potenciais fontes de partículas incandescentes. Nos secadores diretos o ar de entrada deve ser protegido por um filtro para prevenir a entrada de tais partículas (Abbasi *et al.*, 2007).

2.9.1.5 – Superfícies quentes

Equipamentos com superfícies quentes tais como condutas a vapor ou lâmpadas elétricas ou equipamentos sobreaquecidos tais como rolamentos caem na categoria de despoletadores das explosões de pós. A temperatura da superfície pode provocar a ignição de uma nuvem de pó. Um fogo lento ou uma camada quente pode atuar diretamente como fonte de ignição para uma nuvem de pó.

Quando os pós se acumulam em superfícies quentes estes podem passar através de diferentes e complexos estágios antes da combustão. Alguns pós queimam diretamente na fase sólida com chama ou com fumo e sem chama, outros derretem e queimam como líquidos. Alguns pós podem libertar largas quantidades de gases inflamáveis. O tamanho da chama produzida por diversos pós também difere. Ignição por superfície quente é um problema particular dos secadores de diferentes tipos. Segundo o guia “Prevention of Fires and Explosions in Dryers” as temperaturas de entrada devem ser 50 °C abaixo da temperatura mínima de ignição da nuvem de pós e 20 °C abaixo da temperatura mínima de ignição aquando da formação de camadas de pós. Superfícies quentes podem também ocorrer como resultado de maquinaria em funcionamento tais como bombas e motores. Em alguns casos é aconselhável monitorizar as temperaturas de maquinaria que contenha rolamentos pois a fricção pode provocar o aparecimento de superfícies quentes (Abbasi *et al.*, 2007).

2.9.2 – Domínio da energia de ignição

2.9.2.1 – Faíscas eletrostáticas

Descargas eletrostáticas de equipamentos elétricos podem causar faíscas que em alguns casos pode provocar a ignição de uma nuvem de pós. Proteção para este tipo de descargas é baseada na classificação da área de risco e da consequente salvaguarda dessa área. Assim o equipamento elétrico deverá ser desenvolvido de forma a não permitir que haja descargas indutivas ou capacitivas (Abbasi *et al.*, 2007).

2.9.2.2 – Faíscas elétricas

Normalmente as faíscas elétricas ocorrem em aparelhos do tipo interruptor, disjuntores, ou motores elétricos e em equipamento elétrico deficiente. Para identificar os locais de provável aparecimento de faíscas elétricas é necessário definir zonas de risco e salvaguardar as mesmas. Em particular deverá ser usado equipamento à prova de chama e à prova de pó. Deverá ser feita a distinção entre equipamento estanque a pó e que exclua inteiramente o pó e equipamento que seja à prova de pó mas que deixe entrar algum pó (Abbasi *et al.*, 2007).

2.9.2.3 – Faíscas por fricção e pontos quentes

Faíscas por fricção podem ocorrer onde possa haver contacto por fricção entre sólidos ou durante processos de retificação, polimento. O pó em si mesmo pode bloquear os equipamentos e causar sobreaquecimento provocando a geração de faíscas. De forma a prevenir as faíscas por fricção é essencial controlar o fluxo de pó e instalar sistema de deteção de faíscas. A remoção de materiais estranhos deve ser realizada por processos magnéticos ou por separação pneumática, especialmente quando o material tem de passar por laminadoras ou fresadoras. A indução de calor por fricção pode aumentar a temperatura do pó. Mas mais

problemático é quando a indução de calor por fricção ocorre em pontos quentes como aqueles localizados em áreas de misturadores devido à ação das forças de cisalhamento (corte) (Abbasi *et al.*, 2007).

2.9.2.4 – Faíscas por impacto

O trabalho, por operários, com utilização de ferramentas manuais pode provocar o início de faísca quando existe impacto da mesma numa superfície quente exposta a uma nuvem de pó. A fonte de ignição não é em si a faísca mas antes a superfície quente. (Abbasi *et al.*, 2007).

2.9.2.5 – Eletricidade estática

Eletricidade estática pode-se transformar em faísca quando um objeto se desloca rapidamente para dentro ou para fora do seu campo magnético. É mais fortemente influenciado pelo processo do que pelo material. Em certos tipos de maquinaria de manuseamento de pós a geração de eletricidade estática é muito frequente. A ignição de uma nuvem de pó por eletricidade estática é consideravelmente influenciada pela distribuição do tamanho da partícula, pela duração e pela taxa de aplicação da fonte energia. A capacitância da descarga elétrica de um sistema pode influenciar a voltagem mínima de ignição para produzir a faísca e a energia mínima de ignição. O corpo humano pode gerar eletricidade estática sendo uma potencial fonte de ignição quando a energia mínima de ignição de um pó seja inferior a 25 mJ. Para minimizar este risco o operário deve usar uma pulseira anti-eletricidade estática, roupas que não gerem eletricidade estática (camisolas e calçado isolado) e tentar trabalhar em ambientes mais húmidos com pavimento anti-estáticos (Abbasi *et al.*, 2007).

2.10 – Limites de ignição

Os parâmetros de ignição que normalmente caracterizam a ignição de uma nuvem de pó são a temperatura mínima de ignição e a energia mínima de ignição.

2.10.1 – Energia mínima de ignição

A energia mínima de ignição de um pó é definida como a quantidade de energia capaz de provocar a ignição na mistura mais facilmente inflamável de um dado pó, definida pela equação (2.25), numa série de 20 testes consecutivos. A energia mínima de ignição deve ativar qualquer mistura com uma composição acima da concentração mínima de explosão. Bartknecht (1981) faz referência aos estudos feitos por G. Pellmont realizados numa câmara de explosão de 1 m³ (Pilão, 2003). Os resultados destes estudos, mostraram que a energia mínima de ignição de um pó depende em elevado grau da sua concentração e que existe, para cada pó, uma concentração mais facilmente inflamável. Esta concentração, geralmente não é

idêntica à “concentração ótima”, isto é, à concentração que origina o maior valor de pressão. De qualquer forma, ela pode ser calculada a partir da “concentração ótima” aplicando a seguinte expressão, que foi confirmada experimentalmente para vários pós com ensaios realizados na câmara de 1 m³ (Bartknecht, 1981):

$$C_{me} = \left| C_{P_{max}} - \left(C_{(dP/dt)_{max}} - C_{P_{max}} \right) \right| \quad (2.25)$$

onde C_{me} é a concentração de pó mais facilmente inflamável, $C_{P_{max}}$ é a concentração correspondente à pressão máxima e $C_{(dP/dt)_{max}}$ é a concentração para a violência de explosão ótima.

A alteração da concentração, para valores acima ou abaixo do valor mais facilmente inflamável, provoca um aumento notável do valor da energia mínima de ignição, como se pode ver na Figura 2.3 (Bartknecht, 1981).

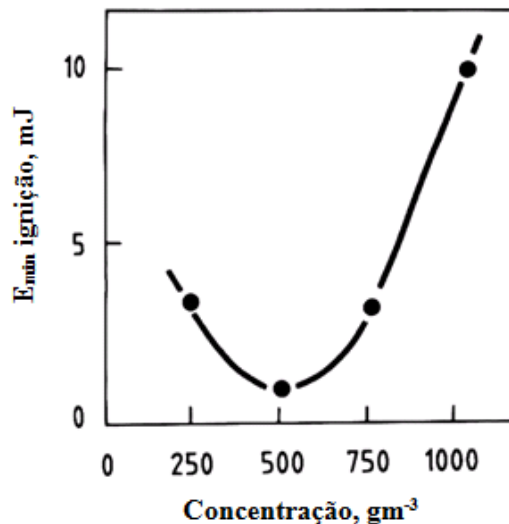


Figura 2. 3 – Efeito da concentração na energia mínima de ignição para pó de um antioxidante com 40 µm (Bartknecht, 1981).

O tamanho das partículas tem uma influência marcante no valor da energia mínima de ignição, e geralmente, quanto mais fino for o pó menor é a energia mínima de ignição.

A energia mínima de ignição é experimentalmente determinada através da descarga de um arco elétrico entre dois elétrodos inseridos no interior da câmara de explosão. A aplicação prática da energia mínima de ignição de pós está relacionada com a possibilidade da ocorrência da ignição por energia eletrostática ou devida a impactos mecânicos (Pilão, 2003).

Eckhoff (1975) estudou a energia mínima de ignição para pós e concluiu que apenas 5 a 20 % da energia elétrica capacitiva armazenada ($1/2CV^2$) é realmente dissipada nos elétrodos durante a descarga elétrica. Concluiu, também, que o rendimento de conversão de energia capacitiva em energia efetiva varia com a concepção do circuito elétrico e com a duração de descarga do arco elétrico. Norberg *et al.* (1988) descobriram que o espaçamento ótimo entre elétrodos para inflamar nuvens de vários pós em ar era de cerca de 6 a 8 mm. Que

as descargas capacitivas deviam ser de curta duração e que nestas condições se obtinham energias mínimas de ignição na casa dos 1 a 6 mJ (Eckhoff, 1997).

Hertzberg *et al.* (1984) indicaram um método para determinar a energia efetivamente dissipada nos elétrodo, E_{eff} , que se baseia na medição do aumento de pressão, ΔP , gerado pela descarga do arco em ar parado, sem a presença de pó, numa câmara de volume constante, V_o , à temperatura e pressão ambiente. A equação que relaciona estes parâmetros é a seguinte,

$$E_{eff} = \frac{5}{2} V_o \Delta P \quad (2.26)$$

A determinação correta da energia mínima de ignição de pós envolve algumas contradições no que diz respeito ao procedimento experimental associado à sua determinação. Por exemplo, no caso dos gases, para minimizar o valor da energia mínima de ignição, não deve existir escoamento no meio de ensaio entre os elétrodo (Hertzberg *et al.*, 1984). No entanto, para dispersar uma nuvem de pó com uma dada concentração de uma forma uniforme e reprodutível, é necessário um intenso caudal que promova a dispersão das partículas em suspensão no ar. Esta contradição fundamental prejudica a obtenção do valor “real” da energia mínima de ignição. Também significa que o grau de aproximação do valor experimentalmente obtido ao valor real da energia mínima de ignição depende do método de dispersão do pó, da geometria do arco, da sua localização exata relativa ao fluxo de dispersão, do tempo entre a dispersão e a ignição e de outros detalhes experimentais e geométricos.

Para além das dificuldades anteriormente enunciadas, os resultados são sensíveis ao espaçamento entre elétrodo, pelo menos por duas razões: em primeiro lugar, a extinção de chama pode ocorrer se o espaçamento entre elétrodo é demasiado pequeno pois a energia libertada na descarga elétrica em vez de elevar a temperatura de um volume de mistura reagente, vai perder-se pelos próprios elétrodo, e em segundo lugar, porque o rendimento de conversão da energia elétrica armazenada em energia elétrica efetiva é função da distância entre elétrodo. No caso dos pós os diâmetros de extinção de chama são grandes, da ordem dos centímetros e os rendimentos de conversão de energia são pequenos. Como se pode avaliar, a determinação experimental da energia mínima de ignição de um pó, não é consensual e vários autores discutem a validade dos valores determinados bem como a importância real da sua determinação (Pilão, 2003).

2.10.2 – Temperatura mínima de ignição

O conhecimento da temperatura mínima de ignição é importante na medida em que, uma explosão de pó pode ocorrer, se uma nuvem de pó explosivo é gerada na proximidade de uma superfície quente que se encontra a uma temperatura acima da temperatura mínima de ignição. No anexo B é apresentado a evolução das várias fornalhas desenvolvidas para o estudo da temperatura mínima de ignição de pós.

O domínio de ignição térmica do pó de carvão encontra-se representado na Figura 2.4 (Cashdollar, 1998). Os ensaios que resultam em ignição (círculos sólidos) e não ignição (círculos abertos, vazios) estão representados num gráfico de temperatura inicial do reator vs concentração. A curva é a fronteira de temperatura que separa a região superior do gráfico,

onde a nuvem de pó de carvão pode ser termicamente inflamável, da região inferior onde a mistura pode ser inflamável mas não termicamente, ou seja, nesta região será necessário outro tipo de fonte de ignição para provocar explosão da mistura. O ponto inferior da curva é a temperatura mínima de ignição, que no caso do carvão é de 530 °C (Pilão, 2003).

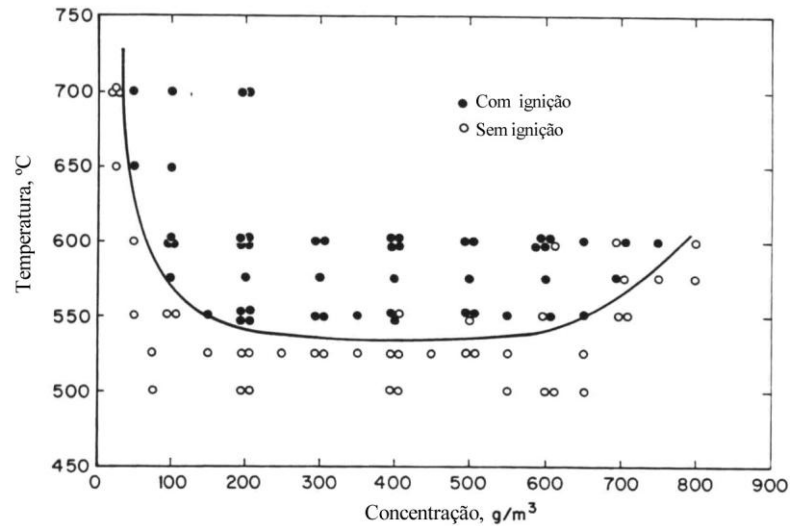


Figura 2. 4 – Domínio de ignição térmica do pó de carvão (adaptado de Cashdollar, 1998).

O domínio de inflamabilidade térmica e ignição térmica do pó de carvão encontra-se representado na Figura 2.5 (Hertzberg e Cashdollar, 1987). A linha a traço misto, curva (f), é a curva de inflamabilidade ou ignição forçada, obtida a partir do valor de concentração mínima de explosão, medida à pressão e temperatura ambientes, sendo extrapolada a partir desse ponto, para temperaturas superiores de acordo com a lei de Burgess-Wheeler. Esta lei é expressa em função da concentração do combustível:

$$C_T / C_{25} = \left[1 - \beta(T - 25) \right] \left[\frac{298}{T + 273} \right] \quad (2.27)$$

onde a concentração mínima a qualquer temperatura, T , é C_T , C_{25} é a concentração à temperatura ambiente de 25 °C, e β é uma constante dependente do tipo de combustível.

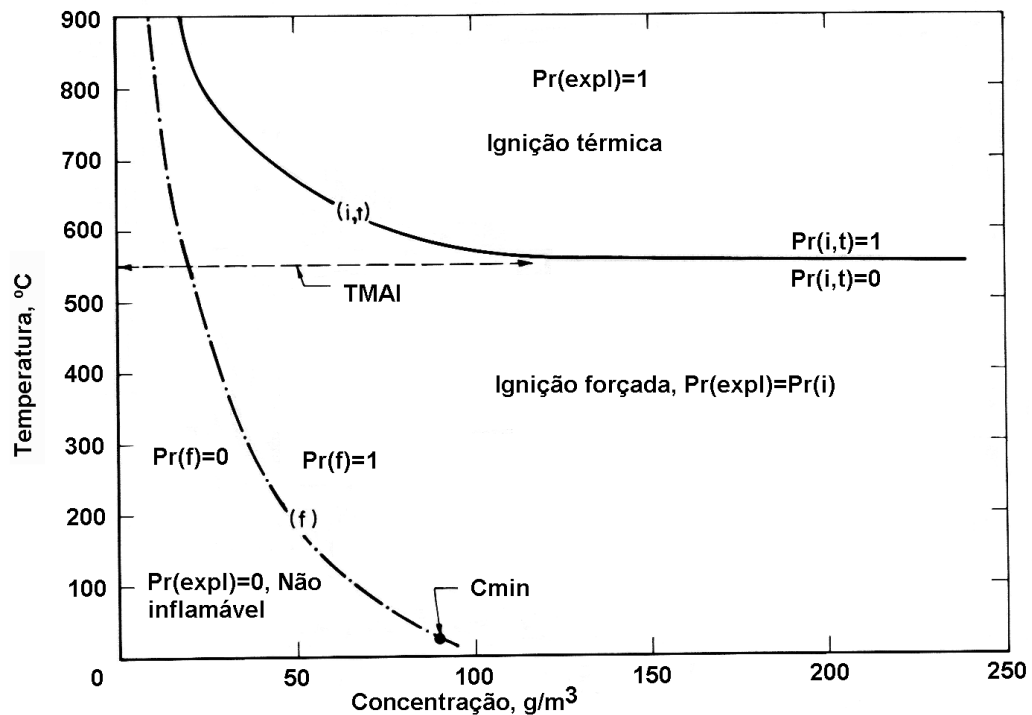


Figura 2. 5 – Domínio de inflamabilidade e ignição do pó de carvão (adaptado de Hertzberg e Cashdollar, 1987).

Todos os estados do sistema representados por pontos abaixo ou à esquerda da curva (f) são não explosivos porque a probabilidade de inflamação é nula, $Pr(expl)=0$. Ou seja, a curva (f), curva de inflamabilidade, define a fronteira a partir da qual uma nuvem de pó é capaz de propagar chama após a frente de chama ter sido estabelecida por uma fonte externa de ignição. Para estados do sistema acima ou à direita da curva (f) a probabilidade de ocorrer explosão é igual à probabilidade de ocorrer ignição.

A linha a cheio representa a curva de ignição térmica (i,t) (i de ignição e t de térmica) obtida para uma dada granulometria. Entre as duas curvas a probabilidade de explosão, como referido anteriormente, é igual à probabilidade de ignição forçada, $Pr(expl)=Pr(i)$, ou seja, a explosão depende da presença de uma fonte de ignição adequada capaz de iniciar uma potencial onda de combustão. Acima desta curva, (i,t), a explosão é certa porque a probabilidade de inflamação e de ignição são unitárias, não sendo necessária uma fonte de ignição exterior porque o sistema entra em ignição espontânea (Conti e Cashdollar, 1987). As curvas (f) e (i,t) convergem a elevadas temperaturas, onde aparentemente ocorre ignição assim que a concentração mínima é dispersa (Conti *et al.*, 1983).

As duas principais quantidades que caracterizam as curvas (f) e (i,t) para qualquer pó estão também indicadas na Figura 2.5. Uma é a concentração mínima de explosão, C_{min} , e a outra é a temperatura mínima de auto-ignição TMAI, também chamada de temperatura mínima de ignição (Conti e Cashdollar, 1987).

O efeito do diâmetro da partícula na temperatura mínima de ignição é semelhante ao verificado para a concentração mínima de explosão (Hertzberg *et al.*, 1982). Como se pode ver na Figura 2.6, a temperatura mínima de ignição é independente do tamanho da partícula para tamanhos inferiores a um diâmetro característico. Acima deste diâmetro, começa a

aparecer uma dependência da temperatura até que o tamanho da partícula atinge um valor crítico a partir do qual a nuvem de pó não explode, seja qual for a sua concentração.

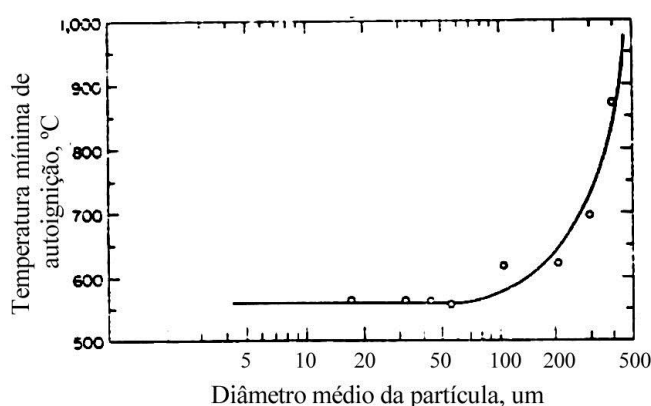


Figura 2. 6 – Efeito do diâmetro da partícula na temperatura mínima de ignição do pó de carvão (Hertzberg *et al.*, 1982).

Os mecanismos que controlam a velocidade de propagação de chama da mistura acima ou abaixo do diâmetro característico são os mesmos que no caso da concentração mínima de explosão, ou seja, para os tamanhos pequenos o mecanismo controlador é a velocidade de reação química e a velocidade de difusão dos voláteis na mistura em fase gasosa e para os tamanhos grandes, a velocidade de desvolatilização é o processo controlador da velocidade de propagação de chama na mistura (Pilão, 2003).

2.10.3 – Modelos numéricos para a previsão da temperatura mínima de ignição

A temperatura mínima de ignição é um dos fatores importantes requeridos aquando do projeto mecânico para evitar as explosões de pós. Alguns modelos para a determinação da temperatura mínima de ignição têm sido desenvolvidos por vários investigadores incluindo aqueles desenvolvidos por Cassel e Liebman, Nagy e Surincik, Mitsui e Tanaka, Krishna e Berlad e Zhang e Wall. A maior parte destes modelos são baseados no pressuposto da reação se dar na superfície sólida dos pós. Alguns modelos são específicos a tipos de sistemas, outros são específicos a tipos de materiais e ainda existem outros que têm uma aplicação limitada devido quer à complexidade do seu uso quer devido à inconsistência dos resultados previstos (Mittal *et al.*, 1997).

Tyler (1987) conduziu uma verificação teórica das condições existentes correntemente nos métodos utilizados para a determinação da temperatura mínima de ignição e considerou o possível escalonamento dos resultados. Este autor focou-se particularmente na fornalha de Godbert-Greewald e desenvolveu um modelo matemático baseado em princípios de igualdade da taxa de geração e de perda de calor para a ignição da nuvem de pó na fornalha aquecida. Tyler frisou que a validação do modelo era difícil pois nenhuns dados fiáveis foram encontrados na literatura para uso como termo de comparação no seu modelo. Alguns estudos

paramétricos foram contudo realizados. Por exemplo, o modelo previu comparativamente grandes mudanças na temperatura mínima de ignição com o diâmetro da fornalha. Concluiu-se também que não existia qualquer modelo teórico através do qual os dados dos ensaios da fornalha de Godbert-Greewald pudessem ser extrapolados em temperatura mínima de ignição para em situações particularmente complexas encontradas na indústria (Mittal *et al.*, 1997).

Assim sendo foi desenvolvido um modelo para a determinação da temperatura mínima de ignição de uma nuvem de pó orgânico, o polietileno, simulando as condições de queima para a sua determinação na fornalha de Godbert-Greewald. A investigação também abrangeu uma revisão e análise dos modelos existentes para a determinação deste parâmetro assim como de recolha de dados experimentais (Mittal *et al.*, 1997). O modelo a seguir explanado é capaz de prever a temperatura mínima de ignição para pó de diversos tamanhos numa larga gama de concentração de pó.

O modelo para a determinação da temperatura mínima de ignição da nuvem de pó de polietileno simulando as condições de queima na fornalha Godbert-Greewald é baseado nas seguintes hipóteses:

1. Pó à temperatura ambiente, T_a , é disperso num reator fechado cujas paredes estão à temperatura de T_i , onde o ar à temperatura ambiente, T_a , é usado como meio dispersor;
2. A nuvem de pó é composta por partículas pequenas de igual tamanho uniformemente dispersas no reator fechado;
3. A temperatura das paredes da fornalha, T_i , à qual a ignição ocorre corresponde à temperatura de auto-ignição da nuvem de pó;
4. O pó é uniformemente distribuído na nuvem (Mittal *et al.*, 1997).

Os passos envolvidos na auto-ignição do pó exposto ao ambiente quente controlando a mecanismo de ignição do pó são:

1. Aquecimento das partículas desde a temperatura ambiente ao ponto de fusão do pó, T_m ;
2. Fusão das partículas de pó à temperatura T_m ;
3. Aquecimento das gotas de líquido para a temperatura de desvolatilização dos pó, T_d ;
4. Desvolatilização/decomposição das gotículas à temperatura T_d ;
5. Reação de combustão/oxidação de produtos gasosos desvolatilizados à temperatura de, T_r , conduzindo à auto-ignição da nuvem de pó em ar (Mittal *et al.*, 1997).

O mecanismo de ignição até ao passo (3) é exclusivamente controlado por processos de transferência de calor. Durante o passo (4) o calor fornecido pelas paredes da fornalha às partículas de pó inicialmente à temperatura T_d é usado para desvolatilizar os pó assim como serve para incrementar ainda mais a temperatura das gotas de pó ainda não liquefeitas. A temperatura dos sólidos não convertidos continua a aumentar até alcançar a temperatura de

auto-ignição do pó. É suposto que a condição de ignição seja atingida quando suficiente matéria volátil é formada para continuar com a reação de combustão (Mittal *et al.*, 1997).

Cálculos preliminares para os passos (1) e (4) indicaram que os seus tempos requeridos são da ordem dos milissegundos exceto para a conclusão do passo (4). No entanto a conclusão do passo (4) não é necessário para a ignição do pó. O passo (5) é o mais importante para o desenvolvimento do modelo de previsão da temperatura mínima de ignição da nuvem de pó. O calor gerado por oxidação dos principais produtos gasosos, a soma das perdas de calor para o ambiente e o calor trocado entre as gotas de pó liquefeito não convertidos à temperatura de T_i e os vapores na fornalha à temperatura de T_r , são equilibrados ao ponto de iniciação da auto-ignição da nuvem de pó (Mittal *et al.*, 1997).

No caso do polietileno, a desvolatilização, particularmente a temperaturas superiores a 623 K, é também acompanhada por decomposição tendo como principal produto gasoso o butileno. A sua concentração no ambiente é função do total de área superficial por unidade de volume de pó e é função linear do diâmetro da partícula. A seguinte correlação empírica é assumida:

$$C_{fp} = 10,554 - 240,964D_p \quad (2.28)$$

onde D_p é o diâmetro inicial da partícula e C_{fp} é a concentração do butileno (volume percentual).

Pode ser observado que na maior parte dos resíduos dos pós, a parcela que não foi convertida em butileno, parte-se em menores frações volúmicas. Estes componentes são assumidos estarem à temperatura de reação, T_r . A quantidade de polietileno restante na forma de gotas de líquido é assumida estar à temperatura da fornalha (Mittal *et al.*, 1997). Assume-se que concentração das partículas de pó varia de acordo com a equação seguinte:

$$C_{dra} = (-A^* + B^*D_p)(A - BC_d)C_{dr} \quad (2.29)$$

onde A^* , B^* , A , B são constantes, C_d é a concentração de pó inicial, C_{dr} é a concentração de pó não convertido em butileno e C_{dra} é a concentração das partículas de pós restantes à temperatura T_i .

Aplicando um balanço térmico temos que:

$$\dot{Q}_G = \dot{Q}_L \quad (2.30)$$

onde $\dot{Q}_G$ é a taxa de geração de calor e $\dot{Q}_L$ é a taxa de perda de calor.

$$V_f k_r H C_o C_f \exp\left[\frac{-E}{RT_r}\right] = n_p \pi D_{pn}^2 h_n (T_r - T_i) + U A_s (T_i - T_a) \quad (2.31)$$

$$\frac{d\dot{Q}_G}{dT_r} = \frac{d\dot{Q}_L}{dT_r} \quad (2.32)$$

$$V_f k_r H C_o C_f \exp\left[\frac{-E}{RT_r}\right] \left[\frac{E}{RT_r^2}\right] = n_p \pi D_{pn}^2 h_n \quad (2.33)$$

As equações (2.31) e (2.33) podem ser numericamente resolvidas pelo método de Newton-Raphson para a determinação da temperatura mínima de ignição, T_i (Mittal *et al.*, 1997).

O coeficiente global de transferência de calor, U , da parede da fornalha para o ambiente exterior e o coeficiente de transferência de calor por convecção, h_n , das gotas de pó liquefeito para os vapores que as envolvem foram calculadas pelas seguintes equações:

$$U = \frac{1}{\left[\frac{r_s \ln \frac{r_{to}}{r_{ti}}}{k_t} + \frac{r_s \ln \frac{r_{si}}{r_{to}}}{k_i} + \frac{r_s \ln \frac{r_s}{r_{si}}}{k_s} + \frac{r_s}{r_{si} h_o} \right]} \quad (2.34)$$

$$h_n = \frac{2 \times k_m}{D_{pn}} \quad (2.35)$$

No Anexo C são apresentados alguns modelos numéricos de determinação da temperatura mínima de ignição sendo que o modelo desenvolvido por Mitsui e Tanaka pode ser aplicado quer a materiais inorgânicos quer a pós orgânicos.

Instalação e Ensaios Experimentais

3.1 – Instalação experimental

Neste trabalho, o estudo experimental da determinação da temperatura mínima de ignição do pó de casca de pinheiro bravo e a determinação dos perfis de temperatura foram realizados na fornalha de 1,2 L construída segundo as especificações da US Bureau of Mines, uma vez que é o modelo da fornalha mais utilizada atualmente, concebida para o estudo da explosão do pó de cortiça (Pilão, 2003) e montada no Laboratório de Combustão (CETERM), do Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI).

3.1.1 – Caracterização da fornalha de 1,2 L utilizada nos ensaios

O reator utilizado no estudo da ignição do pó de casca de pinheiro bravo é cerâmico (mulite) tendo 10 cm de diâmetro interior, 33 cm de altura e após construção da fornalha o seu volume foi quantificado por recurso à medição da massa de água que podia ser contida no seu interior, obtendo-se o valor de 1,23 L, conforme pode ser constatado no Anexo A.4 (adaptado de Pilão, 2003).

Na parede exterior do reator está enrolada uma resistência elétrica de 13,73 m de comprimento e 1,6 mm de diâmetro de fio (Kanthal) com uma potência de 1.550 W. O reator cerâmico e a resistência de aquecimento estão cobertos por uma manta isolante e protegidos exteriormente por uma parede de isolamento cerâmica revestida por uma chapa aço inox cilíndrica com 30 cm de diâmetro externo, 5 mm de espessura e 30 cm de altura conforme o esquema da Figura 3.1.

Na parte inferior do reator existe um dispersor de pó em aço inoxidável. Este dispersor possui no topo uma cabeça roscada, perfurada e removível para permitir a colocação da amostra de pó no seu interior. A ligação do dispersor ao reator é feita por aperto de uma peça roscada.

Na parte superior do reator existe um disco ou diafragma de rutura em fibra de vidro (tipo F), que isola o reator do meio ambiente exterior e que suporta uma sobrepressão de 0,1 a 0,3 bar. Na parede exterior da fornalha existem quatro entradas radiais para instrumentação. Uma destas entradas é usada para colocar perto da parede do reator o termopar cujo sinal é usado como referência pelo controlador de temperatura (termopar de controlo), e outra é usada para o transdutor de pressão que mede a evolução da pressão durante a dispersão do pó e a explosão. O termopar da parede é um termopar tipo K (NiCr/NiAl) com uma bainha em aço inox de 3 mm de diâmetro (Pilão, 2003).

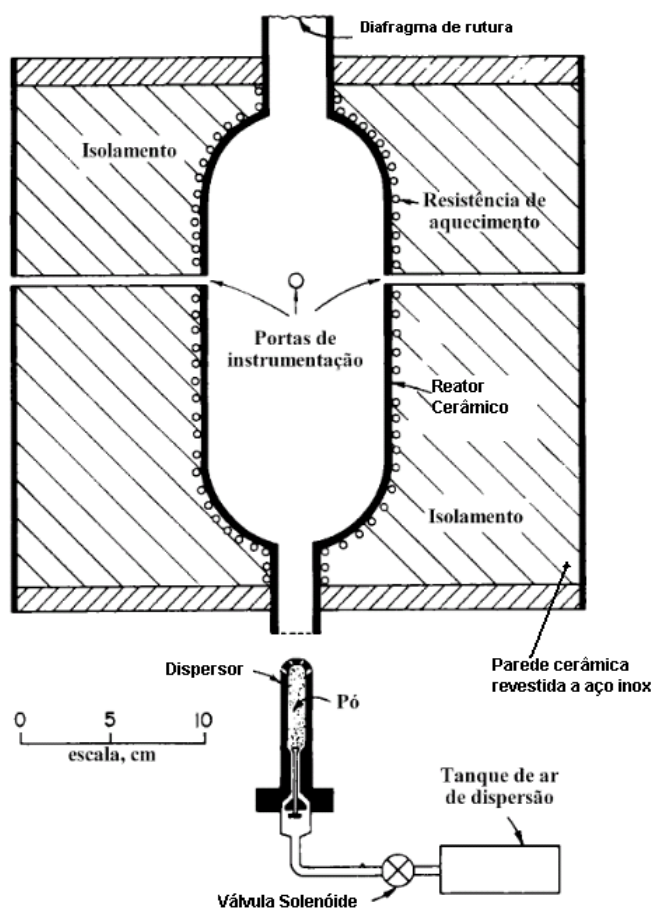


Figura 3. 1 – Corte vertical da fornalha de 1,2 L de capacidade (adaptado de Pilão, 2003).

Na Figura 3.2 pode ver-se fotografias desta fornalha e do reator cerâmico que constitui o seu interior. O desenho de fabrico, que seguiu as especificações da norma ASTM E-1491, pode ser consultado em Pilão (2003).



Figura 3. 2 – Fornalha de 1,2 L de capacidade (Pilão, 2003) a) aspeto exterior, b) reator cerâmico

3.1.2 – Medição da pressão de explosão

A evolução da pressão durante a explosão foi medida por um transdutor de pressão piezoresistivo com membrana interna (Tecsis modelo 3245). O tempo de resposta deste transdutor é inferior a 1 ms, a gama de trabalho é de 0-16 bar (abs), incerteza de 0,5 % fim de escala e resolução de $\pm 0,05\%$ fim de escala (8 mbar).

A Figura 3.3 apresenta um exemplo de uma curva de pressão versus tempo de um ensaio cuja temperatura inicial de 575 °C é inferior à temperatura de ignição do pó para partículas com 123 μm de diâmetro mediano mássico e representa portanto um ensaio para o qual não se verificou rutura do diafragma sendo por isso classificado como ensaio sem ignição, ou ignição negativa. Nesta figura pode-se observar o desempenho do transdutor de pressão, nomeadamente a capacidade de detetar variações de pressão muito rápidas, sendo mesmo possível detetar o abaixamento de pressão, assinalada pela letra A na figura, provocada pelo arrefecimento inicial causado pela massa de pó e ar frio que entram na fornalha.

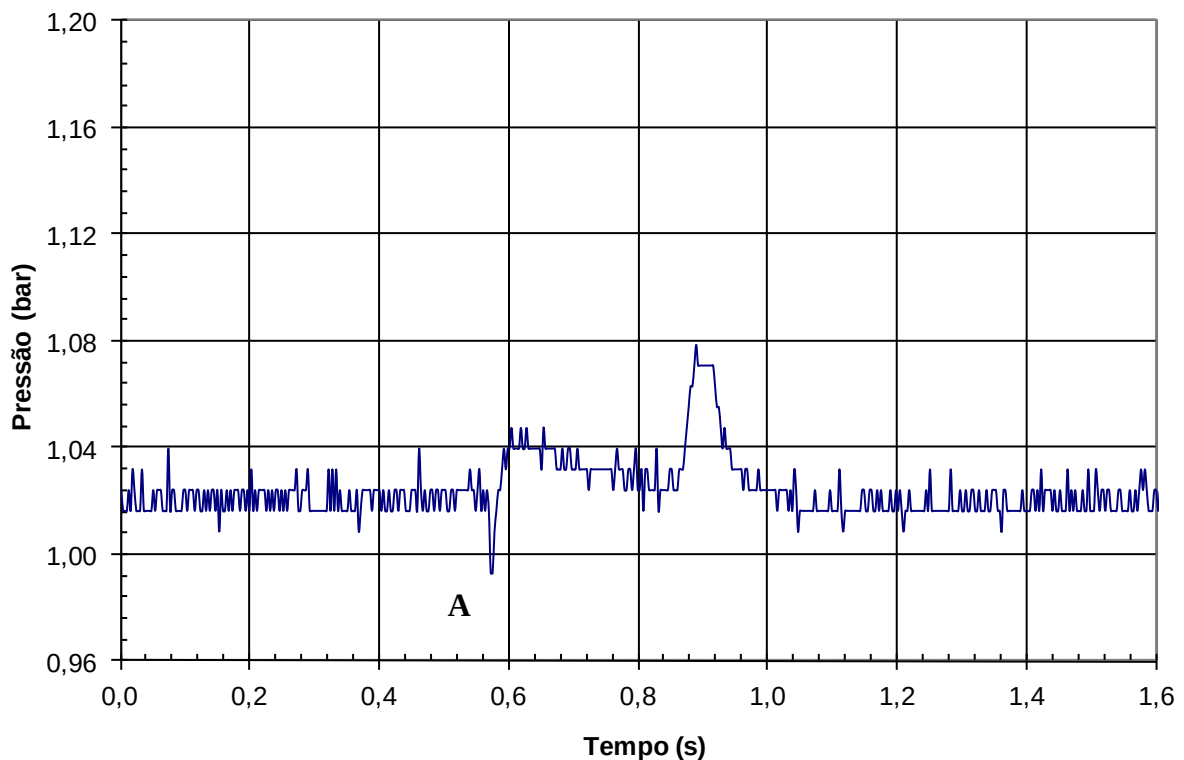


Figura 3. 3 – Evolução da pressão durante um ensaio com ignição negativa a 575 °C, para uma suspensão de 200 g/m³ de partículas com 123 μm de diâmetro mediano mássico.

3.1.3 – Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados utilizado nos ensaios de auto-ignição térmica consta, basicamente, de um computador pessoal com processador INTEL 80486 a 66 MHz, no interior do qual está instalada uma placa de aquisição de dados da METRABYTE, neste caso uma DAS-1601, à qual está ligada, uma placa expansora (EXP-16A). A DAS 1601 é uma placa multifuncional, de alta velocidade (100 kHz) que estabelece a “interface” analógico/digital entre o PC e a fonte de sinal. Uma das 8 entradas analógicas bipolares desta placa foi utilizada para a leitura do sinal de saída do transdutor de pressão com ganho 1. A placa possui, ainda, duas saídas analógicas onde uma delas foi utilizada para acionar a eletroválvula instalada na linha de dispersão do ar.

Foi desenvolvido por Pilão (2003), para funcionar com estas placas, um programa de aquisição de dados em Basic, da Microsoft, que controla a aquisição de dados no desenrolar de um ensaio de explosão e que permite ler os sinais de entrada, de cada canal, com um tempo de amostragem de 10 ms convertendo-os depois nos correspondentes valores da variável em estudo (pressão).

O sistema de aquisição de dados utilizado na determinação dos perfis de temperatura consta, basicamente, de um computador pessoal com processador INTEL PIII a 766 MHz, no interior do qual está instalada uma placa de aquisição de dados da ADVANTECH, neste caso uma PCI-1710HG, multifuncional de alta velocidade (100 kHz) com sistema de conversão analógico/digital de 12 bits e gama de 0 a 0,1 Volt, à qual está ligada, uma placa expansora PCLD-8710, para leitura de termopares com compensação de junta fria. A tensão dos termopares aquando das medições dos referidos perfis era convertida no parâmetro em estudo, temperatura, através do programa de aquisição de dados LabVIEW da National Instruments que fazia também a compensação da junta fria (Moreira, 2007).

3.2 – Perfis de temperatura

A fim de verificar se a temperatura no interior do reator, no início do ensaio, se poderia considerar uniforme em todo o seu volume foram traçados os perfis de temperatura axial e radial no interior da fornalha de 1,2 L. A evolução dos perfis de temperatura foi medida recorrendo a termopares de bainha do tipo K.

O perfil de temperatura radial foi medido movendo o termopar a meia altura da fornalha de parede a parede medindo a temperatura em 5 posições. O perfil de temperatura axial foi medido ao longo do eixo vertical da fornalha medindo a temperatura na parte inferior, no centro, i. e., a meia altura da fornalha, e na parte superior do reator.

Na Figura 3.4 pode ser visualizada a localização das posições dos termopares assim como o posicionamento (seta) do termopar de controlo de aquecimento da fornalha. Para a determinação da temperatura mínima de ignição utilizou-se a leitura do termopar de controlo como referência, e cuja extremidade estava localizada a 10 mm da parede interna da fornalha sendo considerada a temperatura neste local, após vários ensaios, aproximadamente igual à temperatura da parede interior da fornalha.

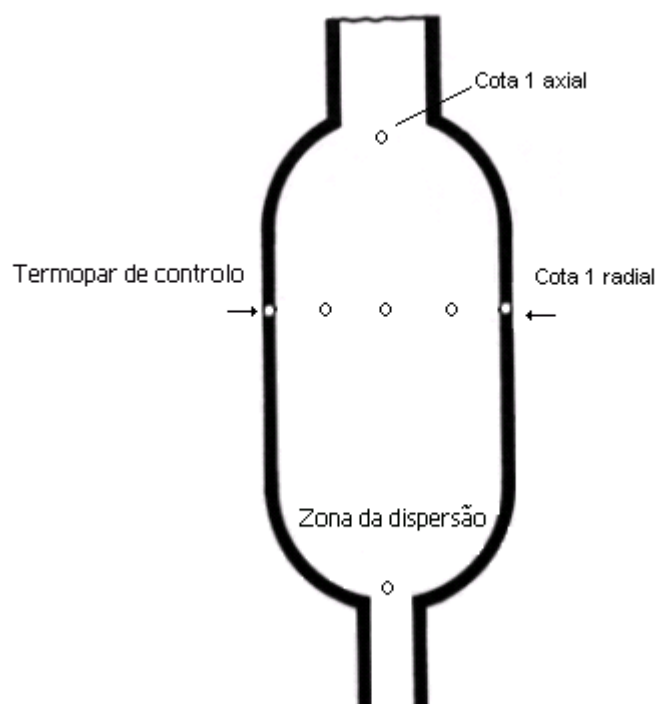


Figura 3. 4 – Localização dos pontos onde se efetuaram as medições de temperatura no interior do reator da fornalha de 1,2 L.

Nos ensaios realizados para a obtenção dos perfis de temperatura foi selecionada a temperatura de funcionamento da fornalha, utilizando o controlador/programador de temperatura da instalação, e o reator foi fechado superiormente pela colocação de um disco de rutura na parte superior. Afim de simular as condições que se observam, no interior do reator, no instante que precede a dispersão do pó para a determinação da temperatura mínima de ignição, os ensaios foram realizados sem o dispersor roscado na parte inferior do reator. Após 30 mins de estabilização do valor de temperatura selecionado, com o termopar de bainha do tipo K inserido na porta de instrumentação da fornalha correspondente e a junta quente colocada na posição de medida desejada, a temperatura era adquirida pelo sistema de aquisição sendo esta a média dos valores medidos calculada durante o último minuto de aquisição.

3.2.1 – Perfil de temperatura radial

Na Figura 3.5 apresenta-se o perfil de temperatura radial na fornalha de 1,2 L medido a meia altura da fornalha, para três temperaturas de funcionamento da fornalha diferentes, 400 °C, 500 °C e 600 °C. Os valores apresentados em ordenadas representam as médias temporais dos valores registados da temperatura no último minuto dos trinta minutos necessários para a estabilização e o eixo das abcissas representa a posição radial adimensional onde a cota 0 localiza-se na parede interior do reator próximo da localização do termopar de controlo, ver Figura 3.4, e a cota 1 radial localiza-se na parede oposta relativamente à cota 0.

Como se pode ver pelos resultados da Figura 3.5, obtidos para a temperatura de 400 °C, não se observou variação da temperatura ao longo do diâmetro do reator sendo o desvio

máximo de cerca de 8 °C. Pode-se considerar um perfil radial isotérmico a esta temperatura. Quando se elevou a temperatura para os 500 °C e 600 °C verificou-se uma ligeira subida do desvio máximo da temperatura, cerca de 12 °C, nos 25 % do reator junto às paredes mantendo-se esta no seu valor no centro do reator.

Em termos globais, e para as diferentes temperaturas nominais do controlador, pode constatar-se uma uniformidade na distribuição das temperaturas pois a variação destas foi inferior a 12 °C, valor este que pode ser desprezável na obtenção da temperatura mínima de ignição pois está dentro da incerteza admissível para o valor deste parâmetro (ASTM E 1491).

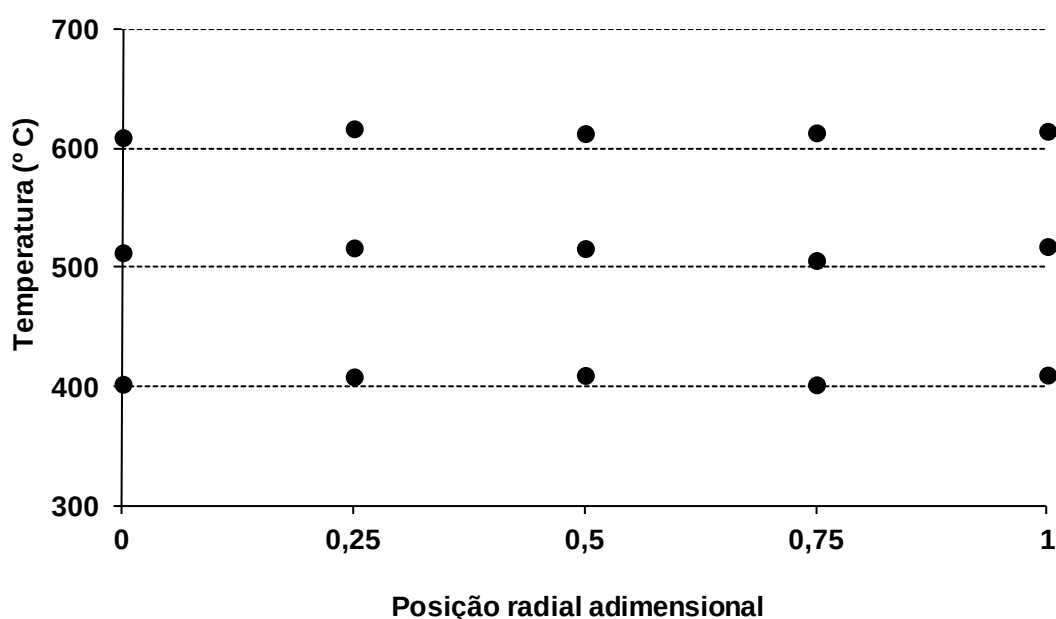


Figura 3. 5 – Perfil de temperatura radial no reator da fornalha de 1,2 L.

3.2.2 – Perfil de temperatura axial

Na Figura 3.6 podem ser visualizados os perfis de temperatura axial na fornalha de 1,2 L medidos para três temperaturas diferentes de funcionamento da fornalha, 400 °C, 500 °C e 600 °C. Mais uma vez, os valores apresentados em ordenadas representam as médias temporais dos valores registados da temperatura no último minuto dos trinta minutos necessários para a estabilização e o eixo das abcissas representa a posição axial adimensional onde a cota 0 localiza-se perto da zona de dispersão, ver Figura 3.4, e a cota 1 axial localiza-se na posição oposta à cota 0, ou seja, no topo do reator, c.f. Figura 3.4.

Em termos globais, e para as diferentes temperaturas nominais do controlador, denota-se uma uniformidade das temperaturas sendo sempre esta mais elevada a meio da fornalha que nas extremidades (topo e base). A extremidade inferior apresenta sempre a temperatura mais baixa pois as correntes de convecção natural que se criam dentro do reator promovem temperaturas mais elevadas na metade superior do reator. Entre a extremidade inferior e o meio da fornalha a diferença de temperatura ronda os 5 °C enquanto que, entre o meio desta e

a extremidade superior a diferença de temperatura ronda os 7-10 °C. Assim podemos dizer mais uma vez que estes gradientes não afectam significativamente a medição da temperatura mínima de ignição pois estão dentro da incerteza admissível para o valor deste parâmetro (ASTM E 1491).

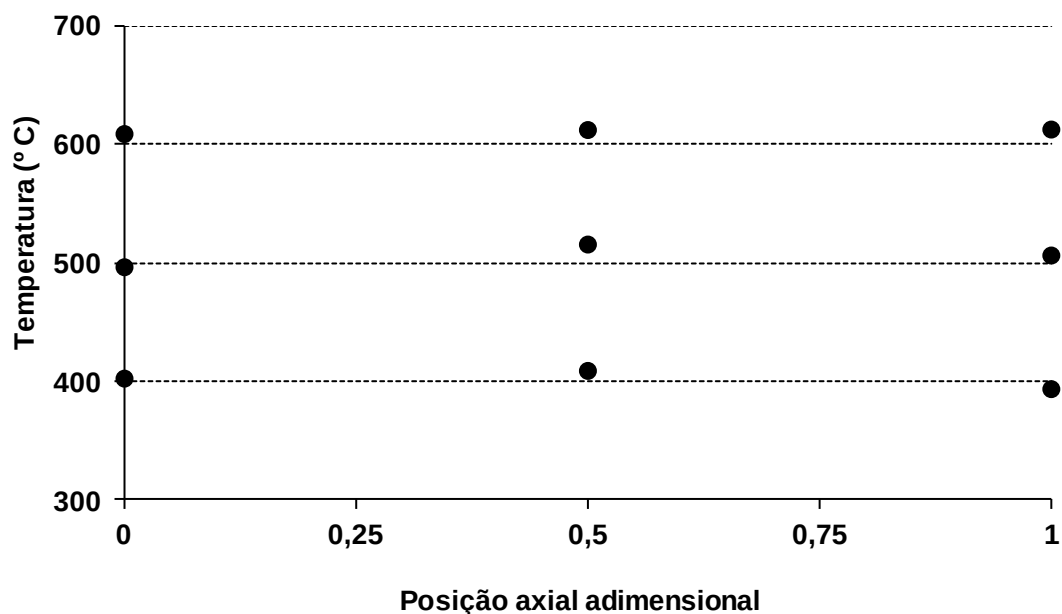
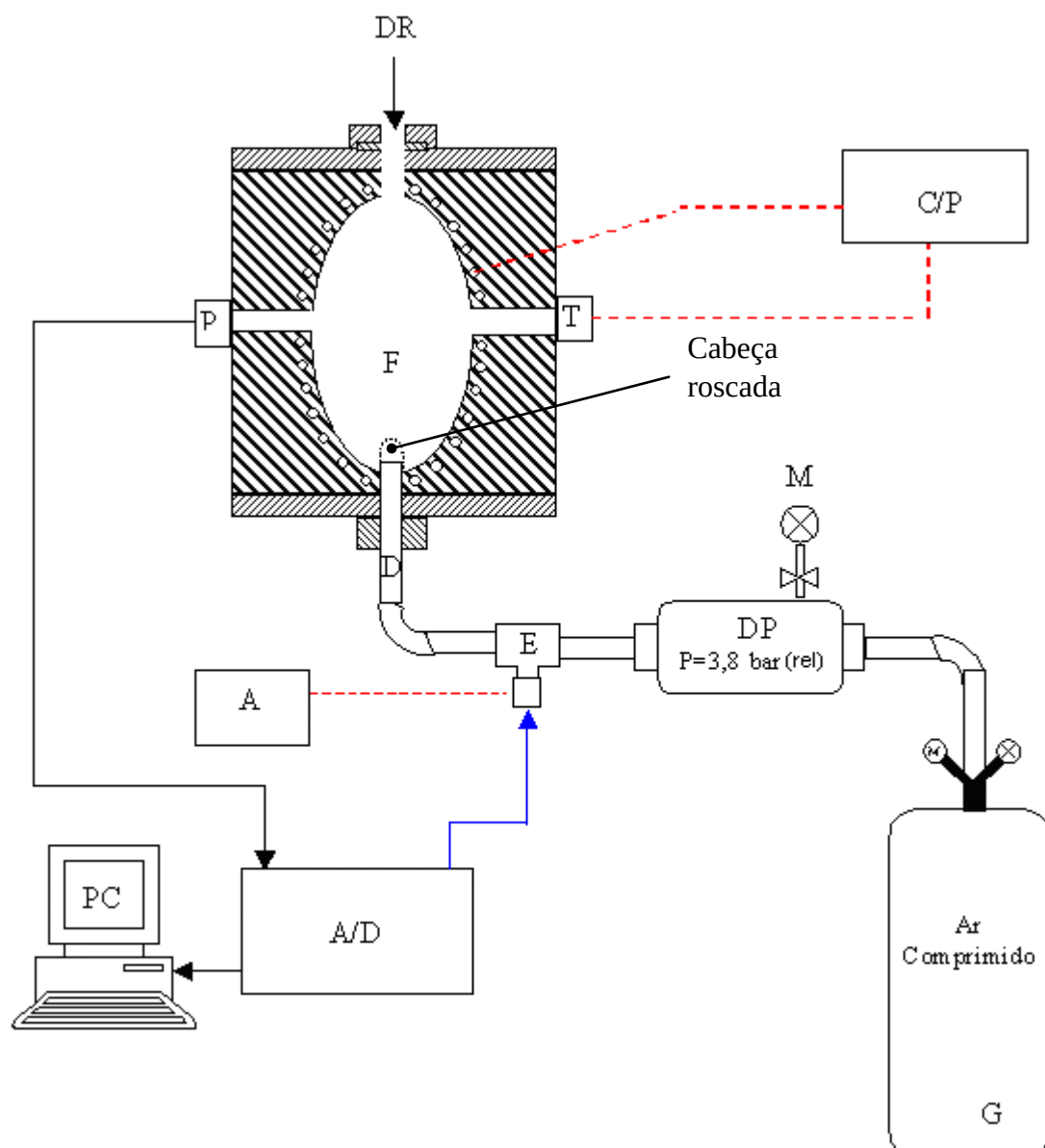


Figura 3. 6 – Perfil de temperatura axial no reator da fornalha de 1,2 L.

3.3 – Ensaio de ignição térmica

O ensaio de ignição térmica compreende a determinação experimental da temperatura mínima de ignição do pó de casca de pinheiro apresentando-se esquematicamente na Figura 3.7 a instalação experimental utilizada na realização destes ensaios.



- | | |
|--|---------------------------------------|
| A – Alimentação elétrica | F – Fornalha (reator cerâmico) |
| A/D – Sistema de aquisição e tratamento de dados | G – Garrafa de ar comprimido |
| DP – Depósito pressurizado de 0,066 L | M – Manómetros |
| D – Dispersor | P – Transdutor de pressão de membrana |
| DR – Disco de rutura | T – Termopar tipo K |
| E – Electroválvula | E – Válvula de retenção |
| | PC – Computador pessoal |

Figura 3. 7 – Esquema da instalação experimental de ensaios de ignição (adaptado de Pilão, 2003).

Os ensaios foram realizados de acordo com o procedimento indicado na norma ASTM E 1491-97. O primeiro passo do ensaio consiste em selecionar a temperatura de funcionamento da fornalha (F) utilizando controlador/programador de temperatura (C/P). Na parte superior da fornalha é colocado o disco de rutura em fibra de vidro (DR) e esta é

fechada. Após se ter atingido a temperatura pré-selecionada, uma quantidade de pó previamente pesada, de forma a se obter a concentração desejada dentro da fornalha, é introduzida no interior do dispersor (D), o qual, depois de se montar a cabeça roscada, é introduzido e fixado ao reator (F) momentos antes do ensaio de ignição começar. A electroválvula (E) é então atuada e o ar de dispersão, à temperatura ambiente e a 3,8 bar (relativa), proveniente de um reservatório (DP) com aproximadamente 0,066 L de capacidade é introduzido durante 30 ms (valor imposto pela norma e que está relacionado com o grau de turbulência inicial) no interior da fornalha (F) dispersando o pó através dos 9 furos existentes no topo (cabeça) do dispersor (D). A constante de tempo para aquecer a mistura ar-pó dispersa até à temperatura inicial do reator é normalmente bastante inferior ao tempo necessário para a ignição definido como o tempo entre o início da dispersão e o instante em que a mistura é inflamada (Conti e Hertzberg, 1987).

O critério usado para determinar se existiu ignição da nuvem de pó consiste na ocorrência da rutura do diafragma acompanhada da observação simultânea da emissão de chama pela parte superior do reator. No fim do ensaio procede-se à extração do diafragma da parte superior do reator e à limpeza do interior do reator introduzindo um jato de ar pelo fundo do mesmo a fim de remover qualquer pó residual existente no seu interior.

Caso se conheçam os resultados de explosibilidade para o pó em causa, e se pretenda repetir os ensaios, o teste inicial deve ser realizado à concentração ótima, ou seja, à correspondente aos valores máximos obtidos para os parâmetros de explosão que são a pressão máxima ($P_{máx}$) e velocidade máxima de aumento de pressão ($dP/dt_{máx}$). Em todo o caso, para se elaborar o mapa típico da temperatura versus concentração para a obtenção da temperatura mínima de ignição, deve-se seguir por exemplo a norma ASTM E 1491. Na Figura 3.8 pode ser visualizada um mapa típico da temperatura mínima de ignição do pó de polietileno onde os pontos a cheio correspondem a ensaios em que ocorreu a ignição do pó (ignição positiva).

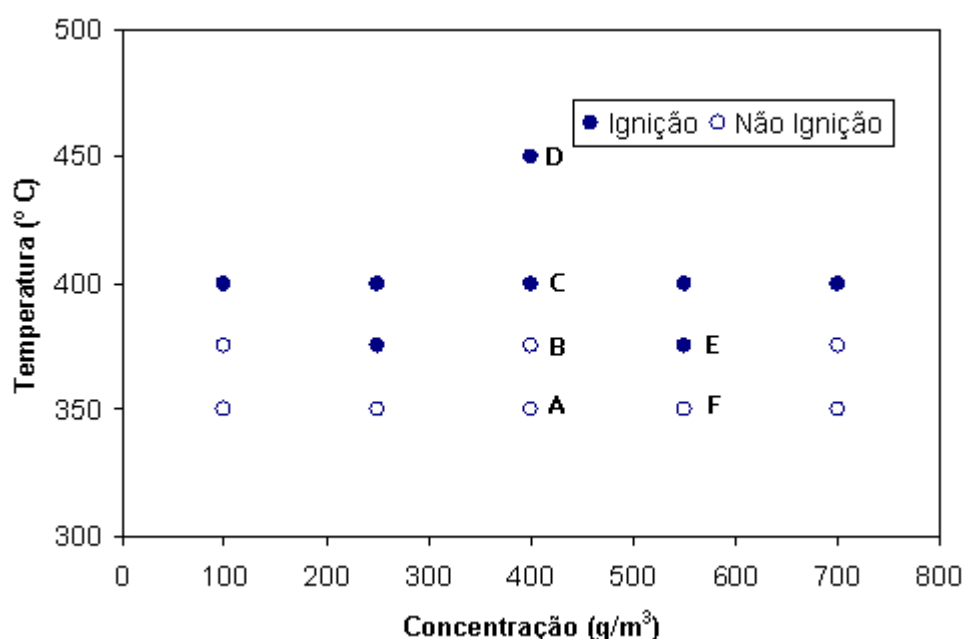


Figura 3. 8 – Mapa típico para a determinação da temperatura mínima de ignição do pó de polietileno (adaptado de ASTM E 1491).

A seguir apresenta-se a metodologia de ensaio segundo a norma ASTM E 1491. A norma recomenda que a concentração inicial seja superior a 300 g/m^3 (este valor tem a ver com a maior probabilidade de existir ignição, por exemplo o ponto A da Figura 3.8) e, caso não ocorra ignição, se incremente a temperatura do primeiro ensaio em $25^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}$ até encontrar a temperatura mais baixa à qual ocorre ignição (ponto C Figura 3.8) e a mais elevada à qual não ocorre ignição (ponto B Figura 3.8). À temperatura mais elevada à qual não se verifica ignição (ponto B) aumenta-se a concentração de pó realizando pelo menos cinco ensaios nessa concentração a fim de garantir que não ocorre explosão com o aumento da concentração. Caso haja ignição a esta temperatura (ponto E) deve-se baixar a temperatura (ponto F) e continuar com os ensaios. Para a temperatura mais baixa à qual se observa ignição realizam-se novos ensaios com diferentes concentrações (superiores e inferiores) de pó até se identificar a região em que ocorre a transição de ignição para não ignição à temperatura em causa. Deve observar-se pelo menos três ensaios com ignição a diferentes concentrações à temperatura em questão (ASTM E 1491) para se poder dizer que a essa temperatura o pó entra em ignição. A determinação final da temperatura mínima de ignição (*TMI*) deve ser feita variando agora a temperatura em incrementos de 25°C ou menos.

A temperatura mínima de ignição é definida como sendo a média entre a menor temperatura à qual se observa ignição e a maior temperatura à qual não se observa ignição seja qual for a concentração de pó. No caso de existir uma temperatura intermédia para a qual se observe ignição para metade dos ensaios, esta deve ser tomada como a *TMI*. O valor final apresentado deve ser arredondado para os 10°C mais próximos (ASTM E 1491). Para o exemplo da Figura 3.8, a *TMI* do pó de polietileno seria de 370°C .

Finalmente deve repetir-se o procedimento experimental anterior para as várias granulometrias em estudo afim de se encontrar o verdadeiro valor da temperatura mínima de ignição pois este depende não só da concentração de pó como também da granulometria.

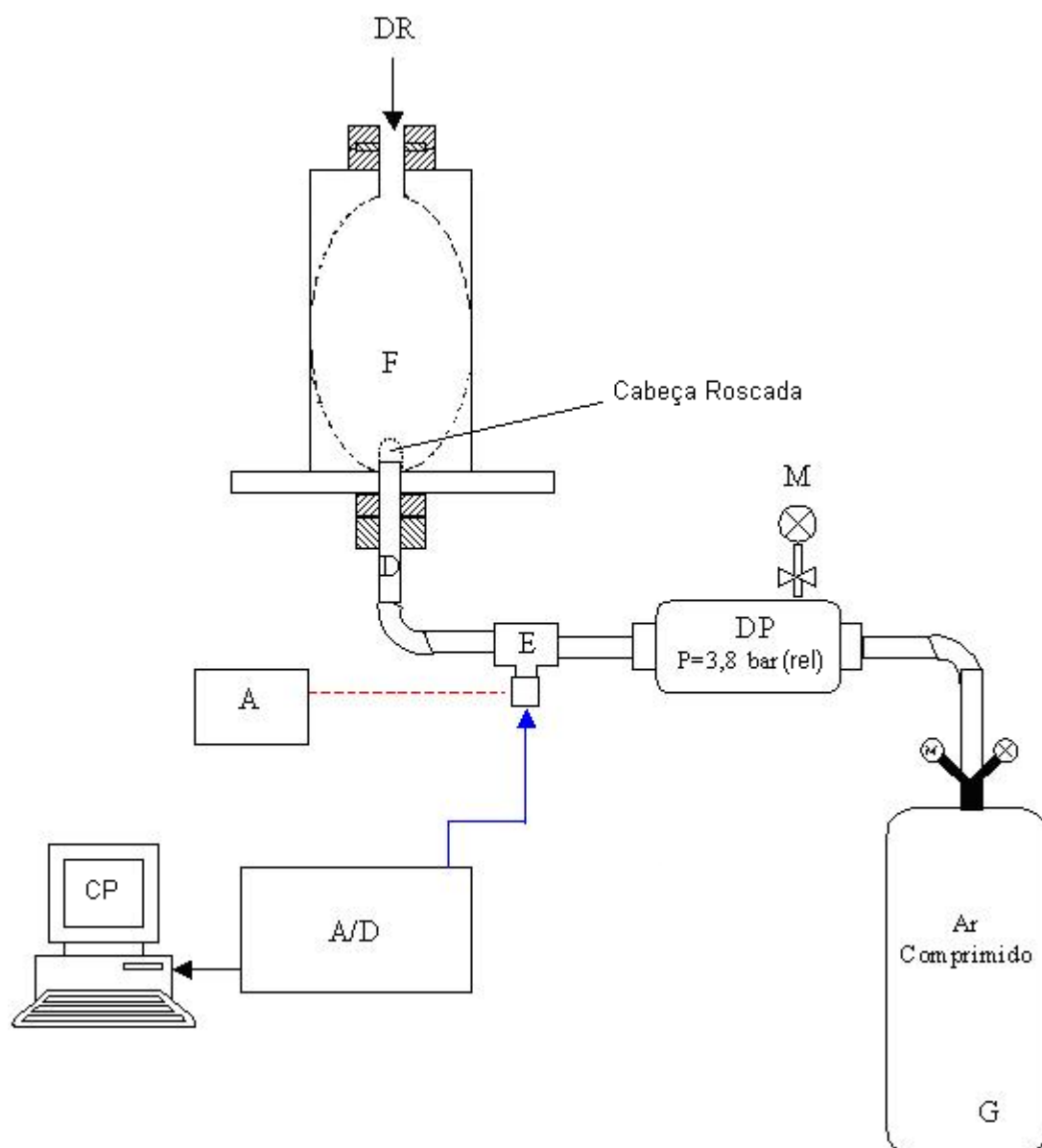
3.4 – Visualização da dispersão do pó

Com o intuito de verificar e avaliar a uniformidade da dispersão do pó no interior do reator foi construído um sistema para visualização da dispersão do pó que consiste num cilindro em acrílico transparente com um volume e dimensões equivalentes ao do reator de 1,2 L, tendo 92 mm de diâmetro e 232 mm de altura (1,5 L), conforme pode ser visualizado na Figura 3.9.



Figura 3. 9 – Reator em acrílico de 1,5 L de capacidade.

Na Figura 3.10 representa-se esquematicamente a instalação experimental utilizada na realização destes ensaios, que é a mesma utilizada aquando da realização dos ensaios de determinação da temperatura mínima de ignição térmica com exceção do reator.



A – Alimentação elétrica

A/D – Sistema de aquisição e
tratamento de dados

DP – Depósito pressurizado de 0,066 L

D – Dispersor

DR – Disco de rutura

F – Fornalha (reator em acrílico)

G – Garrafa de ar comprimido

M – Manómetros

CP – Computador Pessoal

E – Electroválvula

E – Válvula de retenção

Figura 3. 10 – Esquema da instalação experimental de ensaios de dispersão.

Os ensaios foram em parte realizados de acordo com o procedimento indicado na norma ASTM E 1491-97 aquando dos ensaios da determinação da temperatura mínima de ignição térmica. Relembrando, o primeiro passo consistiu em pesar uma quantidade de pó de casca de pinheiro bravo de forma a se obter a concentração desejada dentro do reator em

acrílico (F) que posteriormente é introduzida no interior do dispersor (D), o qual, depois de se montar a cabeça roscada, é introduzido e fixado ao reator (F) momentos antes do ensaio de dispersão começar. Na parte superior do reator em acrílico (F) é colocado o disco de rutura em fibra de vidro (DR) de forma a este último tapar a abertura aí existente. A electroválvula (E) é então actuada pelo computador pessoal (PC) e o ar de dispersão, à temperatura ambiente e a 3,8 bar (relativa), proveniente de um reservatório (DP) com aproximadamente 0,066 L de capacidade é introduzido durante 30 ms (valor imposto pela norma e que está relacionado com o grau de turbulência inicial) no interior da fornalha (F) dispersando o pó através dos 9 furos existentes no topo (cabeça roscada) do dispersor (D).

A dispersão do pó foi filmada com uma câmara de alta velocidade da marca Casio (Figura 3.11), modelo Exilim EX-FH25 BK, fixa num tripé em posição vertical, cedida gentilmente pelo Prof. Manuel Alves do Departamento de Engenharia Química. A câmara permite filmar a diferentes fotogramas por segundo, conforme tabela seguinte.

Tabela 3. 1 – Características das resoluções permitidas pela câmara de alta velocidade

Fotogramas por segundo (fps)	Tamanho da imagem (pixels)
120	640×480
240	448×336
420	224×168
1000	224×64



Figura 3. 11 – Máquina de alta velocidade da Casio.

Tendo em conta a duração dos ensaios de explosão que são da ordem dos milissegundos e também o tempo de amostragem do transdutor de pressão que é de 8 ms, a frequência escolhida para as filmagens dos ensaios de dispersão foi de 240 fotogramas por segundo, o que significa que em cada 4,2 milissegundos a câmara de alta velocidade tem capacidade de captar uma imagem, já que se observarmos com atenção as curvas apresentadas no Capítulo 5, constata-se que um ensaio negativo dura pelo menos 400 milissegundos e um ensaio positivo 200 milissegundos. Assim a escolha de 240 fps e resolução respetiva é mais do que suficiente para permitir um bom realismo na captação de um ensaio de dispersão.

O Pó de Casca de Pinheiro e a sua Dispersão em Ar

4.1 – Introdução

A origem do pinheiro bravo não é muito clara mas tem-se naturalmente espalhado pelas regiões Mediterrânicas de França, Córsega, Espanha, Itália e em regiões Atlânticas de Espanha, França e Portugal. O pinheiro bravo (*Pinus Pinaster*) é uma das espécies florestais principais de Portugal que se estende numa área ocupacional de cerca de 31 %. Caracteriza-se por ser uma espécie persistente com uma altura média de 25 m a 40 m com coroa piramidal quando jovem e cilíndrica quando adulta. Bem adaptada a climas marítimos temperados, esta espécie tem a característica de ser uma espécie autóctone. Regista altas taxas de crescimento em baixas e médias altitudes, onde ocorre temperatura média anual de 11-15 °C, alta precipitação e alta humidade do ar (Pinto, 2004).

4.1.1 – Caracterização química da casca de pinheiro bravo

A composição química da casca do pinheiro bravo (*Pinus Pinaster*) e os seus extratos alcalinos foram investigados por Fradinho *et al* (2002). Neste estudo mostrou-se que a casca do pinheiro bravo era composta por: lenhina e polifenólicos (ca. 44 %), polissacarídeos (ca. 39 %), diclorometano, etanol e água (ca. 17 %) e cinzas (ca. 1 %).

Para a determinação da percentagem de lenhina na casca de pinheiro bravo aqueles autores adotaram o método de Klason, tendo obtido o valor percentual em base seca de 33,2 %. A lenhina da casca é composta das unidades de p-hidrofenilpropano e guaiacil propano numa proporção que pode ir de 20 a 80 %. Relativamente à percentagem de celulose verificaram que o seu valor era de 24 %, onde se distinguem as hemiceluloses (15 % da casca em base seca). Estas são constituídas maioritariamente por arabinoglucuronoxilanos e uma quantidade menor do galactoglucomananos “galactoglucomanase” (polissacarídeos vegetais) (Semenova, 2005).

A composição mais pormenorizada pode ser consultada na Tabela 4.1.

Tabela 4. 1 – Composição química geral de casca de pinheiro bravo (% w/w base seca) (Semenova, 2005)

Componentes químicos	% (w/w)
Cinzas	0,8
Diclorometano	3,1
Etanol	10,3
Água	3,2
Total	16,6
Subst. Alcalinos (2 % NaOH, 0,5 h, 100 °C, 1 g/10 ml) (a)	10,8
Holocelulose (b)	48,4
Lenhina obtida pelo método de Klason	33,2

a) Extração alcalina após extração pelo solvente.

b) Determinado após extração pelo solvente e extração alcalina com 2 % de NaOH (0,5 h, 100 °C, 1 g/10 ml).

4.2 – Caracterização física do pó da casca de pinheiro bravo

O conhecimento do tamanho das partículas é fundamental no projeto, dimensionamento e estudo de sistemas de transporte pneumático e de sistemas bifásicos gás/sólido ou líquido/sólido. Idealmente interessa conhecer-se a distribuição de tamanhos das partículas envolvidas no sistema em análise, assim como a sua forma ou grau de afastamento da forma teoricamente ideal, que poderá ser a esférica. O tamanho da partícula tem particular interesse no presente trabalho pois influencia a taxa de desvolatilização enquanto a sua distribuição é de importância primordial para a taxa de combustão.

Para se obter o conhecimento da distribuição de tamanhos, recorre-se à análise granulométrica. O objetivo principal da análise granulométrica é a determinação da distribuição estatística das dimensões das partículas que constituem o produto pulveroso ou granular. O princípio básico da análise granulométrica é dividir um material granular a granel em frações de tamanhos, com uma classificação subsequente da massa total dessa carga a granel em classes de tamanhos. A medição do tamanho das partículas pode efetuar-se de vários modos. Para partículas de grandes dimensões, pode-se empregar a medida direta por meio de micrómetros ou paquímetros, técnicas de medição à vista desarmada. Para produtos pulverosos, podem-se empregar outros métodos diretos, como o microscópico ótico, o microscópio eletrónico e o peneiramento por via húmida ou seca. Também se empregam técnicas indiretas tais como a sedimentação, a difração ou dispersão da luz ou o contador Coulter. O emprego de peneiros permite a medição de dimensões até 40 µm, o contador Coulter permite ir-se até dimensões da ordem de 0,1 µm enquanto que o microscópico eletrónico de transmissão permite a medição de partículas até 0,001 µm (Pinho, 2005).

Neste trabalho foram estudadas quatro granulometrias diferentes do pó de casca de pinheiro bravo. Cada fração granulométrica foi obtida por peneiração da amostra inicial utilizando para o efeito peneiros ASTM. Os diâmetros medianos mássicos das frações obtidas

por peneiração, foram posteriormente medidos com um analisador de partículas por dispersão de raios LASER, contador Coulter LS, numa suspensão das partículas em etanol, apresentando-se os resultados na Tabela 4.2. Esta caracterização, foi efetuada nos laboratórios do Departamento de Engenharia Química da FEUP, pelo técnico superior, doutor Luís Carlos Matos, sob a responsabilidade da Prof.^a Alexandra Pinto.

Tabela 4. 2 – Relação das granulometrias das amostras de pós estudadas

	Gran. 1	Gran. 2	Gran. 3	Gran. 4
Diâm. Médio Aritmético das Malhas dos Peneiros (μm)	44	74	88	149
Diâm. Mediano Mássico (μm)	41	83	123	267

Na Figura 4.1 pode ver-se a curva de distribuição da frequência relativa do tamanho das partículas para as quatro granulometrias estudadas que caracteriza as amostras genéricas do pó de casca de pinheiro bravo.

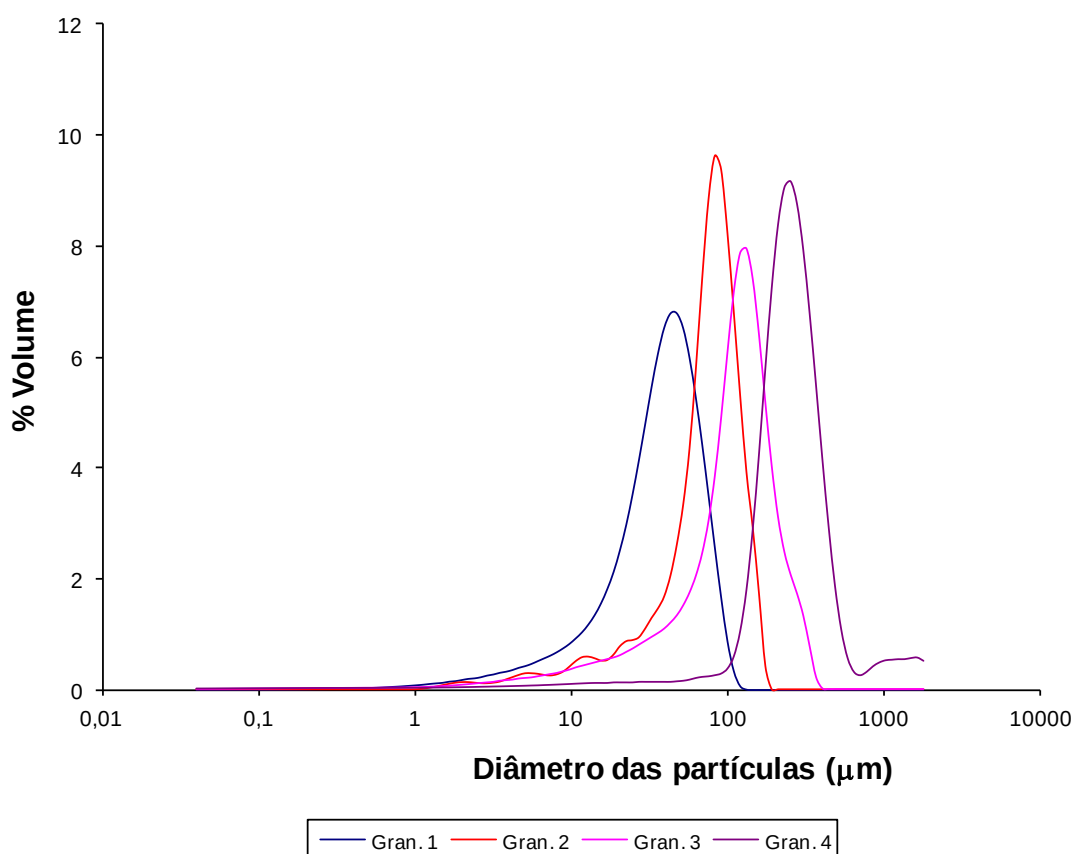


Figura 4. 1 – Distribuição da frequência relativa do tamanho das partículas por granulometria.

O pó de casca de pinheiro bravo foi analisado ao microscópio eletrónico de varrimento do Centro de Materiais da Universidade do Porto. Nas Figuras 4.2 e 4.3 encontram-se

exemplos de fotografias tiradas a dois dos tamanhos de partículas estudadas, onde se pode avaliar a morfologia das partículas.

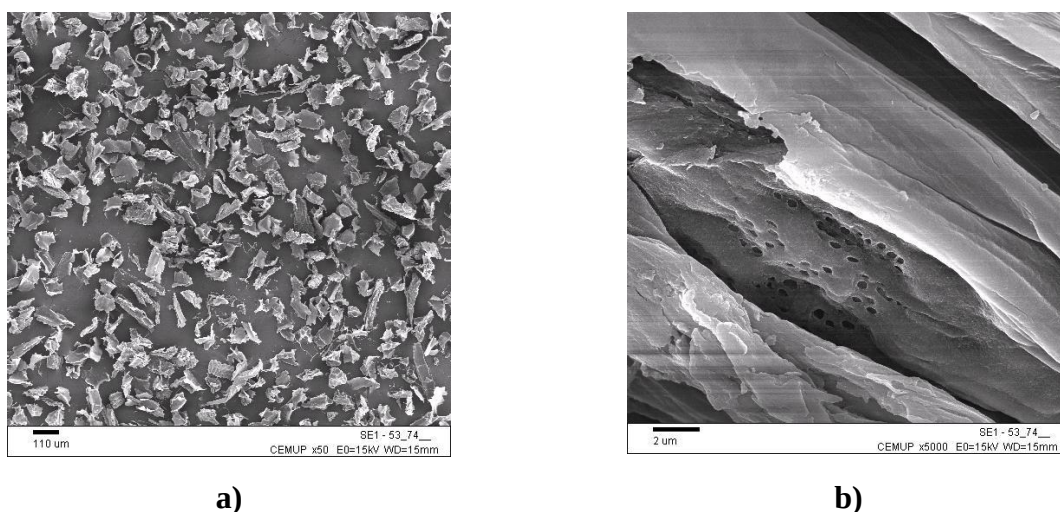


Figura 4. 2 – Morfologia das partículas de pó de casca de pinheiro bravo com 83 µm diâmetro mediano mássico. a) ampliação de 50×; b) ampliação de 5000×

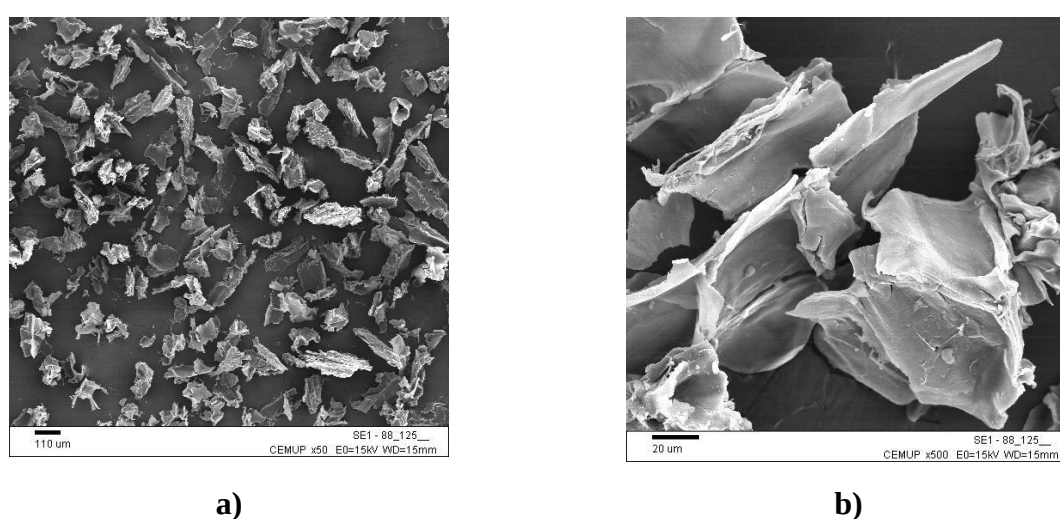


Figura 4. 3 – Morfologia das partículas de pó de casca de pinheiro bravo com 123 µm diâmetro mediano mássico. a) ampliação de 50×; b) ampliação de 500×

Pela análise das figuras anteriores é possível constatar que o pó de casca de pinheiro bravo apresenta uma morfologia não esférica mas antes uma morfologia da forma alongada, podendo-se em algumas das frações identificar lascas de casca, daí que nestes dois casos, os diâmetros medianos mássicos, determinados pela difração LASER (Coulter LS), saírem da gama de dimensões definidas pelas malhas dos peneiros, Tabela 4.2.

4.3 – Estudo da dispersão do pó da casca de pinheiro bravo

4.3.1 – Introdução

Idealmente, a amostra de pó deve ser uniformemente dispersa no reator no entanto nenhum sistema real de dispersão é 100 % eficiente. A facilidade com que um pó é disperso no ar é função de vários fatores: a massa volúmica individual das partículas, o seu diâmetro, a sua forma, as suas propriedades coesivas de umas relativamente às outras e às suas propriedades adesivas relativamente às superfícies circundantes. Alguns fatores externos também têm um papel importante no processo de dispersão como por exemplo a estrutura e intensidade das perturbações aerodinâmicas, a posição do fornecimento do pó e a geometria destas superfícies (Pilão, 2003). Uma massa de um determinado tipo de pó contém um número finito de forças de ligação inter-partículas em que cada uma delas requer trabalho específico para as quebrar. Estas forças de ligação incluem as forças de Van der Waals' e as forças electrostáticas, conhecidas como forças de Coulomb (Eckhoff, 2009).

Em princípio, o trabalho total mínimo necessário para quebrar estas ligações pode ser calculado pela integração do trabalho necessário para quebrar individualmente todas estas forças de ligação inter-partículas. A influência da gravidade dependerá essencialmente da direção da projeção ascendente ou descendente das partículas para a formação da suspensão do pó. Em todo o caso as forças são quebradas por elevadas forças de corte proporcionadas pela projeção das partículas em ar sob elevada velocidade de impacto (sistema de dispersão) (Eckhoff, 2009).

Uma nuvem de pó é considerada perfeitamente dispersa quando a constituição da nuvem é apenas formada por partículas primárias enquanto uma nuvem deficientemente dispersa é constituída por aglomerados de partículas, como se pode ver pela ilustração da Figura 4.4.

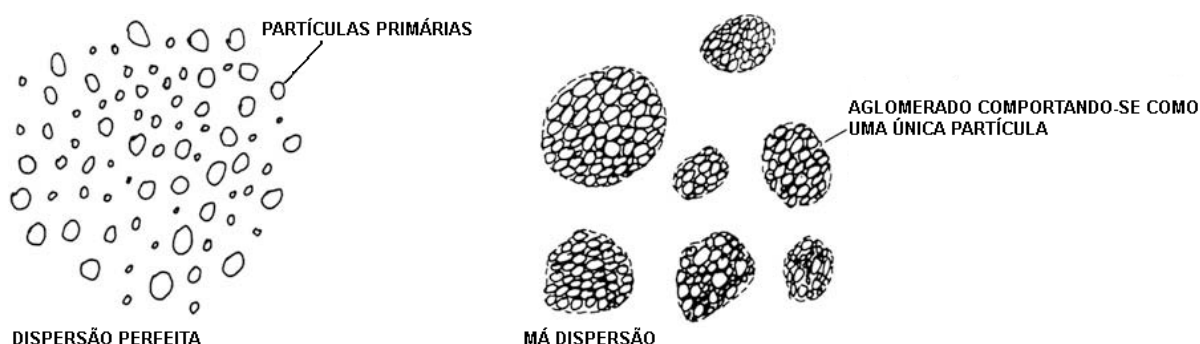


Figura 4. 4 – Ilustração de dois tipos de dispersão (figura adaptada de Eckhoff, 2009).

4.3.2 – Resultados

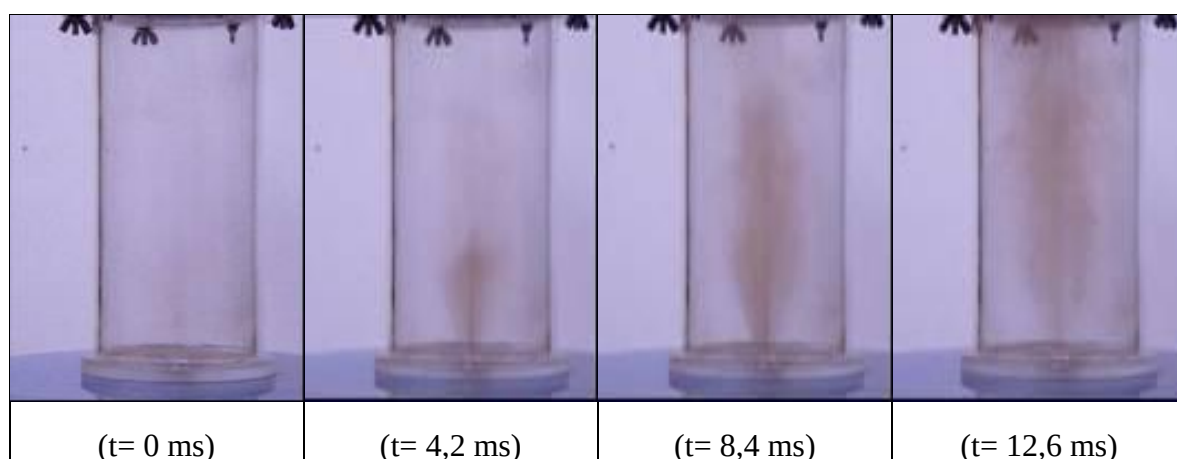
A uniformidade da dispersão do pó de casca de pinheiro bravo em ar foi avaliada pela gravação de imagens de alguns ensaios de dispersão utilizando um reator em acrílico.

Neste estudo foram testadas quatro granulometrias de pó com diâmetros medianos mássicos de 41 μm , 83 μm , 123 μm e 267 μm . A dispersão de cada uma destas frações granulométricas foi estudada em função de três concentrações por granulometria. A cabeça do dispersor utilizada nas duas granulometrias menores foi a original de 9 furos, nas duas granulometrias superiores foi utilizada a nova cabeça.

Conforme descrito no ensaio de ignição a dispersão do pó dura cerca de 30 ms e os resultados dos ensaios de ignição mostram que uma mistura com elevada probabilidade de ignição térmica inflamará cerca de 40 ms após o início da dispersão. Com a diminuição da probabilidade de ignição este tempo aumenta podendo atingir valores da ordem dos 150 ms. Assim, interessa perceber o estado da nuvem de pó criada durante este intervalo de tempo, onde a probabilidade de ignição térmica existe.

Apenas se irão apresentar os resultados da visualização da dispersão para duas granulometrias tendo como objectivo verificar a efetividade da dispersão como função da granulometria e como função do aumento da concentração.

Assim, na Figura 4.5, é possível avaliar a evolução da dispersão do pó de casca de pinheiro bravo em ar para partículas com um diâmetro mediano mássico de 41 μm e para uma concentração de pó de 60 g/m^3 .



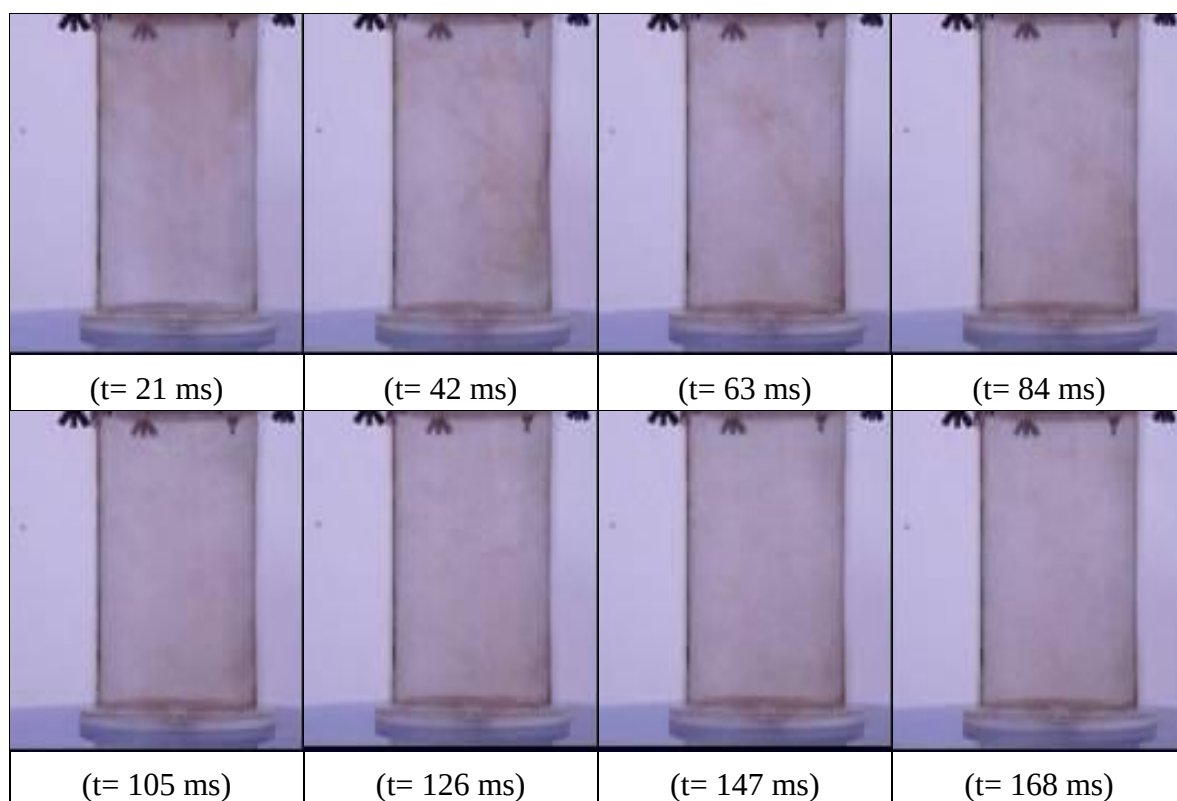
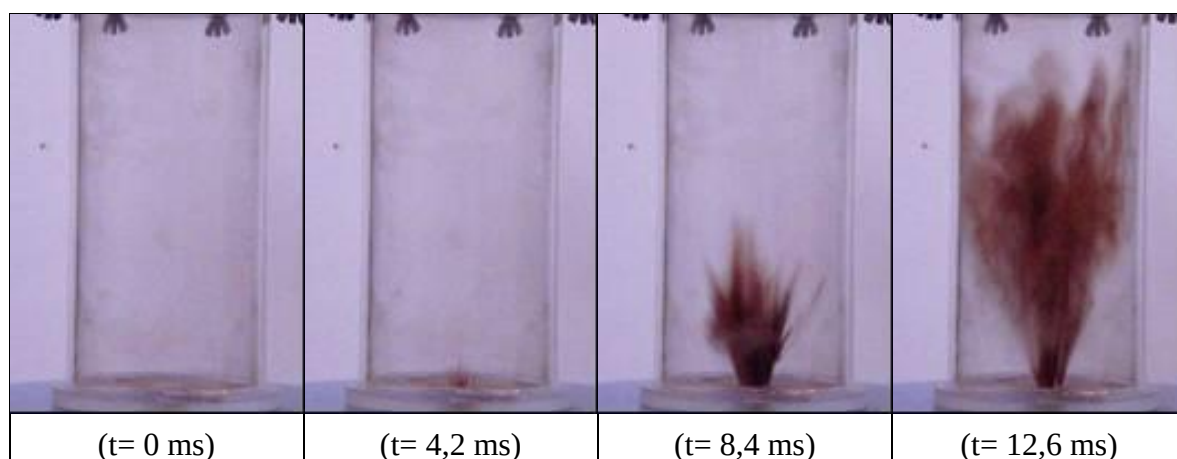


Figura 4. 5 – Ensaio de dispersão de partículas de diâmetro mediano mássico de 41 μm e concentração de 60 g/m^3 .

Pela Figura 4.5 verifica-se que o início da dispersão é feito em cone sendo que a nuvem se torna estável após o período de dispersão do pó, havendo alguma sedimentação das partículas maiores nos instantes subsequentes.

Como se pode verificar a partir dos 42 ms, o pó encontra-se disperso por todo o reator e as imagens que se seguem indicam uma boa dispersão do pó. As últimas imagens captadas parecem indicar a sedimentação de algumas partículas (de maior dimensão) como seria de esperar, no entanto a suspensão mantém-se uniformemente distribuída pelo interior do reator.

Na Figura 4.6, apresenta-se a evolução da dispersão do pó de casca de pinheiro bravo para a mesma granulometria mas agora para uma concentração mais elevada.



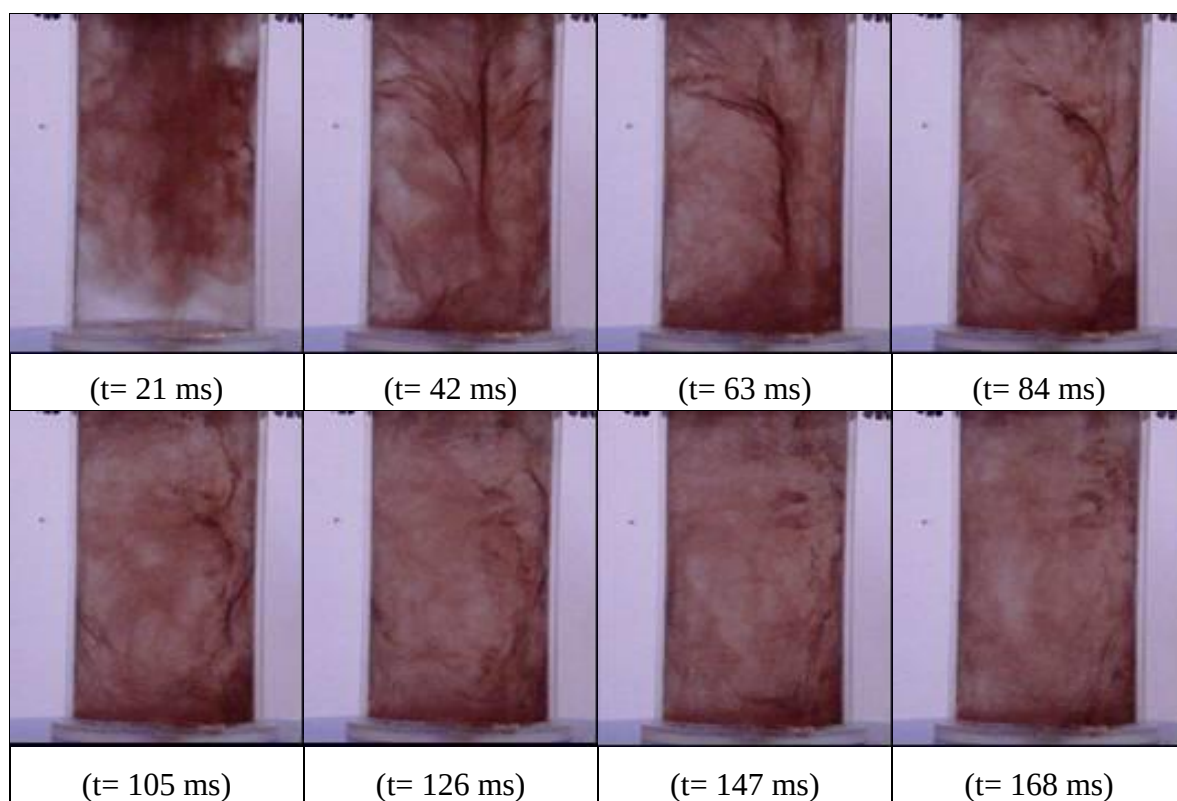


Figura 4. 6 – Ensaio de dispersão partículas de diâmetro mediano mássico de 41 μm e concentração de 400 g/m^3 .

Aumentando a concentração de 60 g/m^3 para 400 g/m^3 , para as partículas de diâmetro mediano mássico de 41 μm , verifica-se que a dispersão é de mais fácil visualização tendo em conta que a massa de pó é superior. O início da dispersão em formato de cone é semelhante à dispersão para uma concentração menor. A partir dos 42 ms verifica-se que a nuvem de pó se encontra uniformemente espalhada no interior do reator em acrílico, apesar de existir uma espécie de vórtice (espécie de mini-tornado) paralelo ao eixo do reator entre os 42 ms a 105 ms. Tendo em conta a alta concentração do pó verifica-se, com o aumento do tempo, mais sedimentação das partículas de maior dimensão na parte inferior do reator podendo-se, no entanto, observar uma suspensão com boas características de dispersão.

Na Figura 4.7 apresenta-se a evolução da dispersão do pó de casca de pinheiro bravo em ar para partículas de diâmetro mediano mássico de 123 μm e concentração de 60 g/m^3 .

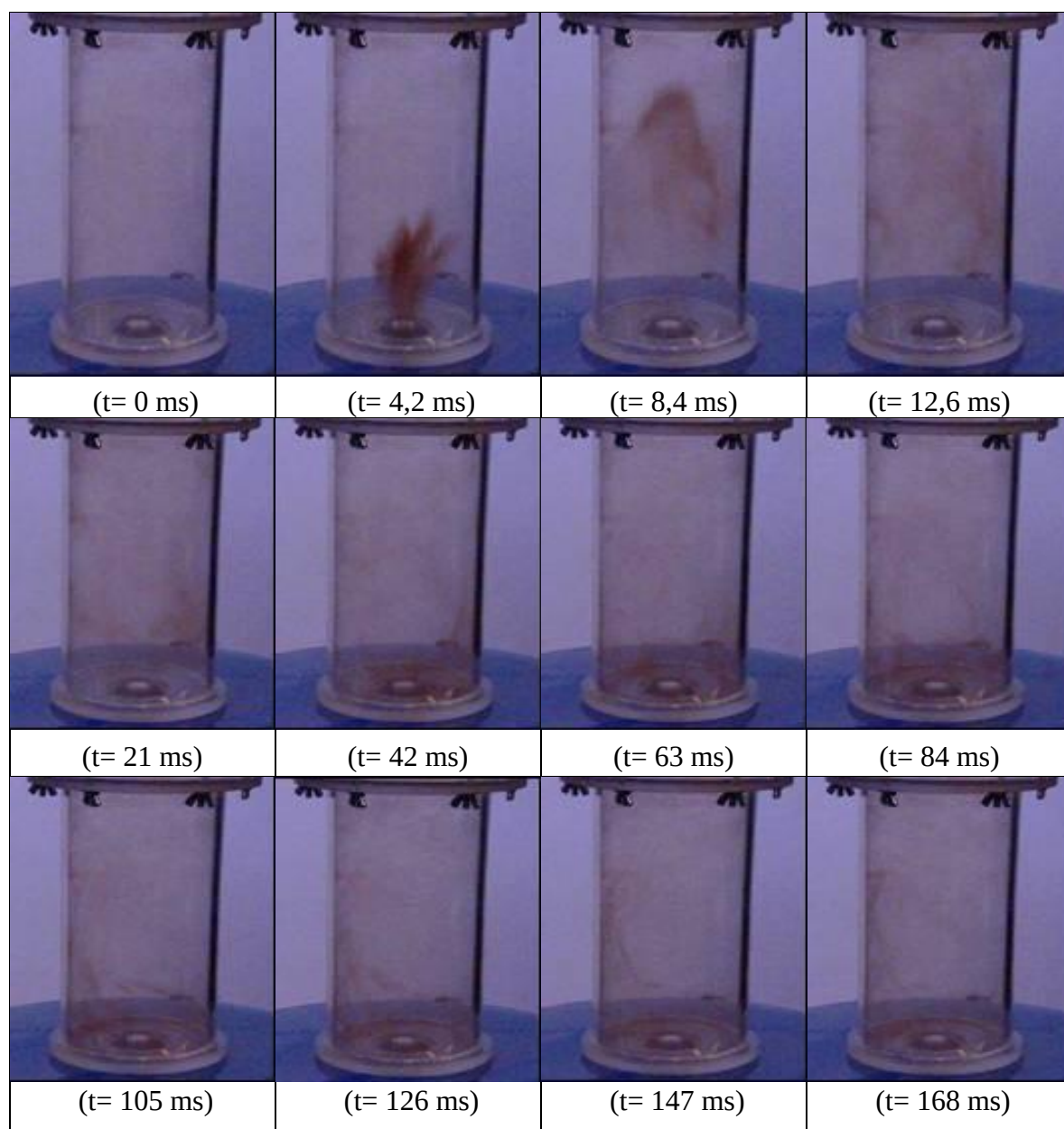


Figura 4. 7 – Ensaio de dispersão partículas de diâmetro mediano mássico de 123 μm e concentração de 60 g/m^3 .

Para este tamanho de partícula de diâmetro mediano mássico de 123 μm detetou-se que a cabeça do dispersor original não funcionava correctamente quando se pretendiam criar suspensões para esta granulometria. Pilão (2003), aquando dos seus trabalhos para a dissertação da tese de doutoramento em que utilizava pó de cortiça em vez de pó de casca de pinheiro bravo, construiu uma nova cabeça para o dispersor que permitisse a correcta dispersão do pó para granulometrias mais elevadas. A configuração da nova cabeça distingue-se da original por ser plana na parte superior e possuir um orifício central de 2 mm de diâmetro ladeado por dois rasgos longitudinais de 2 mm de largura (Pilão, 2003).

Para este par de tamanho e concentração verifica-se que no instante inicial da dispersão, e ao contrário da granulometria anterior, com a cabeça de dispersor original de 9 furos, o cone inicial é mais achatado verificando-se que o pó forma dois tipos de leques. No entanto constata-se que a dispersão torna-se mais uniforme mais cedo, aos 21 ms. Pelo fato da

concentração ser baixa a sedimentação ocorre mas em baixa escala. Mais uma vez se pode observar que a partir dos 40 ms a nuvem de pó se pode considerar uniformemente distribuída pelo reator apesar da ligeira sedimentação que se verifica com o aumento do tempo.

Aumentando a concentração da mistura para 240 g/m^3 a dispersão tem o aspecto do ilustrado na Figura 4.8.

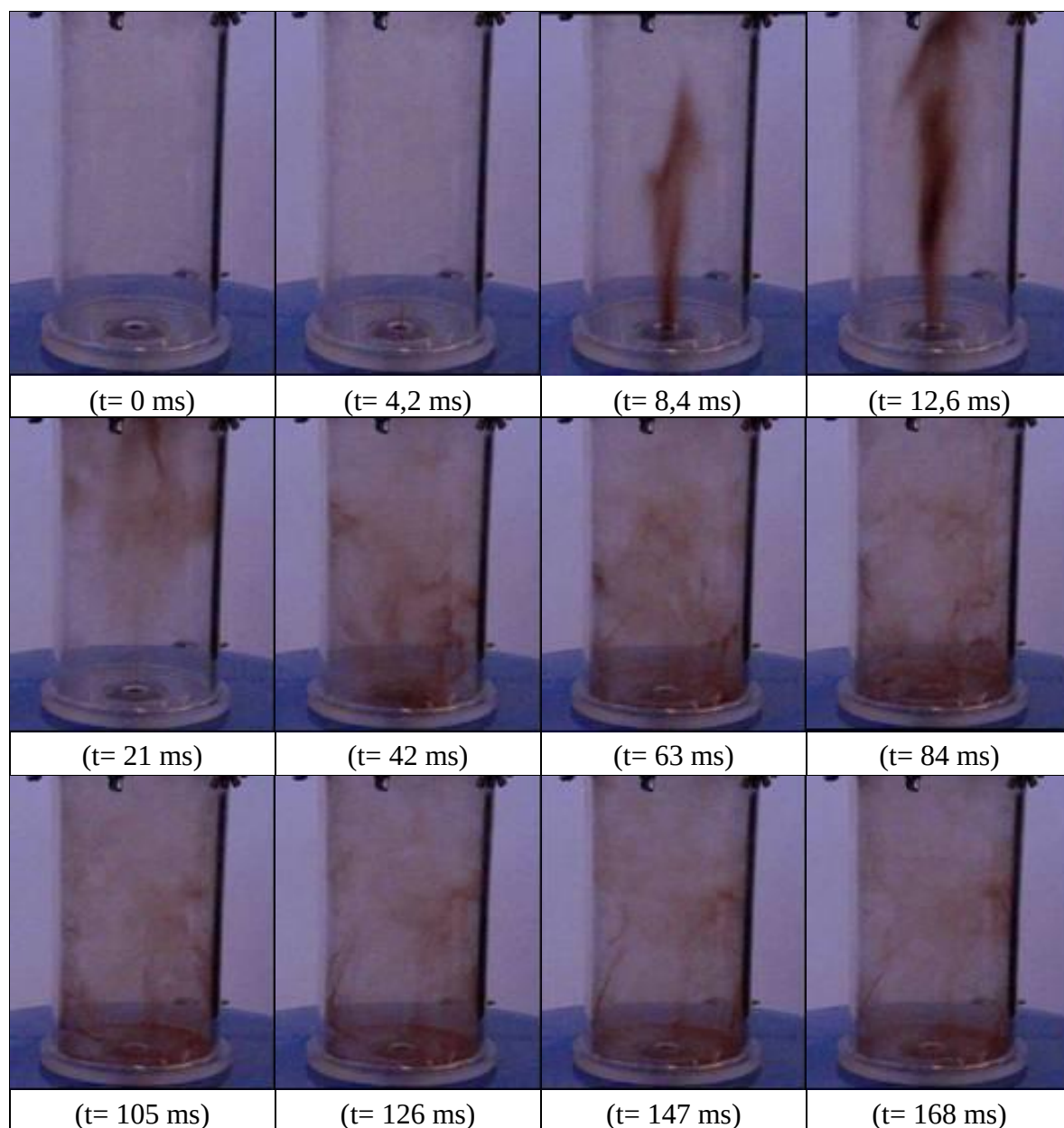


Figura 4. 8 – Ensaio de dispersão partículas de diâmetro mediano mássico de $123 \mu\text{m}$ e concentração de 240 g/m^3 .

Para este par de granulometria e concentração, o início da dispersão é conduzido maioritariamente, pelos rasgos longitudinais, num formato de coluna em leque ao longo do eixo do reator em acrílico que depois se abre, como uma guarda-chuva, acabando por ocupar uniformemente o interior do reator em todo o seu interior. Para esta amostra de pó, de maior diâmetro, a sedimentação do pó começa muito mais cedo e verifica-se em maior escala. No

entanto, a partir dos 42 ms a nuvem criada apresenta-se uniformemente distribuída pelo reator.

Em termos gerais, e dependendo das condições da nuvem (temperatura, concentração e diâmetro das partículas), a probabilidade de ocorrência de ignição positiva pode variar entre os 40 a 130-150 ms após o início da dispersão. As imagens recolhidas durante os vários ensaios de dispersão realizados permitiram verificar que, no intervalo de tempo onde existe probabilidade de ignição, a nuvem de pó apresenta uma boa uniformidade de dispersão uma vez que foi possível observar que a maioria das partículas se mantém em suspensão ocupando todo o reator durante este período de tempo. A sedimentação das partículas de maior dimensão numa mistura heterogénea, como é o caso de uma mistura ar/pó, é inevitável e é um dos motivos pelos quais não é possível reproduzir as características de uma suspensão de pó em ar.

Ignição Térmica do Pó de Casca de Pinheiro Bravo em Ar

5.1 – Introdução

Um aspecto fundamental referente à explosão de misturas de pó em ar diz respeito às situações de ignição espontânea, isto é, casos em que ao invés de existir uma fonte de energia concentrada, a suspensão de pó em ar é colocada como um todo em condições de temperatura tais que, após um pequeno período de incubação da reação, se dará a explosão do pó. Outro aspecto diz respeito às situações de ignição elétrica, ou seja, casos em que a descarga de energia elétrica é capaz de iniciar a reação de explosão de uma suspensão de pó em ar (Pilão, 2003).

Neste capítulo apresentam-se os resultados da determinação experimental da temperatura mínima de ignição térmica, *TMI*, do pó de casca de pinheiro bravo em ar.

No estudo da auto-ignição térmica foram testadas quatro granulometrias de pó diferentes com diâmetros medianos mássicos de 41 μm , 83 μm , 123 μm e 267 μm . A ignição de cada uma destas frações granulométricas foi estudada em função da concentração das amostras e da temperatura inicial, realizando-se ensaios à pressão inicial de 1 atm até concentrações de pó da ordem dos 550 g/m^3 utilizando a fornalha de 1,23 L de capacidade, também conhecida como a fornalha de 1,2 L de US Bureau of Mines (Figuras 3.2 e B.4).

5.1 – Comportamento de ignição térmica

Alguns exemplos típicos representativos da evolução da pressão absoluta com o tempo durante os ensaios de ignição de suspensões de partículas de pó de casca de pinheiro bravo de 123 μm de diâmetro mediano mássico encontram-se nas Figuras 5.1 e 5.2.

A Figura 5.1 apresenta a curva de pressão versus tempo de um ensaio cuja temperatura inicial de 575 °C é inferior à temperatura de ignição do pó para partículas com 123 μm de diâmetro mediano mássico e representa um ensaio para o qual não se verificou rutura do diafragma sendo por isso classificado como ensaio sem ignição, ou ignição negativa.

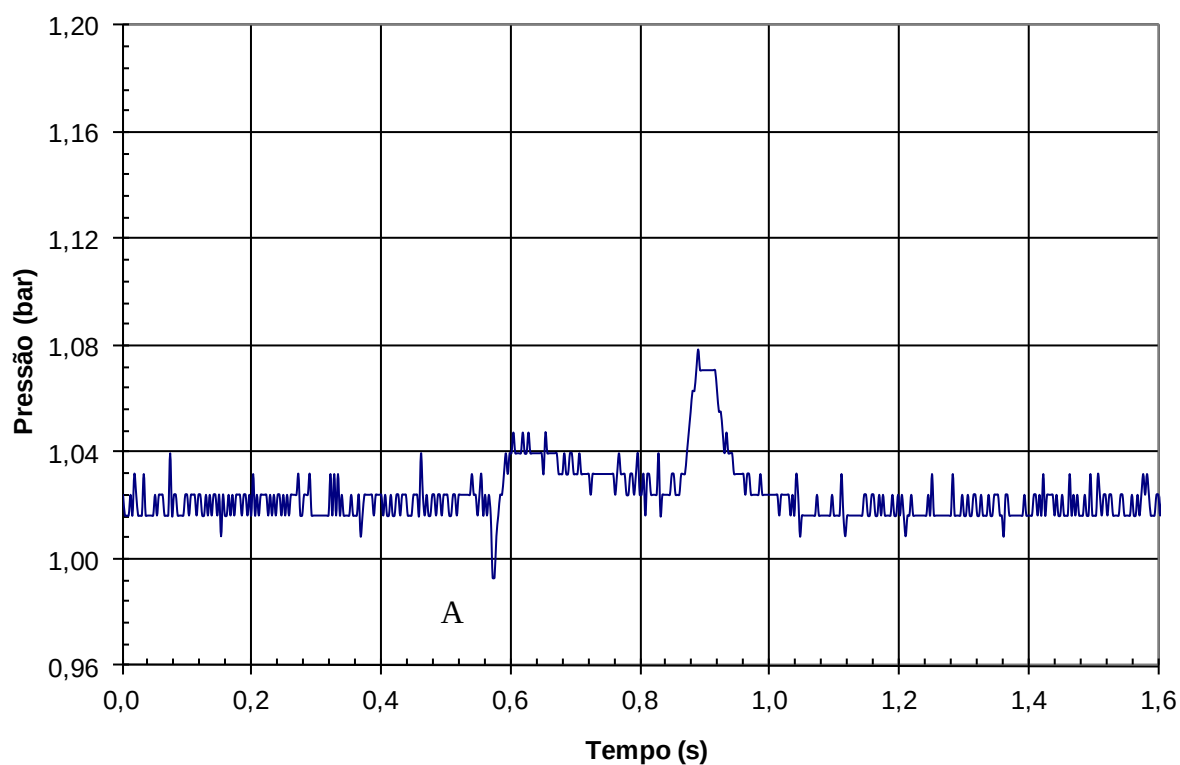


Figura 5. 1 – Evolução da pressão durante um ensaio com ignição negativa a 575 °C, para uma suspensão de 200 g/m³ de partículas com 123 µm de diâmetro mediano mássico.

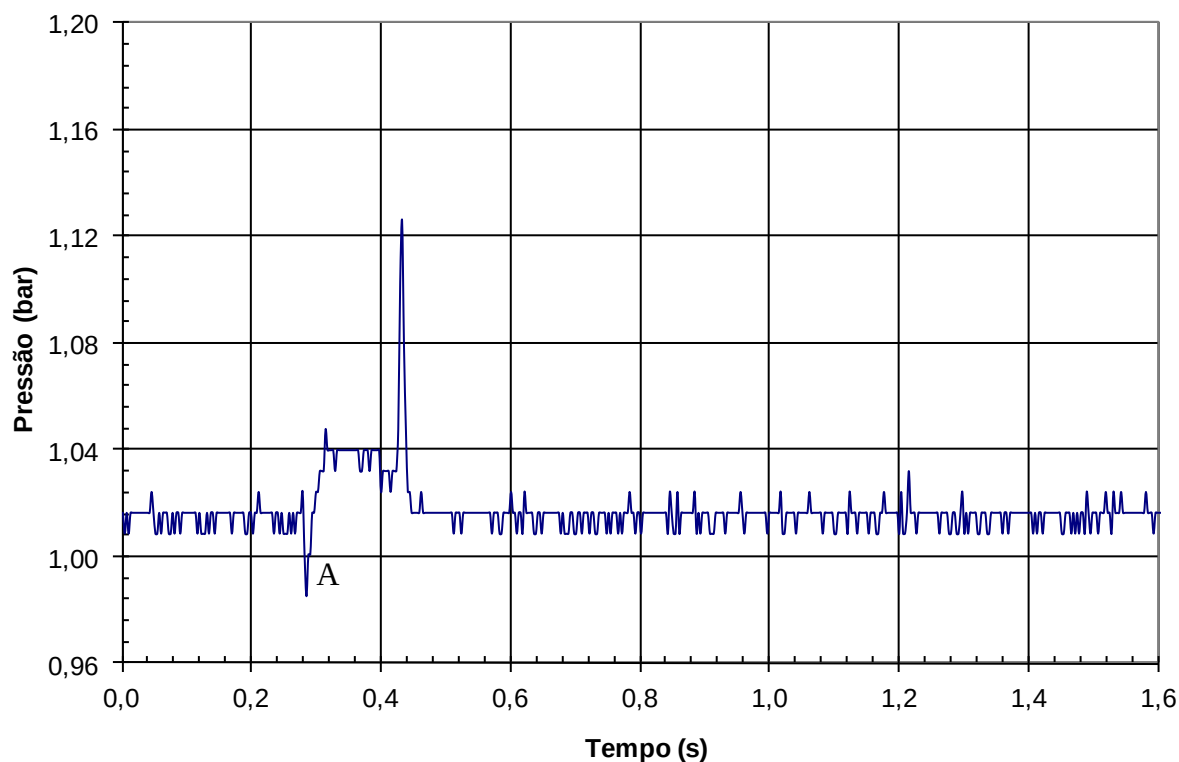


Figura 5. 2 – Evolução da pressão durante um ensaio positivo a 650 °C, para uma suspensão de 200 g/m³ de partículas com 123 µm de diâmetro mediano mássico.

A análise conjunta das Figuras 5.1 e 5.2 permite avaliar o efeito da temperatura no comportamento da ignição, porque a mesma suspensão quando dispersa a uma temperatura inicial superior a 575 °C, neste caso 650 °C, entra em ignição mais cedo e é assinalada pela rutura do diafragma e a simultânea emissão de chama pelo topo da fornalha, ou seja, estamos perante um ensaio com ignição positiva.

Pelas curvas da evolução da pressão absoluta com o tempo pode-se verificar nos instantes iniciais uma ligeira diminuição da pressão, assinalada pela letra A nas Figuras 5.1 e 5.2. Esta diminuição é provocada pelo arrefecimento inicial causado pela massa de pó e ar frio que entram na fornalha mas rapidamente verifica-se o aumento da pressão associado à continuação da injeção do ar de dispersão e ao aquecimento das partículas e do ar. A pressão após dispersão mantém-se mais elevada pelo que é indicativo do excelente isolamento do sistema. O ar de dispersão e o pó não são previamente aquecidos no dispersor.

A explosão das suspensões é assinalada posteriormente pela descida rápida da pressão e a ignição é considerada positiva caso se verifique a rutura do diafragma de fibra de vidro colocado no topo da fornalha e pela emissão simultânea de chama pelo topo da mesma.

Na Figura 5.3 encontra-se representado um ensaio à mesma temperatura que o ensaio representado pela Figura 5.2 (650 °C), mas a uma concentração de pó inferior (163 g/m^3). Como se pode verificar a diminuição da concentração de pó traduziu-se no aumento do tempo de atraso da ignição.

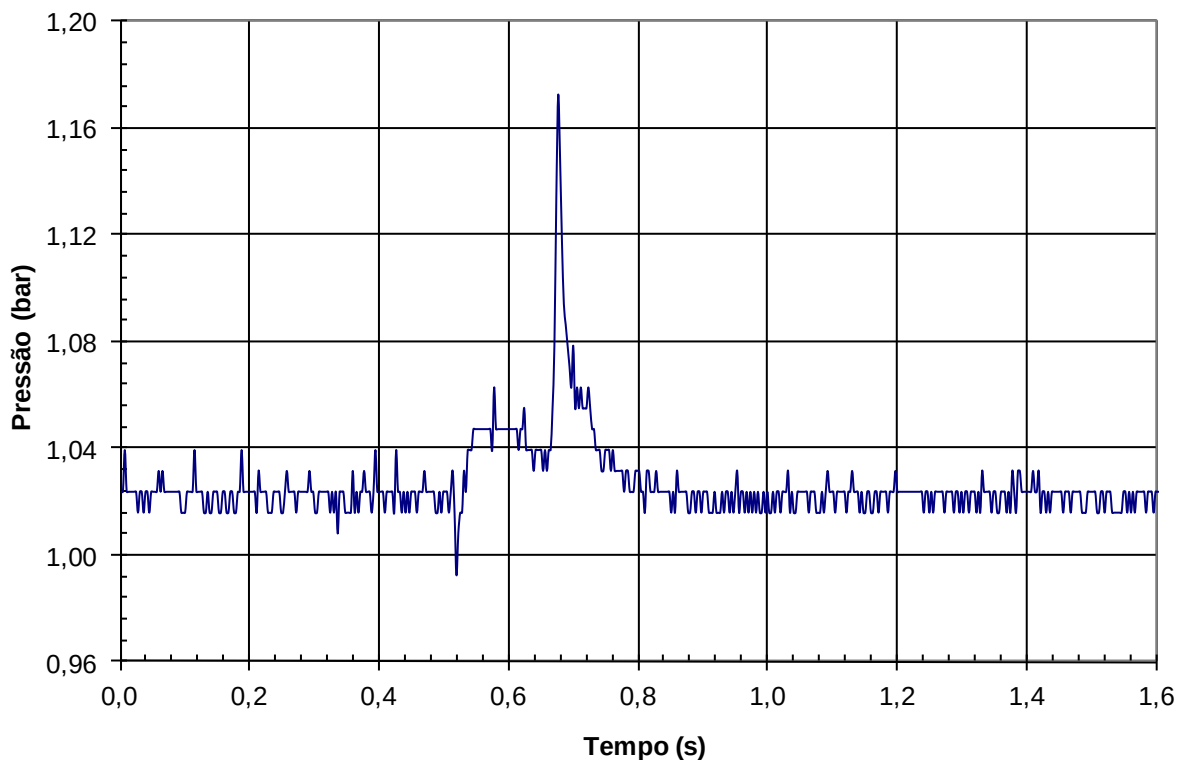


Figura 5. 3 – Evolução da pressão durante um ensaio positivo a 650 °C, para uma suspensão de 163 g/m^3 de partículas com $123 \mu\text{m}$ de diâmetro mediano mássico.

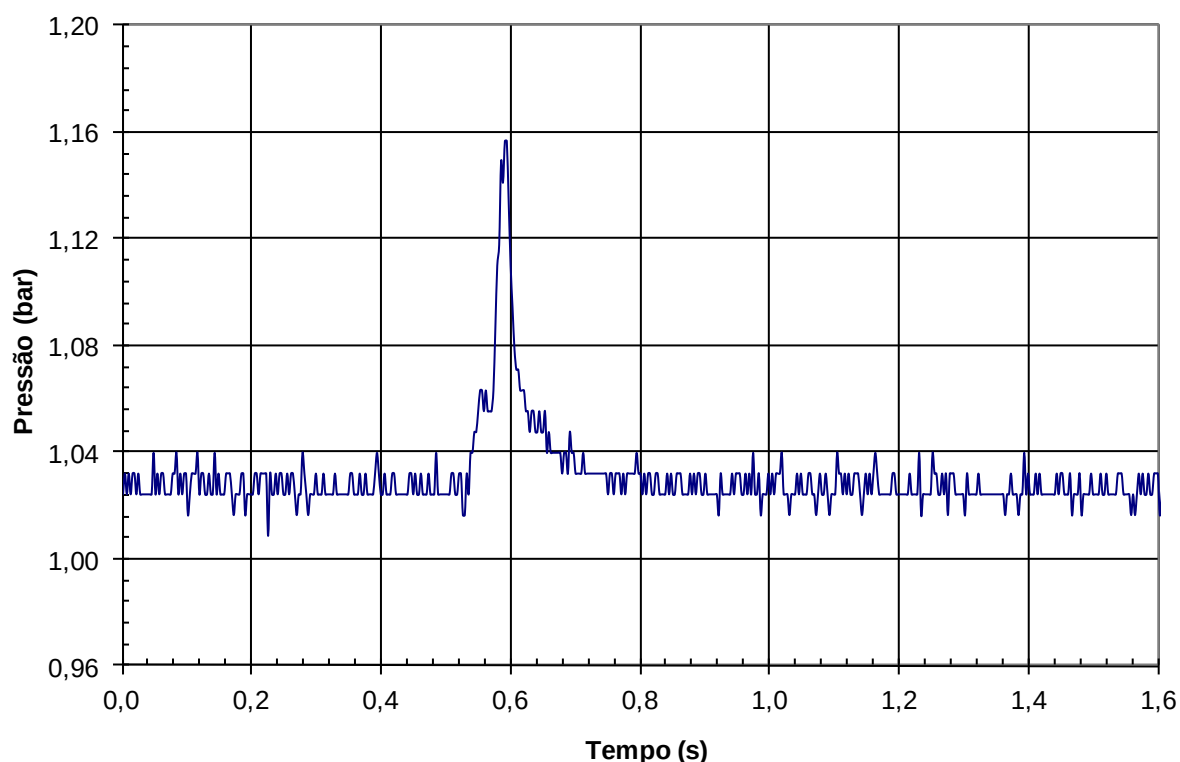


Figura 5. 4 – Evolução da pressão durante um ensaio positivo a 750 °C, para uma suspensão de 75 g/m³ de partículas com 123 µm de diâmetro mediano mássico.

Na Figura 5.4 é representada uma ignição do pó de casca de pinheiro bravo para partículas de diâmetro mediano mássico de 123 µm, mais violenta, a uma temperatura de 750 °C. Observa-se ligeiramente o abaixamento da pressão aquando da injeção do ar e pó na fornalha mas neste caso ocorre imediatamente uma ignição mais violenta, provavelmente antes que as partículas atinjam a temperatura da fornalha (750 °C).

5.2 – Domínios de ignição térmica

Os resultados dos ensaios de auto-ignição térmica realizados com as quatro granulometrias de pó de casca de pinheiro bravo em ar testadas encontram-se representados nas Figuras 5.5 a 5.8.

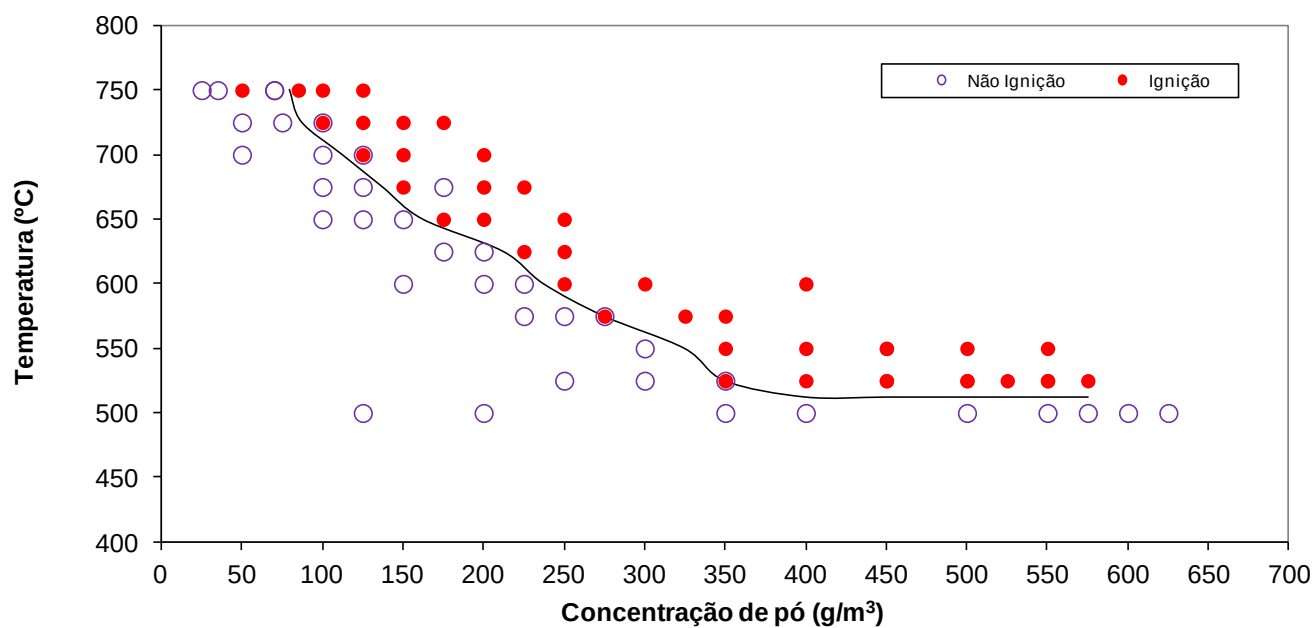


Figura 5. 5 – Ignição térmica de suspensões de pó de casca de pinheiro bravo com 41 µm de diâmetro mediano mássico.

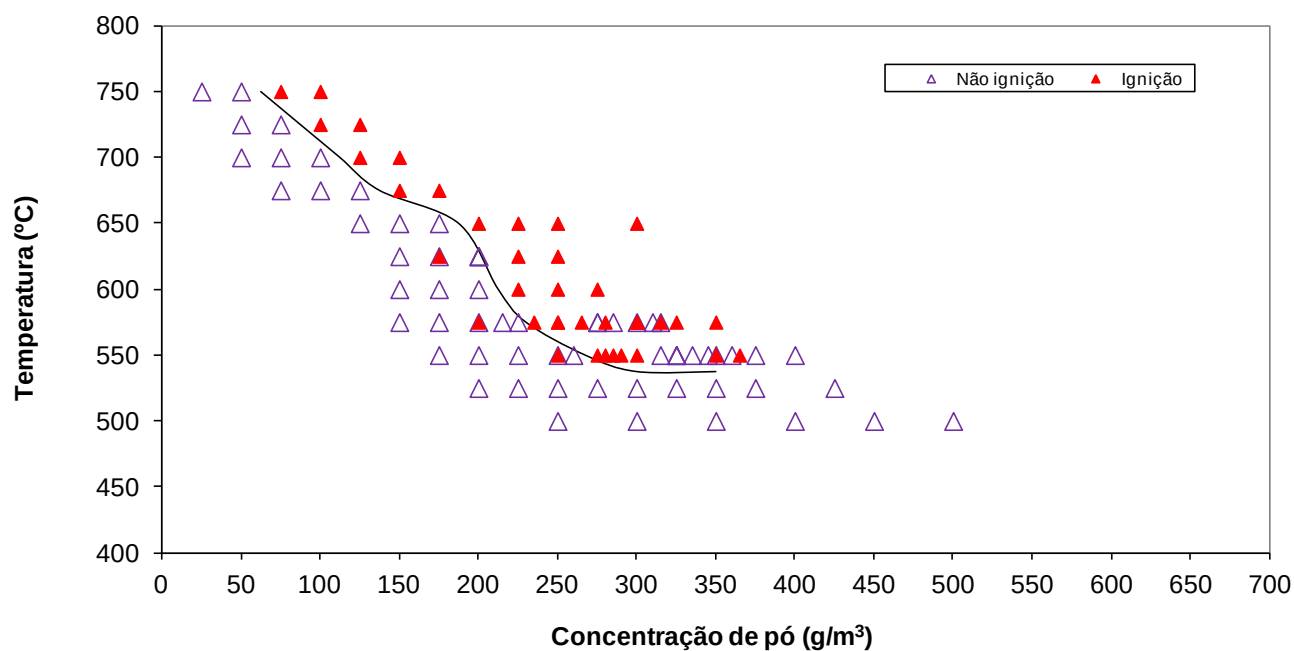


Figura 5. 6 – Ignição térmica de suspensões de pó de casca de pinheiro bravo com 83 µm de diâmetro mediano mássico.

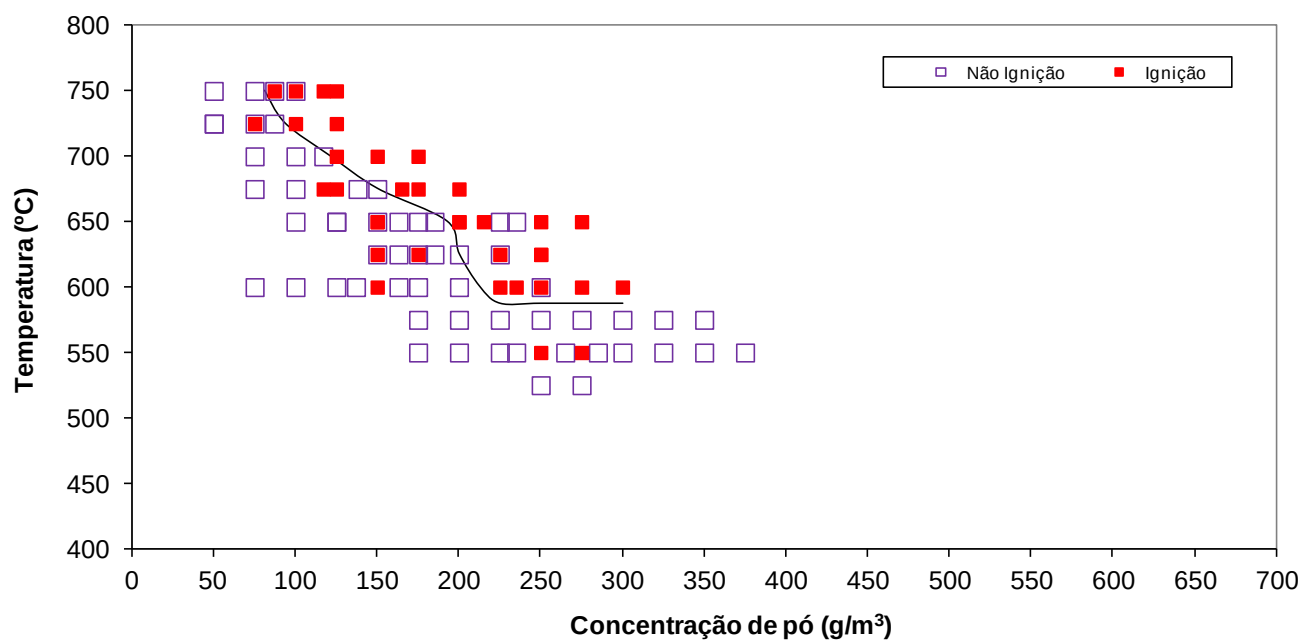


Figura 5. 7 – Ignição térmica de suspensões de pó de casca de pinheiro bravo com 123 µm de diâmetro mediano mássico.

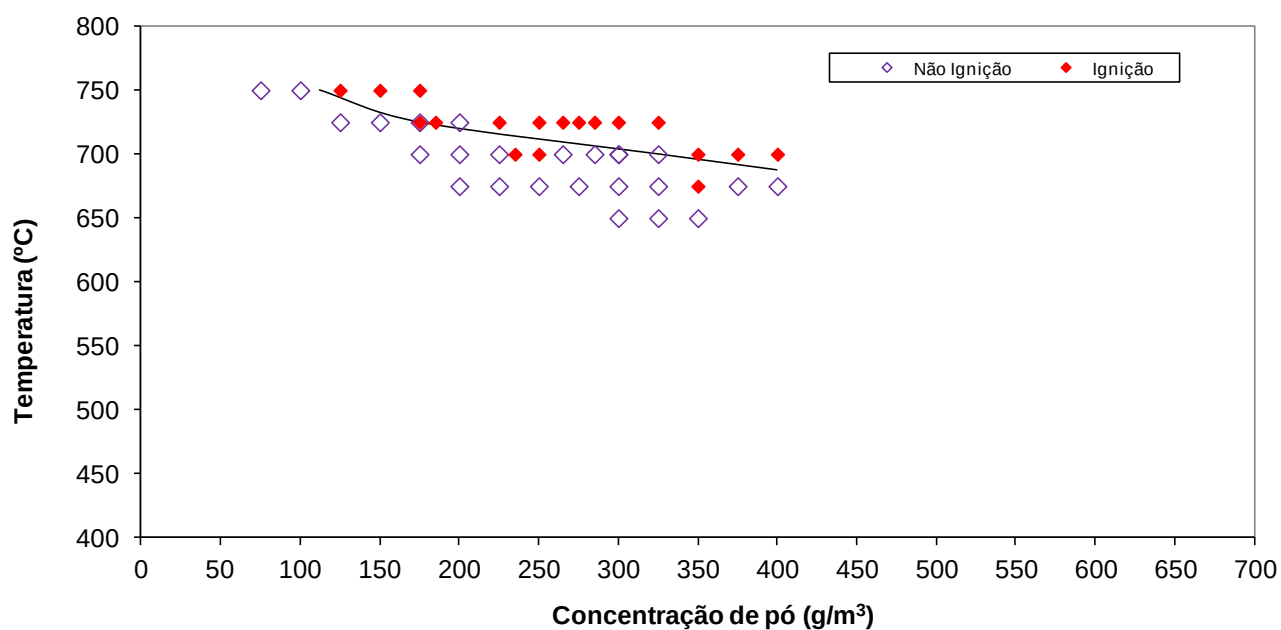


Figura 5. 8 – Ignição térmica de suspensões de pó de casca de pinheiro bravo com 267 µm de diâmetro mediano mássico.

Nas Figuras anteriores os símbolos a cheio correspondem aos ensaios que resultaram em ignição positiva enquanto os símbolos a vazio correspondem aos ensaios em que não resultaram em ignição, para várias temperaturas e várias concentrações nominais de pó de casca de pinheiro bravo. As linhas contínuas representam as fronteiras de auto-ignição térmica que separam a região superior, representativa das condições para as quais o sistema se considera auto-inflamável, da região inferior representativa de sistemas que se encontram a temperaturas inferiores à temperatura mínima de ignição do pó de casca de pinheiro bravo.

Como se pode observar, em todas as Figuras, o comportamento da curva de auto-ignição térmica das quatro granulometrias de pó estudadas é semelhante. Ou seja, a temperatura de auto-ignição é elevada para pequenas concentrações de pó, devido ao facto de nestas concentrações a suspensão das partículas ser rapidamente desvolatilizada (pode ser explicado pelo efeito da área específica da superfície e pela diminuição da distância entre partículas da nuvem de pó) ao mesmo tempo que a concentração dos componentes voláteis atinge o seu limite de concentração mínima de explosão. À medida que a concentração de pó aumenta a temperatura mínima de ignição diminui estabilizando o seu valor para concentrações elevadas de pó. A concentração à qual a curva de auto-ignição estabiliza é função da percentagem de voláteis do pó: para pós mais voláteis o nivelamento da curva começa a concentrações mais baixas enquanto para pós menos voláteis a curva de auto-ignição térmica só estabiliza para altas concentrações (Hertzberg, 1991).

Este comportamento temperatura vs concentração é consistente com a observação prévia da ausência de um limite superior de inflamabilidade para os pós, cuja explicação reside no fato de, para elevadas concentrações, o processo de propagação de chama durante a explosão ser controlado pela velocidade de desvolatilização das partículas. As tendências das curvas de ignição térmica obtidas para as quatro granulometrias do pó de casca de pinheiro bravo estudadas são semelhantes às obtidas para a maioria dos pós carbonosos, agrícolas e plásticos (Conti *et al.*, 1983, Conti e Hertzberg, 1987).

No caso particular das partículas de diâmetro mediano mássico de 41 μm (Figura 5.5) claramente se consegue definir a curva de auto-ignição permitindo definir a temperatura mínima de ignição térmica nos 510 $^{\circ}\text{C}$.

No caso particular das partículas de diâmetro mediano mássico de 83 μm (Figura 5.6), na gama de temperaturas entre os 550 e os 575 $^{\circ}\text{C}$, parece haver alguma dificuldade em definir a concentração a partir da qual a ignição é independente da concentração de pó. Este comportamento pode dever-se ao fato de este pó, em determinadas condições, ser caracterizado por um comportamento bietápico de explosão. Estudos de explosibilidade efectuados com pó de casca de pinheiro bravo em ar realizados por Semenova (2005) identificaram que a propagação de chama durante a explosão de partículas com granulometria superior a um determinado valor se desenvolve num processo bietápico. No referido estudo a transição para explosão bietápica foi identificada em partículas com granulometrias superiores a 104 μm . O comportamento bietápico é caracterizado pelo aparecimento de duas rampas de aumento de pressão, na curva de evolução da pressão de explosão, e de dois picos na curva de evolução da velocidade de aumento de pressão. O primeiro passo deste processo está associado à propagação de chama ascendente e horizontal e o segundo passo, diz respeito à propagação de chama descendente e mais rápida (Semenova, 2005). Este comportamento tem como resultado a possibilidade de, por exemplo, dois ensaios realizados nas mesmas condições terem resultados finais opostos, ou seja, um resultar em explosão e no outro ser impossível a auto sustentação da chama ou, um resultar numa explosão mais violenta que o

outro. O comportamento bietápico tende a desaparecer com o aumento da concentração nominal do pó conforme se pode observar na Figura 5.6. Assim sendo, por questões de segurança, para as partículas de diâmetro mediano mássico de 83 μm a temperatura mínima de ignição foi definida para os 540 °C.

No caso das partículas de diâmetro mediano mássico de 123 μm (Figura 5.7), a dificuldade em definir a concentração a partir da qual a ignição é independente da concentração de pó começou a detetar-se a partir dos 625 °C e alargou-se na gama de temperatura de trabalho. Para esta granulometria foi definida a temperatura mínima de ignição de 580 °C.

No caso das partículas com diâmetro mediano mássico de 267 μm (Figura 5.8) não foi possível realizar o número suficiente de ensaios para a correta definição da curva de auto-ignição térmica. As duas cabeças de dispersor disponíveis e utilizadas não permitiram a dispersão total do pó necessário para criar suspensões com elevadas concentrações de pó (acima dos 350 g/m³). Aliás, já Pilão (2003) detetara este problema.

Os resultados obtidos com os ensaios de ignição térmica, representados pelas Figuras 5.5 a 5.8, permitiram por fim verificar que temperatura mínima de ignição foi aumentando com o tamanho das partículas pelo fato de baixar a taxa de desvolatilização. Conclui-se também que as respetivas curvas de ignição se deslocam para temperaturas superiores com o aumento da granulometria das partículas.

Hertzberg (1991) verificou que existe uma correlação inversa para os vários pós estudados entre a temperatura mínima de ignição e a percentagem presente de voláteis nos pós. A auto-ignição ocorre assim que uma concentração estequiométrica de voláteis é gerada pelos processos de pirólise e desvolatilização. Estes processos são extremamente complexos e envolvem processos de transferência de massa e calor assim como efeitos de histerese pelo que está fora do âmbito deste trabalho considerar estes mecanismos na ignição do pó de casca de pinheiro bravo em ar abrindo-se assim novos caminhos para uma futura investigação.

5.2.1 – Efeito da concentração

A Figura 5.9 resume a relação entre os limites de inflamabilidade ou ignição forçada e a probabilidade de ignição ou auto-ignição para misturas de pó de casca de pinheiro bravo em ar.

A linha a tracejado é a curva de inflamabilidade ou ignição forçada obtida a partir do valor de concentração mínima de explosão, assinalado na figura, de acordo com o publicado por Semenova (2005), curva esta extrapolada com base no referido ponto para temperaturas superiores de acordo com a lei de Burgess-Wheeler (curva B-W) (Conti *et al.*, 1983). Todos os estados do sistema representados por pontos abaixo da curva B-W são não explosivos porque a probabilidade de inflamação é nula.

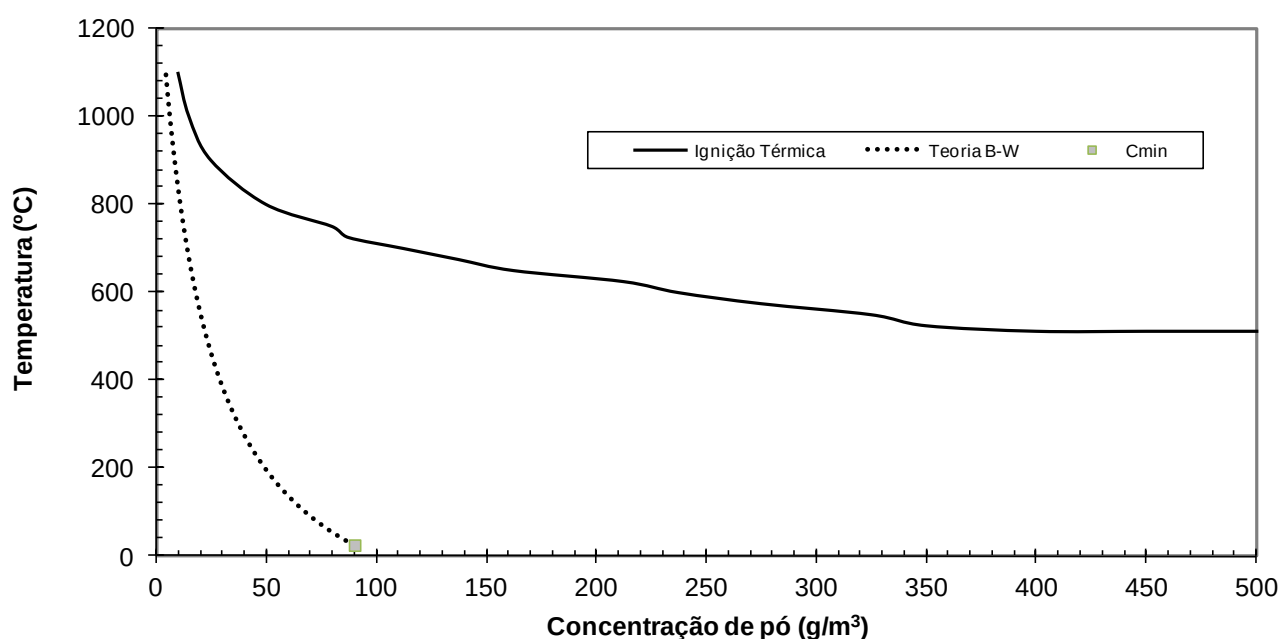


Figura 5.9 – Domínio de inflamabilidade e ignição térmica do pó de casca de pinheiro bravo.

A linha a cheio representa a curva de ignição térmica obtida para a menor granulometria estudada (41 μm). Entre as duas curvas, conforme dito no subcapítulo 2.10.2, a probabilidade de explosão é igual à probabilidade de ignição forçada pelo que a explosão depende da presença de uma fonte de ignição adequada capaz de iniciar uma potencial onda de combustão. Acima desta curva a explosão é certa porque a probabilidade de inflamação e de ignição são unitárias, não sendo necessário uma fonte de ignição exterior porque o sistema entra em ignição espontânea.

As duas curvas, B-W e ignição, aproximam-se uma da outra apenas a elevadas temperaturas onde ocorre ignição assim que a concentração mínima é dispersa.

5.2.2 – Efeito da granulometria

O tamanho das partículas é uma variável importante na determinação da temperatura mínima de ignição térmica. Os resultados dos ensaios realizados com as três menores granulometrias testadas permitem determinar a temperatura mínima de ignição térmica de cada uma como se resume na Figura 5.10.

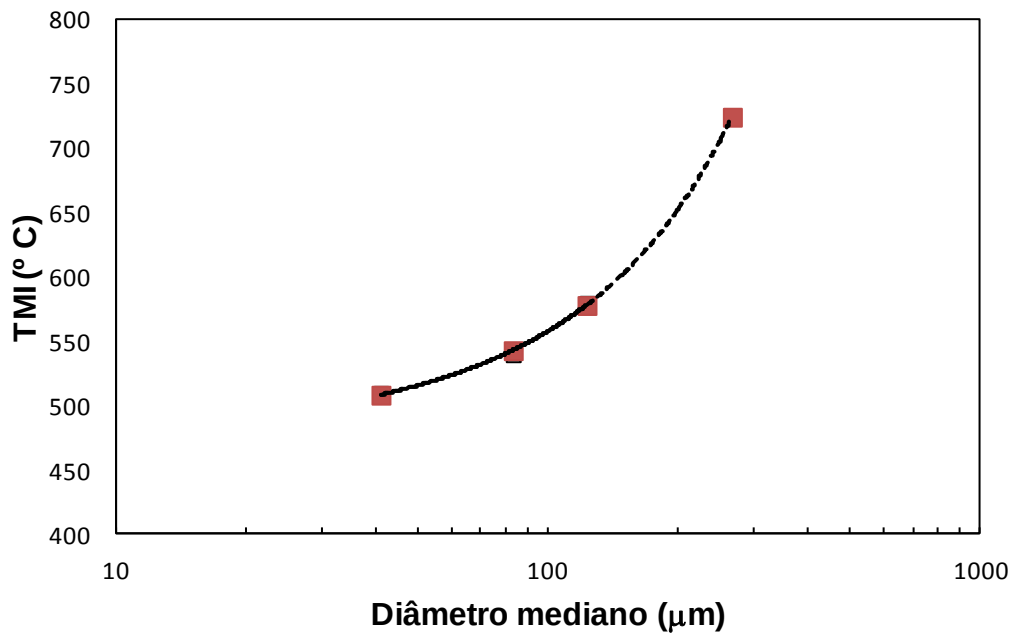


Figura 5. 10 – Efeito da granulometria na temperatura mínima de ignição da casca de pinheiro bravo, traço interrompido evolução extrapolada.

A Figura 5.10 mostra que à medida que o diâmetro da partícula aumenta a temperatura mínima de ignição também aumenta não sendo claro que haja uma estabilização da *TMI* para diâmetros medianos abaixo de 41 μm , ou seja, com os resultados obtidos não é possível identificar com segurança um diâmetro característico abaixo do qual se pode considerar que a *TMI* é independente da granulometria, conforme casos publicados por Hertzberg (1991).

Pela tendência da curva patente na Figura 5.10 é expectável que o diâmetro característico seja próximo da granulometria mais baixa (da ordem dos 50 μm) e que a temperatura mínima de ignição da granulometria superior seja superior a 710 °C. Caso houvesse zona plana na curva presente na Figura 5.10 esta corresponderia a situações em que a quantidade de voláteis gerados era independente da dimensão das partículas e a explosão ocorreria desde que, em fase gasosa, existisse o teor mínimo de voláteis necessários. Nesta situação, o mecanismo que controla a velocidade de propagação da chama é a velocidade de reação química e a velocidade de difusão dos voláteis na mistura em fase gasosa. Para partículas com tamanhos superiores ao diâmetro característico, a velocidade de desvolatilização é o processo controlante da velocidade de propagação de chama na mistura.

Para as partículas de maior dimensão apenas a sua superfície sofre desvolatilização com a passagem da frente de chama, sendo necessário fornecer-se uma maior quantidade de pó a fim de se gerar, em fase gasosa, uma concentração mínima de voláteis. Por outro lado, a sedimentação das partículas mais pesadas também poderá contribuir para a diminuição da concentração em suspensão na altura da ignição (Semenova, 2005).

Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro

6.1 – Ignição térmica

O objetivo deste trabalho consistia na caracterização das condições de auto-ignição térmica de misturas de pó de casca de pinheiro bravo em ar. Em particular, na avaliação que a alteração de fatores como concentração do pó e granulometria das partículas poderiam ter na temperatura mínima de ignição térmica.

Os ensaios de determinação do domínio de auto-ignição térmica, realizados com as várias granulometrias testadas, mostraram que temperatura mínima de ignição foi aumentando com o tamanho das partículas pelo fato de baixar a taxa de desvolatilização. Conclui-se também que as respectivas curvas de ignição se deslocam para temperaturas superiores com o aumento da granulometria das partículas. Conclui-se também que a temperatura de auto-ignição é elevada para pequenas concentrações de pó, devido ao fato de nestas concentrações a suspensão das partículas ser rapidamente desvolatilizada ao mesmo tempo que a concentração dos componentes voláteis atinge o seu limite de concentração mínima de explosão enquanto que à medida que a concentração de pó aumenta a temperatura mínima de ignição diminui estabilizando o seu valor para concentrações elevadas de pó. Com os resultados obtidos não foi possível identificar com segurança um diâmetro característico abaixo do qual se podia considerar que a *TMI* era independente da granulometria, mas é expectável que seja próximo da granulometria mais baixa testada.

A temperatura mínima de ignição para as partículas de diâmetro mediano mássico de 41 μm foi definida nos 510 °C, para as partículas de 83 μm a temperatura mínima de ignição foi definida nos 540 °C, para as partículas de 123 μm a temperatura mínima de ignição foi definida nos 580 °C enquanto que para as partículas de 267 μm não foi possível realizar o número suficiente de ensaios para a correta definição da *TMI*.

6.2 – Sugestões para o trabalho futuro

Como é natural, ao longo dos ensaios da parte experimental desta dissertação foram surgindo limitações no seu avanço e também surgiu o aparecimento de novas ideias para trabalhos futuros de forma a completar este trabalho. Assim, deixam-se aqui algumas sugestões no domínio do aperfeiçoamento tecnológico da instalação experimental e outras sobre trabalho a desenvolver na área das explosões de pós de casca de pinheiro bravo.

6.2.1 – Ajustes tecnológicos

- Adquirir um novo sistema aquisição de dados que permita validar as curvas obtidas com o transdutor utilizado de forma que seja possível a leitura de pressão com uma velocidade de aquisição igual ou inferior a um milissegundo;
- Adquirir um sistema de leitura da temperatura que permita avaliar a evolução da temperatura de explosão do pó como é o caso do pirómetro de infravermelhos;
- Fabrico de novas cabeças para o dispersor com diferente furação;
- Fabrico de um sistema de recolha de amostras de pós durante a pós-ignição para análise dos produtos de combustão;
- Avaliar o efeito da eletricidade estática do pó na sua dispersão.

6.2.2 – Trabalhos a desenvolver

- Realização de ensaios com outras granulometrias de pó de casca de pinheiro bravo, de preferência inferiores a 41 μm , a fim de se determinar o diâmetro característico assim como concluir qual o processo controlador da combustão;
- Realização dos ensaios de ignição térmica na fornalha de 6,8 L para comparação com os ensaios realizados na fornalha de 1,2 L;
- Caracterização da desvolatilização e ignição de suspensões de pós de diferentes cascas de árvores;
- Visualização dos ensaios de ignição térmica com máquina de vídeo de alta velocidade;
- Avaliar as limitações na previsão da temperatura mínima de ignição térmica pelos modelos numéricos teóricos.

Referências e Bibliografia

- Abbasi, T. e Abbasi, S. A., (2007), *Dust explosions – Cases, causes, consequences, and control*, Journal of Hazardous Materials, **140**, 7-44.
- Ali, F. e Lu, L., (2006), *A method to eliminate the effect of radiation on thermocouple performance*, Nuclear Engineering and Design, **237**, 1522-1525.
- Amyotte, P. R., Pegg, M. J., Khan, F. I., Nifuku, M. e Yingxin, T., (2007), *Moderation of dust explosions*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, **20**, 675-687.
- Amyotte, P.R., Chippett, S. e Pegg, M.J., (1989), *Effects of Turbulence on Dust Explosions*, Prog. Energy Combust. Sci., **14**, 293-310.
- ASTM E1491-97, *Standard Test Method for Minimum Autoignition Temperature of Dust Clouds*, American Society for Testing and Materials, Coshohocken, PA, 1996.
- Bartknecht, W., 1981, *Explosions: Course Prevention Protection*, Translation of Second Edition, Springer.
- Beér, J. M., (1960), Journal Institute of Fuel, **35**, 1252.
- Béla Lipták, (2003), *Instrument Engineers' Handbook*, 4th Edition, Process Measurement and Analysis Vol I, CRC Press.
- Bradley, D. e Mitcheson, A., (1976), *Mathematical Solutions for Explosions in Spherical Vessels*, Combustion and Flames, **26**, 201-217.
- Cashdollar, K. L., (1994), *Flammability of Metals and Other Elemental Dust Clouds*, Process Safety Progress, **13**, 139-145.
- Cashdollar, K. L., (1996), *Coal dust explosibility*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 65-76.
- Cashdollar, K.L., (1998), *Dust Explosions Overview*, Proceedings of the International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, Eight International Colloquium on Dust Explosions, Schaumburg, Illinois, 21-25 September, 1-25.
- Chatrathi, K. e Going, J.E., (2000), *Dust deflagration extinction*, Process Safety Progress, **19**, 146-153.
- Coleman, H. W e Steele, W.G., (1999), *Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers*, John Wiley e Sons, 2nd Edition.
- Conti, R. S. e Hertzberg, M., (1987), *Thermal Autoignition Temperatures from the 1.2-L Furnace and Their Use in Evaluating the Explosion Potencial of Dusts*, Industrial Dust Explosions, ASTM STP 958, Kenneth L. Cashdollar and Martin Hertzberg, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 45-59.
- Coelho, P. J. S. M., (2011), *Experimentação e Análise de Incertezas*, Apontamentos aulas MEET 2011/2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

- Conti, R. S., Cashdollar, K. L. e Thomas, R. A., (1993), *Improved 6.8-L Furnace for Measuring the Autoignition Temperatures of Dust Clouds*, Bureau of Mines Report of Investigations, United States Department of the Interior.
- Conti, R. S., Cashdollar, K. L., Hertzberg, M. e Liebman, I., (1983), *Thermal and Electrical Ignitability of Dust Clouds*, Bureau of Mines Report of Investigations, United States Department of the Interior.
- Dieck, R. H., (2002), *Measurement Uncertainty Methods and Applications*, ISA, 3rd Edition.
- Dorset, H. G., Jr., M. Jacobson, F. J. Nagy, e R.P. William, (1960), *Laboratory Equipment and Test Procedures for Evaluating Explosibility of Dusts*, Bureau of Mines RI 564, **21**.
- Eckhoff, R. K., (1975), *Towards Absolute Minimum Ignition Energies for Dust Clouds*, Combustion and Flames, **24**, 53-64.
- Eckhoff, R. K., (1997), *Dust Explosions in the Process Industries*, 2nd Edition, Butterworth.Heinmann, Oxford.
- Eckhoff, R. K., (2003), *Dust Explosions in the Process Industries*, 3rd Edition, Butterworth.Heinmann, Oxford.
- Eckhoff, R. K., (2006), *Differences and similarities of gas and dust explosions: A critical evaluation of the European "ATEX" directives in relation to dusts*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, **19**, 553-560.
- Eckhoff, R. K., (2009), *Understanding dust explosions. The role of powder science and technology*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, **22**, 105-116.
- Enamoto, H. e Matsuda, T., (1986), *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol 4, chap. 19 Solids and Gas-solids flow.
- Foster, D. J., McGrath, I.M., (1960), Combustion Flame, **4**, 191.
- Fradinho D.M., Pascoal Neto C., Evtuguin D., Jorge F.C., Irle M.A., Gil M. e Pedrosa de Jesus J., (2002), *Chemical characterisation of bark and of alkaline bark extracts from maritime pine grown in Portugal*, Industrial Crops and Products, **16**, 23-32.
- Hertzberg, M.,(1991), *Autoignition temperatures for coal particles*, *FUEL*, 1115-1123.
- Hertzberg, M., Conti, R.S. e Cashdollar, K.L., (1984), *Spark Ignition Energies for Dust-Air Mixtures: Temperature and Concentration Dependences*, Twentieth Symposium (International) on Combustion, Combustion Institute, 1681-1690.
- Hertzberg, M. e Cashdollar, K. L., (1987), *Introduction to Dust Explosions*, *Industrial Dust Explosions*, ASTM STP 958, Kenneth L. Cashdollar and Martin hertzberg, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 5-32.
- Hertzberg, M, Cashdollar, K. L. e Zlochower, I.A., (1986), *Flammability Limit Measurements for Dusts and Gases: Ignition Energy Requirements and Pressure Dependences*, Twenty-First Symposium (Internationl) on Combustion, The Combustion Institute, 303-313;
- Hertzberg, M. e Zlochower, I. A., (1990), *Devolatilization Rates and Interparticle Wave Structures During the Combustion of Pulverized Coals and Polymethylmethacrylate*, 24th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1247-1255.

- Hertzberg, M., Cashdollar, K. L e Zlochower, I. A., (1992), *Explosive Dust Cloud Combustion*, 24th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1837-1843.
- Hertzberg, M., Cashdollar, K.L., Daniel, L.N. e Conti, R.S., (1982) *Domains of Flammability and Thermal Ignitability for Pulverized Coals and Other Dusts: Particle Size Dependences and Microscopic Residue Analyses*, Nineteenth Symposium (International) on Combustion, 1169-1180.
- Hertzberg, M., Zlochower, I. A. e Cashdollar, K. L., (1988), *Volatility model for coal dust flame propagation and extinguishment*, Proceedings of the 21st Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 325-333.
- Holman, J. P. (1994), *Experimental Methods for Engineers*, 6th Edition, McGraw-Hill.
- International Standards Organization (ISO), (1985), *Explosion Protection Systems, Part 1. Determination of Explosion Indices of Combustible Dusts in Air*, ISO 6184/1, Geneva.
- Leuschke, G., (1966), Über die Untersuchung brennbarer Stäube auf Brand- und Explosionsgefahren. Staub- und Explosionsgefahren, Staub-Reinhalt, **26**, 49-57.
- Leuschke, G., (1966a), Verfahren zur Ermittlung der Zündtemperaturen aufgewirbelter brennbarer Stäube, BAM Mitteilung Materialprüfung, BAM, Berlin.
- Lewis, B. e Von Elbe, J., (1961), *Combustion, Flames and Explosion of Gases*, Academic Press, New York, 2nd ed.
- Mitsui, R. e Tanaka, T., (1973), *Simple Models of Dust Explosion. Predicting Ignition Temperature and Minimum Explosive Limit in Terms of Particle Size*, Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop., **12**, 384-389.
- Mittal, M. e Guha, B. K., (1997), *Minimum Ignition Temperature of Polyethylene Dust: a Theoretical Model*, Fire Materials, **21**, 169-177.
- Moreira, N. A. R., (2007), *Caracterização da Combustão de Carvões Vegetais em Leito Fluidizado*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Norberg, A., Xu, D. e Zhang, D., (1988), *Powder Ignition Energy Measured Utilizing a New Fluidized Bed Ignition Chamber*, Institute for High Voltage Research, Uppsala, Sweden.
- Nagy, J., Verakis, H.C., (1983), *Development and Control of Dust Explosions*, Marcel Dekker.
- Pilão, R.M., (2003), *Estudo da Explosão do Pó de Cortiça*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Pilão, R.M., Ramalho, E., Pinho, C., (2004), *Influence of initial pressure on the explosibility of cork dust/air mixtures*, J. Loss Prevent. Process Ind., **17**, 87-96.
- Pinho, C. M. C. T., (2005), *Transporte Pneumático*, Sebenta, Faculdade de Engenharia do Porto, Porto.
- Pinto, I., (2004), *Raw material characteristics of maritime pine (Pinus pinaster Ait.) and their influence on simulated sawing yield*, Tese de Doutoramento, Universidade Tecnológica de Helsínquia.

Semenova, O., (2005), *Estudo da Explosão de Casca de Pinheiro Bravo*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia do Porto, Porto.

Tyler, B. J., (1987), Fire Research Station, Report No. F3/2/347.

Wiemann, W., (1987), *Influence of Temperature and Pressure on the Explosion Characteristics of Dust/Air and Dust/Air/Inert Gas Mixtures*, Industrial Dust Explosions, ASTM STP 958, Kenneth L. Cashdollar and Martin hertzberg, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 33-44.

ANEXO A: Incerteza das Leituras Experimentais

A.1 – Introdução

A análise de incertezas é uma matéria que não sendo difícil exige alguma preparação prévia e sobretudo alguma prática, até se poder aplicar com algum à-vontade. Para se realizar esta análise foi pois necessário consultar literatura específica, como sejam Coleman e Steele (1999), Dieck (2002), Béla Lipták (2003) e Holman (1994), assim como outros documentos que se debruçavam sobre a aplicação da análise de incertezas a problemas semelhantes ou sintetizavam esta matéria tendo em vista reduzir o tempo de aprendizagem, como sejam as teses de doutoramento de Pilão (2003), Moreira (2007) e Semenova (2005) e por fim os apontamentos teóricos de Coelho (2011).

Tendo em conta as referências bibliográficas sobre a análise das incertezas, a equação que permite determinar a incerteza de um resultado com dado nível de confiança de usualmente 95%, resultante da aplicação do método da raiz quadrada da soma dos quadrados, é a seguinte:

$$U_x = \sqrt{B_x^2 + P_x^2} \quad (\text{A.1})$$

em que U_x , B_x e P_x representam respetivamente, a incerteza global associada à medição da grandeza x , a incerteza sistemática associada à medição da grandeza x e a incerteza aleatória associada à medição da grandeza x .

Numa situação experimental, como normalmente não se conhece o valor real de uma dada variável, X_{real} , é comum fazer-se:

$$X_{\text{real}} = X_{\text{medido}} \pm U_x \quad (\text{A.2})$$

onde X_{medido} é o valor médio das N leituras ou a própria leitura se $N = 1$, e U_x é a incerteza em X que corresponde à estimativa dos efeitos da combinação dos erros sistemáticos B_x , e aleatórios P_x , com um dado grau de confiança, normalmente 95%.

O erro sistemático é um erro fixo que pode ser reduzido através de calibração enquanto o erro aleatório é um erro variável que pode ser reduzido pelo recurso a múltiplas leituras. A menor incerteza sistemática será a maior entre aquela associada ao padrão de calibração e aquela proveniente da resolução do instrumento.

Assim as equações de análise de incerteza recomendadas, para amostras elevadas e 95 % de confiança, são as equações A.1, A.3 e A.4:

$$B_x^2 = \sum_{i=1}^j \theta_i^2 B_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{j-1} \sum_{k=i+1}^j \theta_i \theta_k B_{ik} \quad (\text{A.3})$$

$$P_x^2 = \sum_{i=1}^j \theta_i^2 P_i^2 \quad (\text{A.4})$$

(* assumindo incertezas aleatórias não correlacionadas)

onde B_i e P_i são as incertezas sistemáticas e aleatórias da variável X_i , respetivamente, B_{ik} é um estimador da covariância para os erros sistemáticos em X_i e X_k , e $\theta_i = \frac{\partial r}{\partial X_i}$, o coeficiente de sensibilidade absoluta.

As fontes da incerteza sistemática mais comuns na medição de uma variável são na referência (padrão) utilizada no processo de calibração do equipamento de medida e na aquisição dos valores. A fonte da incerteza aleatória está associada a causas que não se conhecem e que são responsáveis por pequenas e irregulares variações temporais nas medições realizadas.

A.1.1 – Erro Sistemático

Cada sistema de medida usado para determinar o valor de uma variável individual é influenciado pelos erros sistemáticos provenientes dos erros elementares das fontes. Estes erros são estimados e combinados, usando o método da raiz quadrada da soma dos quadrados, para formar uma estimativa do limite do erro sistemático para cada variável medida. Assim,

$$B_X = \left[(B_X)_1^2 + (B_X)_2^2 + \dots + (B_X)_M^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.5})$$

sendo M os erros sistemáticos elementares que afetam a leitura da variável X .

A.1.2 – Erro de Precisão

A incerteza devida ao erro de precisão numa medida pode ser determinada usando o limite de precisão $P_x = tS_x$, definido como,

$$P_x = tS_x = t \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.6})$$

onde S_x é o desvio padrão da amostra com N leituras, t é o valor do fator de expansão retirado da distribuição de *Student* com um determinado grau de confiança (usualmente 95%) e $N-2$ graus de liberdade e $\bar{X}$ é a média da amostra dada por,

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (\text{A.7})$$

onde a incerteza aleatória do valor médio de uma amostra é dado por,

$$P_{\bar{X}_i} = t \frac{S_{X_i}}{\sqrt{N}} \quad (\text{A.8})$$

Para uma leitura isolada, $P_{\bar{X}_i}$, terá de ser estimado ou estar disponível de leituras prévias da variável. Assim o intervalo $\pm P_{\bar{X}_i}$ ($P_{\bar{X}_i} = t \frac{S_{X_i}}{\sqrt{N}}$) à volta da leitura X contém o valor médio da variável medida com 95% de confiança ($t = 2$ para $N \geq 10$).

Sempre que se verifique que o erro de precisão de uma variável é causado por várias fontes elementares, estes devem ser combinados utilizando o método da raiz quadrada da soma dos quadrados a fim de se obter o limite de precisão da variável em causa.

A.1.3 – Análise Geral da Incerteza

A análise geral de incertezas é realizada na fase inicial do projeto, quando a informação sobre as variáveis a medir é limitada, não se fazendo a distinção entre erros sistemáticos e aleatórios e supondo que não existem erros correlacionados. Embora seja uma abordagem mais simples é contudo muito importante para a seleção de metodologias experimentais e equipamentos com que se irão realizar as futuras experiências, para que o erro inerente aos resultados finais não se venha a revelar uma desagradável surpresa.

Quando um resultado experimental r é função de J variáveis X_i , temos a equação de redução de dados,

$$r = r(X_1, X_2, \dots, X_J) \quad (\text{A.9})$$

Sendo a incerteza do resultado r , numa abordagem através da análise geral de incertezas, dada por,

$$U_r = \left[\left(\frac{\partial r}{\partial X_1} U_{X_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial X_2} U_{X_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial r}{\partial X_J} U_J \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.10})$$

sendo,

$$U_{X_i} = \left[B_{X_i}^2 + P_{X_i}^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.11})$$

onde B_X e P_X são os limites dos erros sistemáticos e de precisão associados a cada uma das variáveis X_i utilizadas no cálculo do resultado experimental r . Nesta fase o limite do erro, U_{X_i} , associado a um instrumento deve ser estimado como sendo metade da menor divisão da escala combinada com a incerteza do instrumento dada pelo fabricante e pode ser interpretada como a incerteza mínima que pode ser alcançada com uma determinada estratégia de teste.

A.2 – Incerteza na Leitura da Temperatura

Para a leitura da temperatura será utilizado um termopar tipo K. O fabricante indica um erro máximo na leitura da temperatura de 0,75 % do valor lido (B_S).

O sistema de aquisição de dados utilizado consta de uma placa de aquisição (Advantech PCI-1710HG) com sistema de conversão analógico/digital de 12 bits de resolução e gama de 0 a 10 Volts. A esta placa encontra-se ligada uma placa expansora (Advantech PCLD-8710) de 16 canais a funcionar com um ganho de 1 à qual se encontram ligados os termopares tipo K cujo sinal é enviado à placa Advantech PCI-1710HG. A exatidão fornecida pelo fabricante para a placa de aquisição de sinal usada (Advantech PCI-1710HG) apresenta-se na Tabela A.1. Na mesma tabela são apresentados os erros sistemáticos de aquisição B_{aq} e de conversão analógico-digital $B_{A/D}$, ambos em milivolt.

Tabela A. 1 – Erros sistemáticos de aquisição e de conversão A/D

Placa	Resolução (bits)	Gama (V)	Exactidão ⁽¹⁾ (% máx. escala)	Resolução (mV)	$B_{A/D}$ (mV)	B_{aq} (mV)
PCI-1710HG	12	0-0,1	0,2	0,024	0,012	0,2

(1) Dados do fabricante

A resolução em milivolt corresponde à distribuição da gama de tensões analógicas que se está a medir pelas 2^{12} posições digitais, correspondentes aos 12 bits. Para a gama 0-0,1 V, por exemplo, tem-se a seguinte resolução:

$$1LSB = \frac{0,1}{2^{12}} = 24,4 \times 10^{-3} \text{ Volt} \quad (\text{A.12})$$

O valor de $B_{A/D}$ será metade da resolução. O erro sistemático de aquisição B_{aq} obtém-se da multiplicação do erro indicado pelo fabricante pelo valor máximo da escala/gama utilizada.

A.2.1 – Limite do Erro Sistemático

Na leitura da temperatura não se terá em conta o erro sistemático introduzido pela radiação no termopar. Contudo, dado o ar dentro da fornalha estar estagnado, é de esperar que a temperatura deste seja muito semelhante à temperatura das paredes pelo que este efeito não será significativo. Para mais detalhe sobre como eliminar o efeito da radiação no termopar consultar o artigo de Ali e Lu (2006).

Assim, o limite do erro sistemático na leitura da temperatura será dado por,

$$B_T = \left[B_S^2 + B_{A/D}^2 + B_{aq}^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.13})$$

onde,

B_S = erro sistemático da sonda de medida de temperatura;

$B_{A/D}$ = erro sistemático introduzido pelo sistema de aquisição de dados durante a conversão;

B_{aq} = erro sistemático da aquisição.

Assim, o limite do erro sistemático para as três leituras da temperatura dos perfis, em termos percentuais, será de,

Tabela A. 2 – Incerteza associada à medição da temperatura

T (°C)	B_S (°C)	$B_{A/D}$ (°C)	B_{aq} (°C)	B_T (°C)	B_T/T (%)
400	3,00	0,298	4,878	5,734	1,43
500	3,75	0,298	4,878	6,160	1,23
600	4,50	0,298	4,878	6,643	1,11

A.2.2 – Limite do erro precisão

Para uma amostra de 60 leituras, a Tabela A.3 mostra a incerteza aleatória de T . Nestas condições *t-student* assume o valor de 2 e o limite de precisão para a leitura da temperatura será de,

Tabela A. 3 – Limite de precisão para a leitura da temperatura

T (°C)	$S_T/N^{1/2}$ (°C)	P_T (°C)	P_T/T (%)
400	0,399	0,798	0,200
500	0,184	0,368	0,074
600	0,142	0,284	0,047

A.2.3 – Incerteza global

A incerteza na leitura da temperatura é determinada por,

$$U_T = \left[B_T^2 + P_T^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.14})$$

Substituindo, obtém-se o seguinte valor,

Tabela A. 4 – Incerteza total na leitura da temperatura

T (°C)	B_T/T (%)	P_T/T (%)	U_T/T (%)
400	1,43	0,200	1,45
500	1,23	0,074	1,23
600	1,11	0,047	1,11

A.3 – Incerteza na Leitura da Pressão

O sistema de aquisição utilizado consta de uma placa de aquisição (DAS1600) com sistema de conversão analógico/digital de 12 bits de resolução e gama de 1 a 10 V. A esta placa encontra-se ligada uma placa expansora de 16 canais (EXP-16A) a funcionar com ganho de 1 à qual se encontra ligado o transdutor de pressão cujo sinal depois é enviado à placa DAS1600. O fabricante indica um erro sistemático de 0,01% do fim de escala $\pm 1\text{LSB}$ para a placa de aquisição de dados.

A exatidão fornecida pelo fabricante para a placa de aquisição de sinal usada (DAS1600) apresenta-se na Tabela A.5. Na mesma tabela são apresentados os erros sistemáticos de aquisição B_{aq} e de conversão analógico-digital $B_{A/D}$, ambos em milivolt.

Tabela A. 5 – Erros sistemáticos de aquisição e de conversão A/D

Placa	Resolução (bits)	Gama (V)	Exactidão ⁽¹⁾ (% máx. escala)	Resolução (mV)	$B_{A/D}$ (mV)	B_{aq} (mV)
DAS 1600	12	0-10	0,01	2,44	1,22	1

(1) Dados do fabricante

A resolução em milivolt corresponde à distribuição da gama de tensões analógicas que se está a medir pelas 2^{12} posições digitais, correspondentes aos 12 bits. Para a gama 0-10 V, por exemplo, tem-se a seguinte resolução:

$$1LSB = \frac{10}{2^{12}} = 2,44 \times 10^{-3} \text{ Volt} \quad (\text{A.15})$$

O valor de $B_{A/D}$ será metade da resolução. O erro sistemático de aquisição B_{aq} obtém-se da multiplicação do erro indicado pelo fabricante pelo valor máximo da escala/gama utilizada.

A pressão de explosão é lida com um transdutor de pressão de membrana piezoeléctrico, com uma saída de 0 a 10 V. O fabricante indica um erro sistemático de 0,5 % máxima do valor máximo da escala para o transdutor de pressão. Sendo a pressão P , relacionada com a tensão V , por uma expressão do tipo $P = a + bV$, a incerteza na leitura da pressão dada por,

$$U_P = \left[\left(\frac{\partial P}{\partial V} U_V \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.16})$$

sendo a incerteza da leitura da tensão U_V , dada por,

$$U_V = \left[B_V^2 + R_V^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.17})$$

onde B_V e P_V são os limites dos erros sistemáticos e de precisão associados à leitura da tensão.

A.3.1 – Limite do Erro Sistemático

O limite do erro sistemático para a leitura da tensão será dado por,

$$B_V = \left[B_r^2 + B_{A/D}^2 + B_{aq}^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.18})$$

onde,

B_r = erro fixo do transdutor;

$B_{A/D}$ = erro sistemático introduzido pelo sistema de aquisição de dados durante a conversão;

B_{aq} = erro sistemático da aquisição.

O limite do erro sistemático na leitura da tensão será dado por,

$$B_V = \left[(0,05)^2 + \left(\frac{10}{2^{13}} \right)^2 + \left(0,001 + \frac{10}{2^{13}} \right)^2 \right]^{1/2} = 0,050 \text{ volt} \quad (\text{A.19})$$

Pois os erros são todos função de um valor de fim de escala, neste caso 10 volt.

A.3.2 – Limite do Erro de Precisão

Sendo a tensão o valor médio de uma amostra com 5 leituras, obteve-se para o índice de precisão S_x , o valor médio de 2,63 mV. Nestas condições t assume o valor de 2,776 e o limite de precisão para a leitura da tensão é de,

$$R_V = 2,776 \times 2,63 \times 10^{-3} = 0,0073 \text{ volt} \quad (\text{A.20})$$

A.3.3 – Incerteza Total

Fazendo as substituições necessárias obtém-se para a incerteza na leitura da tensão o seguinte valor

$$U_V = \left[(0,05)^2 + \left(\frac{10}{2^{13}} \right)^2 + \left(0,001 + \frac{10}{2^{13}} \right)^2 + 0,0073^2 \right]^{1/2} = 0,051 \text{ volt} \quad (\text{A.21})$$

e sendo a tensão relacionada com a pressão pela expressão, $P = 1,6 \times V$, no caso do transdutor de 0-16 bar, obtém-se para a incerteza na leitura da pressão a seguinte expressão,

$$U_P = \left[(1,6 \times U_V)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.22})$$

Dando origem a uma incerteza relativa, U_P/P , que diminui com o aumento da pressão desde um valor de 8 % para uma pressão de um bar até 0,5 % para uma pressão de 16 bar, conforme se mostra na Figura A.1.

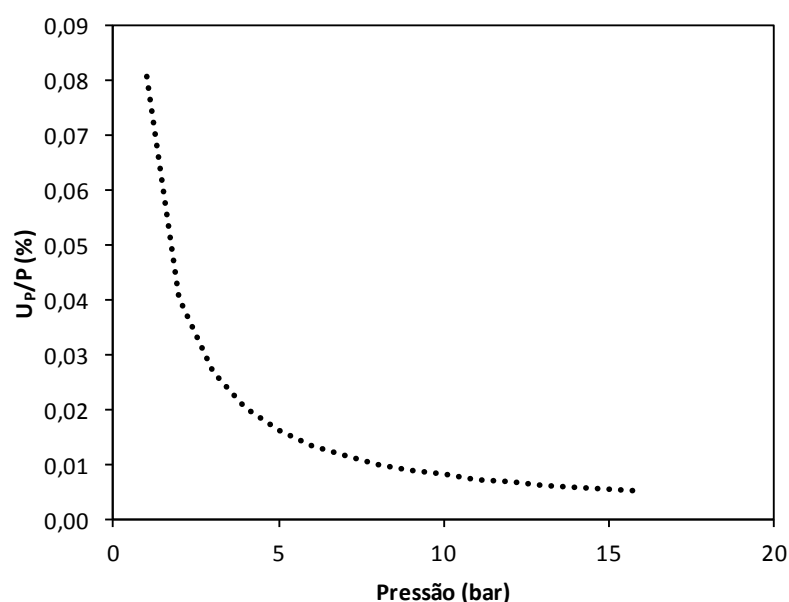


Figura A. 1 – Variação da incerteza na leitura da pressão.

A.4 – Incerteza na Determinação do Volume da Fornalha de 1,2 L

O volume da fornalha (reator cerâmico) foi medido por recurso à medição da massa de água que estava contida no seu interior. A massa de água foi pesada com uma balança cujo erro sistemático indicado pelo fabricante é de 20 g. Foram realizados quatro ensaios tendo-se obtido os seguintes valores: 1,28 kg, 1,30 kg, 1,28 kg e 1,30 kg. Assim, o valor médio da massa de água é dado por,

$$\bar{m} = \frac{1,28 + 1,30 + 1,28 + 1,30}{4} = 1,29 \text{ kg} \quad (\text{A.23})$$

e o limite do erro de precisão associado à sua determinação por,

$$P_x = tS_x = 3,182 \times \left[\frac{2 \times (1,28 - 1,287)^2 + 2 \times (1,30 - 1,287)^2}{3} \right]^{1/2} = 0,047 \text{ kg} \quad (\text{A.24})$$

onde S_x é o índice de precisão da amostra com 4 leituras e t é o valor retirado da distribuição de *Student* com 95% de grau de confiança. A incerteza na determinação da massa de água será dada pelo somatório do limite do erro sistemático e de precisão associado à sua determinação,

$$U_m = \left[B_m^2 + P_m^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.25})$$

$$\frac{U_m}{\bar{m}} = \left[\left(\frac{0,02}{1,29} \right)^2 + \left(\frac{0,047}{1,29} \right)^2 \right]^{1/2} = 3,96 \% \quad (\text{A.26})$$

O volume do reator será igual ao volume de água. No entanto, o volume efetivo utilizado no cálculo da concentração será igual ao volume do reator menos o volume ocupado pelo dispersor existente no seu interior. As cotas do dispersor foram medidas com um paquímetro e o seu volume foi calculado, obtendo-se o valor total a descontar de 0,0556 L. De novo, e pelo mesmo motivo atrás referido, o erro na leitura das cotas será sempre inferior ao erro da medição da massa. Assim, temos que,

$$V = \frac{\bar{m}}{\rho} - 0,0556 = \frac{1,29}{998,76} \times 1000 - 0,0556 = 1,23 \text{ L} \quad (\text{A.27})$$

onde ρ é a massa volúmica da água a 12,4 °C e V o volume em litros, L.

Uma vez mais se considerou que a incerteza na determinação do volume efetivo do reator seria equivalente à incerteza na determinação da massa temos que,

$$\frac{U_v}{V} \approx \frac{U_m}{\bar{m}} = 3,96 \% \quad (\text{A.28})$$

A.5 – Incerteza na Determinação da Concentração Média

A concentração mássica de pó média é considerada como sendo a massa de pó a dividir pelo volume do reator, $C = m/V$. Assim, a incerteza na sua determinação é dada por,

$$U_C = \left[\left(\frac{\partial C}{\partial m} U_m \right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial V} U_v \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.29})$$

onde U_m e U_v são as incertezas nas leituras da massa de pó e do volume do reator. Derivando e substituindo, obtém-se,

$$\frac{U_C}{C} = \left[\left(\frac{U_m}{m} \right)^2 + \left(\frac{U_V}{V} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.30})$$

Para todas as concentrações elevadas a massa de pó foi pesada numa balança digital com uma resolução até às milésimas. O fabricante indica um erro sistemático de 0,001 g. Neste caso, a incerteza na determinação da massa de pó é dada pelos limites dos erros sistemático e de precisão. Assim,

$$U_m = \left[B_m^2 + P_m^2 \right]^{1/2} = \left[0,001^2 + 0,0005^2 \right]^{1/2} = 0,00112 \text{ g} \quad (\text{A.31})$$

Portanto, temos que a incerteza relativa na determinação da concentração média será dada por,

$$\frac{U_C}{C} = \left[\frac{0,00112^2}{m^2} + 0,0396^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.32})$$

estando representada na Figura A.2 a evolução desta incerteza relativa em função da concentração média. Para concentrações elevadas, ou seja, massas maiores, i.e., dentro dos valores utilizados no presente trabalho, o valor da incerteza da concentração média tende para o valor da incerteza inerente à determinação do volume do reator, ou seja de 4%, como se depreende da equação (A.32).

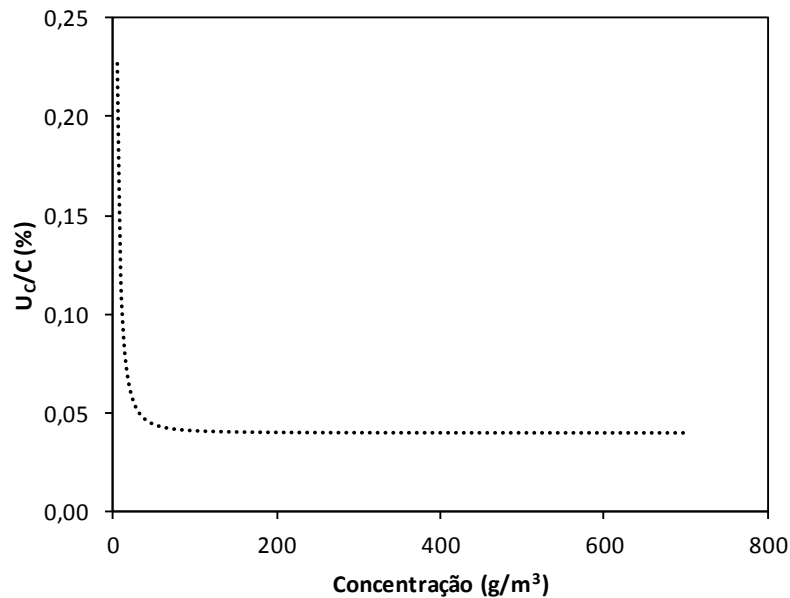


Figura A. 2 – Variação da incerteza na determinação da concentração.

ANEXO B: Evolução Histórica das Fornalhas

B.1 – Introdução

Ao longo do tempo foram realizadas fornalhas para a avaliação da ignição de nuvens de pós. A seguir é explanado a configuração de cada uma delas.

B.1.1 – Fornalha de Godbert-Greenwald

Nos Estados Unidos, como descrito por Dorsett *et al.* (1960), a determinação tradicional da temperatura de auto-ignição de nuvens de pó em contacto com uma superfície quente foi realizada na fornalha de Godbert-Greenwald (Eckhoff, 2003). Este aparelho, que pode ser visualizado na Figura B.1, consiste num tubo vertical feito de um material cerâmico à base de óxido de alumínio. O tubo tem 3,9 cm de diâmetro e 23 cm de altura tendo o aparelho um volume de 0,27 L. No topo do tubo está montado um adaptador de vidro que por sua vez está ligado a uma pequena câmara de latão, com uma tampa articulada para inserção do pó. Uma válvula de solenóide encontra-se entre a câmara de deposição do pó e o tanque do ar de dispersão (150 cm³). O pó contido na câmara-de-ar de dispersão é disperso pelo topo da fornalha. A indicação de ignição consiste na observação de emissão de chama pela parte aberta inferior da fornalha (Conti *et al.*, 1983). A parede externa da fornalha tem enrolada uma resistência elétrica que serve como elemento de aquecimento e tem dois furos para colocação de dois termopares. Um dos furos penetra a parede permitindo assim que o termopar esteja em contacto direto com a parede interna do tubo cerâmico (Eckhoff, 2003). Como a dispersão da nuvem de pó não está totalmente confinada na fornalha, a sua concentração não é corretamente conhecida. Dois problemas conhecidos desta fornalha associados à abertura da parte inferior são o baixo tempo de residência do pó na zona de alta temperatura e a incerteza da uniformidade da temperatura ao longo da vertical da fornalha (Conti *et al.*, 1983).

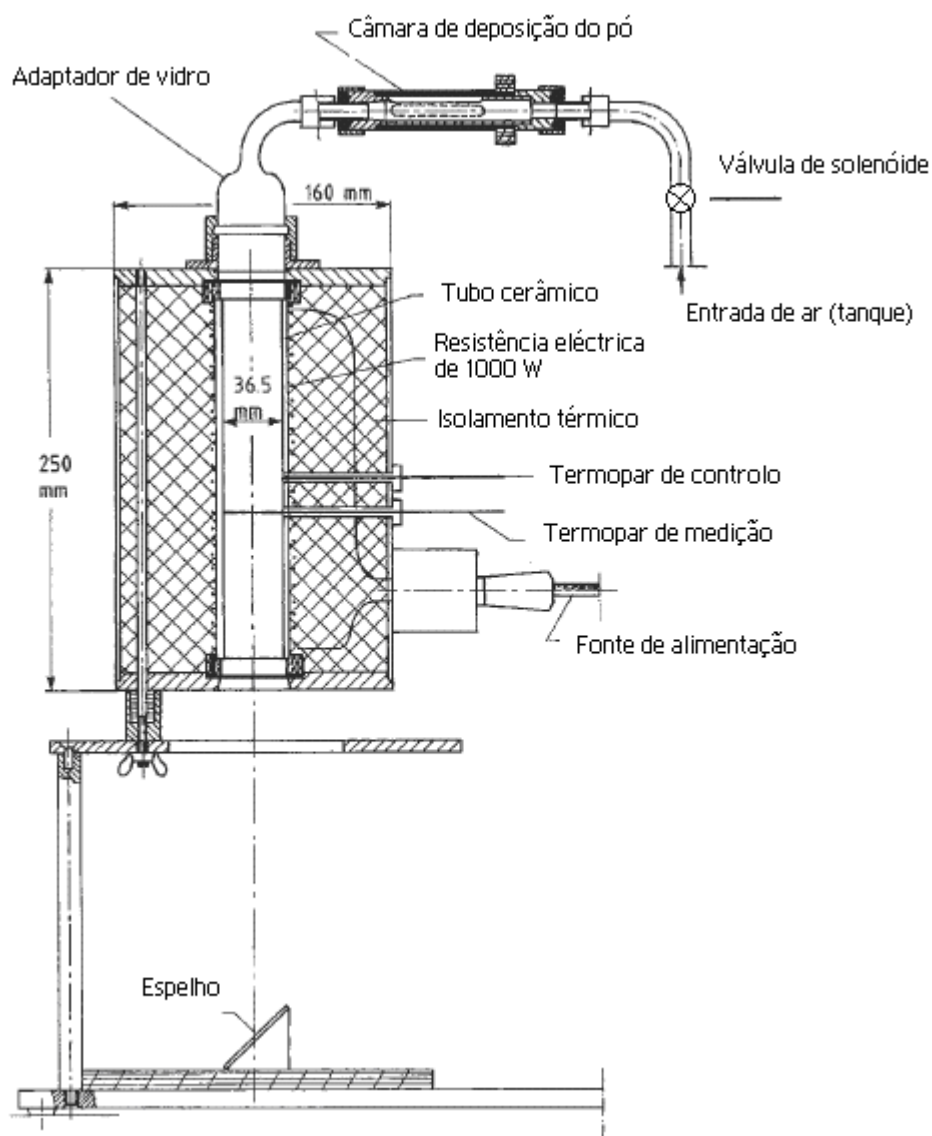


Figura B. 1 – Forno de Godbert-Greewald para determinação da temperatura mínima de ignição de nuvens de pó (figura adaptada de Eckhoff, 2003).

Griesche and Brandt usaram a fornalha de Godbert-Greewald modificada de tal forma que as nuvens de pó de concentração conhecida poderiam ser injetadas a uma velocidade constante e controlada. Estes autores investigaram a influência da velocidade da nuvem de pó ou do tempo de residência do pó na fornalha na temperatura mínima de ignição. Os resultados mostraram que a temperatura mínima de ignição diminui significativamente com o incremento do tempo de residência (Eckhoff, 2003).

B.1.2 — Fornalha de BAM

Na Alemanha foi concebida uma fornalha alternativa pela Bundesanstalt für Materialprüfung, como descrito por Leuschke (1966, 1966a), conhecida como fornalha/reator de BAM e que pode ser visualizada na Figura B.2. O procedimento experimental da ignição do pó é similar ao da fornalha de Godbert-Greewald mas a geração da nuvem de pó é manual por aperto de um bolbo de borracha. A nuvem é direcionada contra um disco metálico circular e côncavo de aproximadamente 20 cm² de área e de temperatura conhecida. No entanto, devido à sua configuração horizontal, a fornalha BAM permite que algum pó não entre em ignição em suspensão e que se deposite na parte inferior aquecida da fornalha. Nesta situação podem-se gerar produtos gasosos da pirólise que entram facilmente em ignição a uma temperatura inferior à temperatura de ignição da nuvem de pó.

Assim, a temperatura mínima de ignição determinada pela fornalha BAM, para o mesmo pó, pode ter valores bem inferiores à determinada pela fornalha de Godbert-Greewald (Eckhoff, 2003).

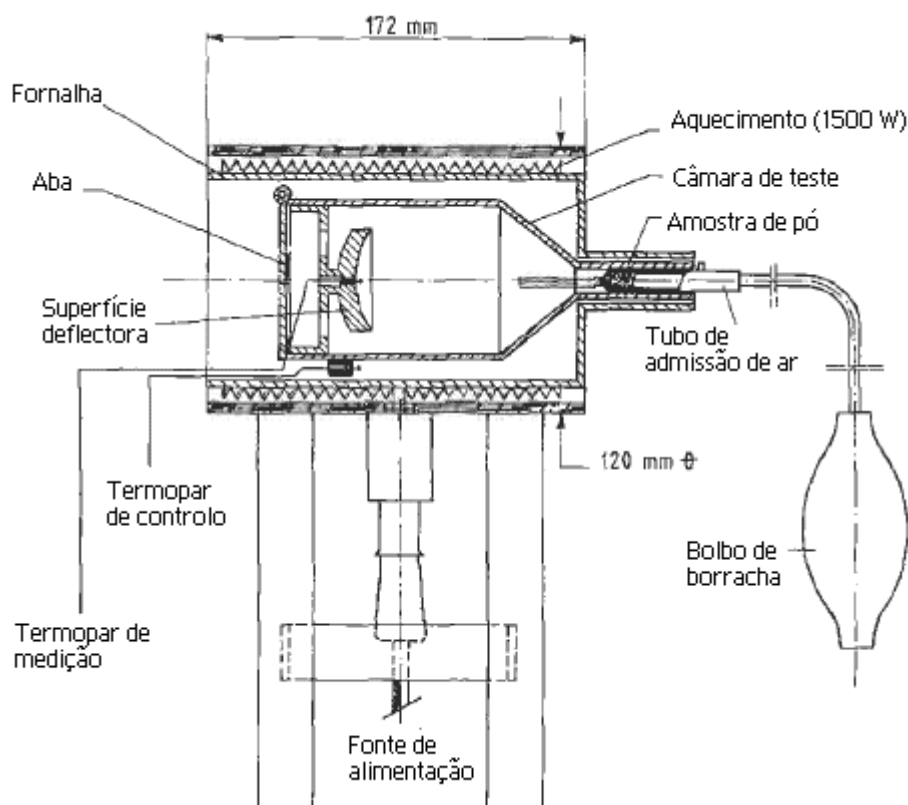


Figura B. 2 – Fornalha BAM para determinação da temperatura mínima de ignição de nuvens de pó (figura adaptada de Eckhoff, 2003).

B.1.3 — Fornalha de 1,2 L

Uma nova fornalha foi posteriormente desenvolvida de forma a corrigir a incerteza na dispersão da fornalha Godbert-Greewald, melhorar o critério visual de verificação da existência ignição e por fim controlar melhor a temperatura das paredes. O novo sistema consiste numa fornalha de 1,2 L utilizada pelo centro de investigação do Bureau of Mines.

A estrutura detalhada da fornalha de 1,2 L pode ser visualizada em corte vertical com o sistema de dispersão na Figura B.3 e em perspectiva na Figura B.4.

O reator cerâmico é feito de silicato alumina-magnésio e tem um diâmetro interno de 10 cm por 33 cm de altura. Na parede exterior do reator está enrolada uma resistência elétrica de Cromo-Níquel de 10 m de comprimento. O reator é envolvido por um isolamento cerâmico. Na parede exterior do reator existem quatro entradas para instrumentação estando numa delas localizado um termopar com fios de diâmetro 318 μm de níquel-crómio e Níquel-alumínio ligado ao controlador de temperatura. Este termopar está localizado perto da parede da fornalha. Outra entrada é usada para posicionar no centro da fornalha um termopar de Ródio-Platina com fio de 25 μm de diâmetro. Este termopar tem um tempo de resposta reduzido necessário para monitorizar a evolução da temperatura da mistura pó-ar aquando da ignição/explosão. As restantes duas entradas servem para uso de elétrodos, para colocação de tubos de tiragem de amostras de gás ou pós e para a medição da pressão. Um diafragma de fibra de vidro cobre o topo da fornalha de 1,2 L sendo este fixo através de uma flange de aperto roscada. O pó a ser testado é colocado no dispersor, que é manualmente inserido na parte inferior da fornalha momentos antes de se dar a sequência de testes de ignição. Um dispersor de ar, com tempo de reação de 30 ms, introduz cerca de 60 cm^3 de ar, à temperatura ambiente e à pressão atmosférica, na fornalha vindo de um reservatório pressurizado. A constante de tempo para aquecer a mistura dispersa de pó em ar até à temperatura inicial da fornalha é normalmente muito inferior à constante de tempo da ignição, especialmente quando esta se aproxima da fronteira de auto-ignição.

A auto-ignição é acompanhada pela rutura do diafragma e visualização simultânea de emissão de chama pela parte superior da fornalha sensivelmente após 3 s de se ter dado a dispersão (Conti *et al.*, 1983).

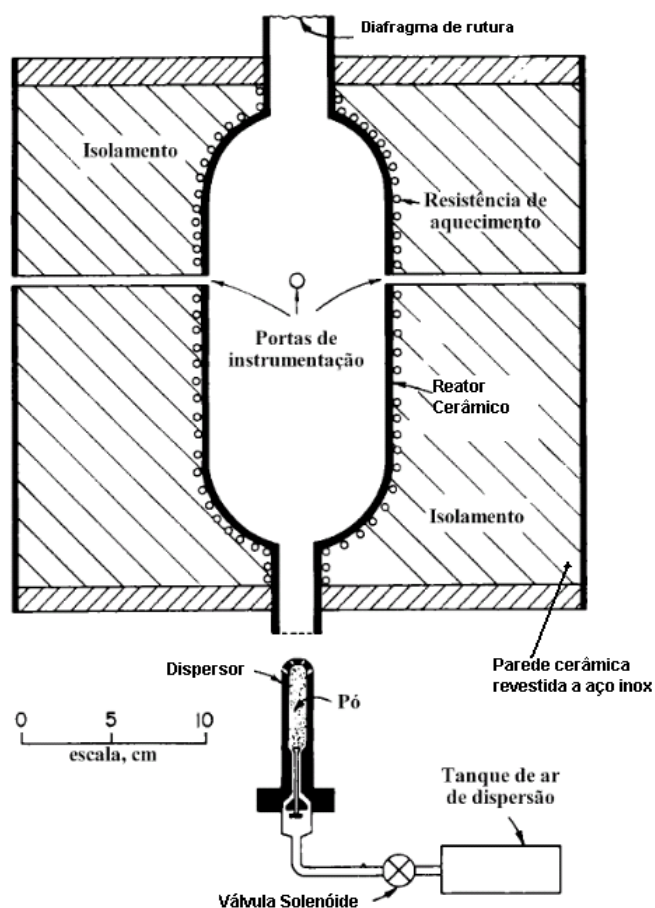


Figura B. 3 – Corte vertical da fornalha 1,2 L para determinação da temperatura mínima de ignição de nuvens de pó (figura adaptada de Conti *et al.*, 1993).

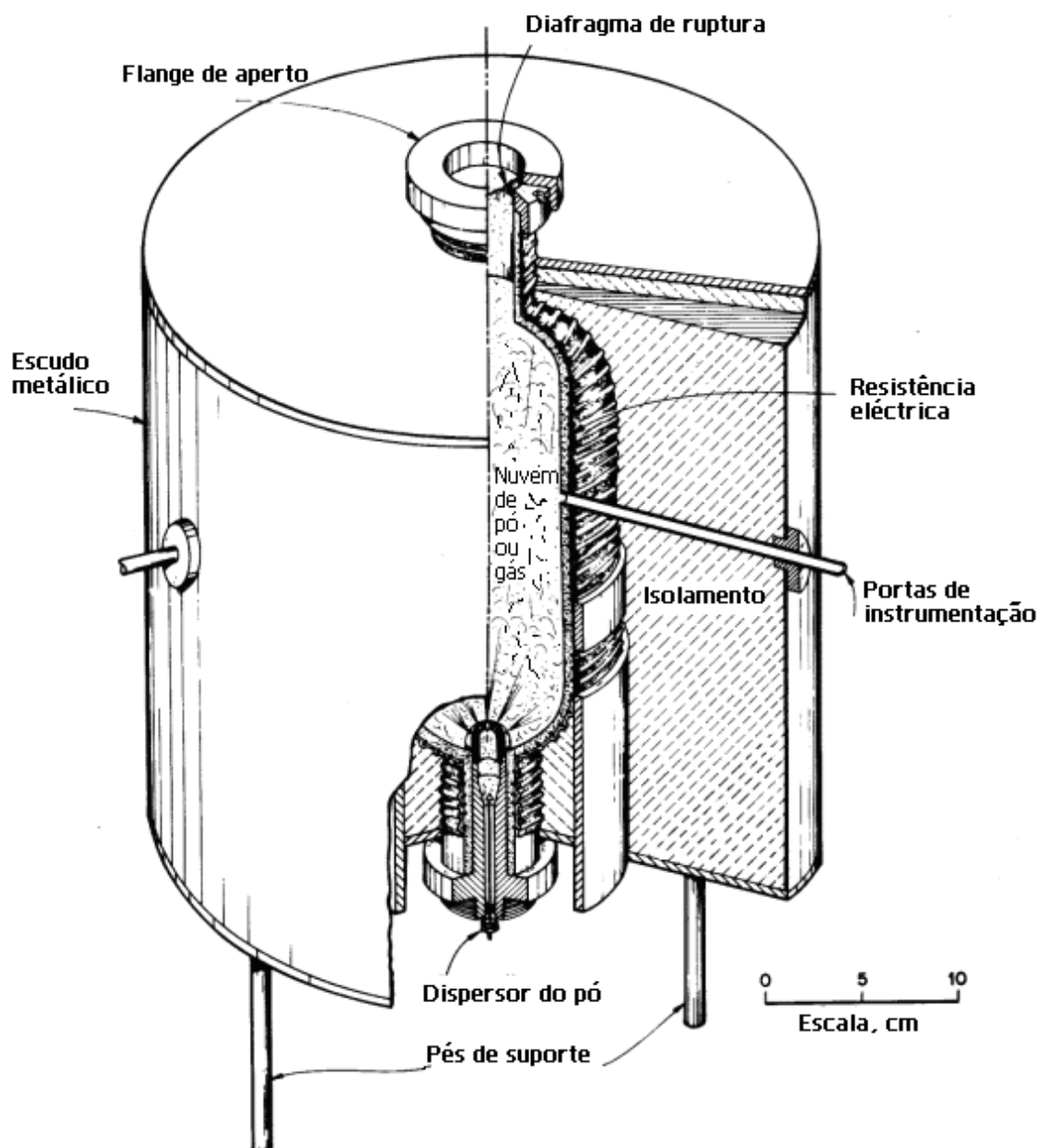


Figura B. 4 – Perspetiva da fornalha de 1,2 L (figura adaptada de Conti *et al.*, 1993).

B.1.4 — Fornalha de 6,8 L

Foi também desenvolvida uma outra fornalha que consiste numa câmara de 6,8 L, acoplada a um sistema automático de dispersão, com mecanismo de ventilação e com um controlador de temperatura melhorado relativamente à fornalha de 1,2 L. A nova fornalha pode ser vista em corte vertical na Figura B.5 e em perspectiva na Figura B.6. O novo sistema de controlo de temperatura, com recurso a uma fonte de alimentação, é mais sofisticado obtendo-se assim uma melhor precisão no controlo da temperatura da fornalha através da variação da potência de aquecimento. O controlador começa por aplicar a potência máxima quando se define a temperatura interna da fornalha. À medida que a fornalha atinge a temperatura pré-definida a potência reduz-se para $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{4}$, da potência inicial. Esta técnica elimina o pico de temperatura por overshoot e mantém a temperatura constante dentro da fornalha. Isto é um grande melhoramento sobre o controlador da fornalha de 1,2 L que apenas é capaz de ligar ou desligar a potência de aquecimento, modo de on-off. O reator cerâmico é feito de silicato de magnésio-alumínio e tem dimensões internas de 19,1 cm de diâmetro por 44,5 cm de altura. O volume interno de 6,8 L é determinado com o sistema de dispersão do ar inserido na fornalha. Ranhuras foram maquinadas na parte exterior do reator cerâmico de forma a ser possível enrolar-se uma resistência elétrica de Cromo-Níquel de 24 m de comprimento. O reator é isolado com uma camada entrelaçada de manta cerâmica. O revestimento exterior consiste num escudo metálico de 44,6 cm de diâmetro por 39,8 cm de altura com placas isoladoras nos topos para centralizar e posicionar a câmara. O volume restante entre a resistência elétrica e o escudo metálico é preenchido com várias camadas isolantes de cerâmica de forma a reduzir as perdas de calor (Conti *et al.*, 1993).

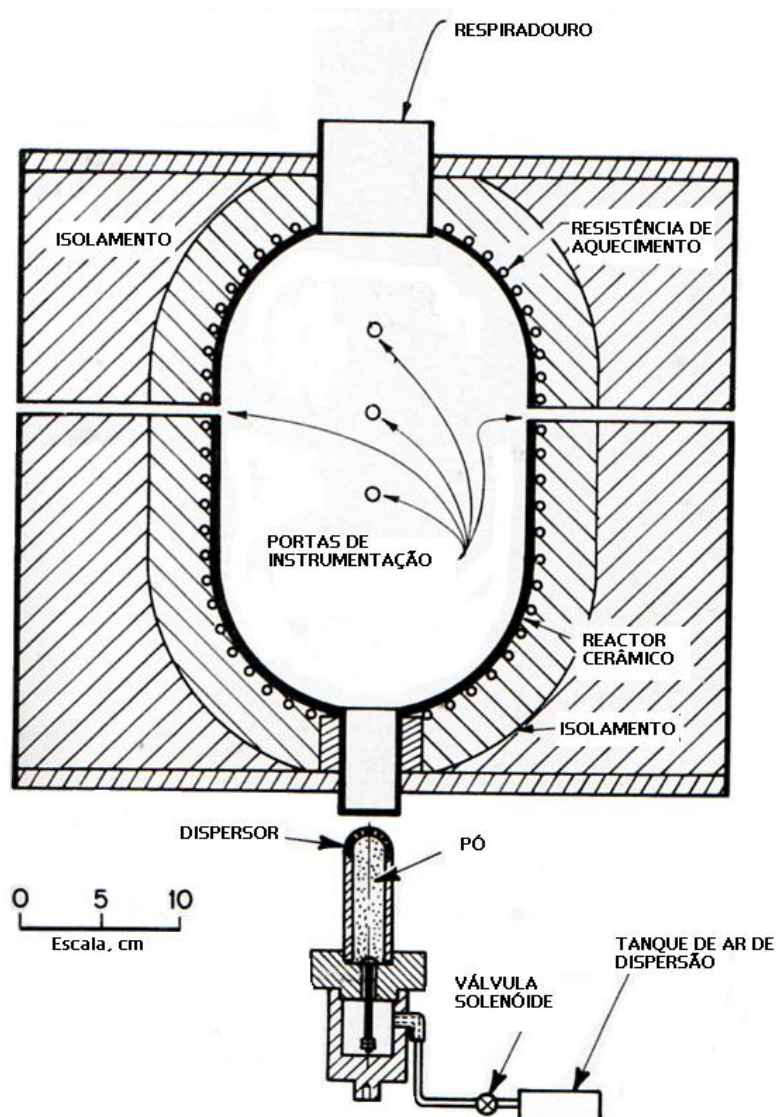


Figura B. 5 – Corte vertical da fornalha 6,8 L para determinação da temperatura mínima de ignição de nuvens de pó (figura adaptada de Conti *et al.*, 1993).

Na parede exterior da fornalha existem seis entradas para instrumentação onde duas servem para o uso de termopares. Um termopar de níquel-crómio e Níquel-alumínio, com fios de $318\ \mu\text{m}$ de diâmetro, localizado perto do centro axial da fornalha controla a temperatura de teste. No centro axial da fornalha é colocado um termopar de Platina-Ródio, com fios de $25\ \mu\text{m}$ de diâmetro, para monitorizar a evolução da temperatura da explosão. As restantes quatro entradas podem servir para posicionar elétrodos, transdutores de pressão ou aparelhos de recolha rápida de amostra de gás ou pós (Conti *et al.*, 1993).

O sistema de dispersão do ar foi melhorado (Figuras B.5 e B.7). O bocal do dispersor do pó contém 24 pequenos furos de $1,5\ \text{mm}$ de diâmetro através dos quais o pó sai injetado como finos jatos eliminando assim a formação de aglomerados. O operador já não necessita de inserir manualmente o dispersor na parte inferior da fornalha devido a um novo sistema em que um pistão de ar comprimido de dupla-ação posiciona o dispersor. Assim que é inserida a massa pré-determinada de pó na câmara do dispersor e a cabeça do bocal substituída consoante a furação pretendida, um interruptor do tipo pedal aciona automaticamente a inserção do dispersor na base da fornalha. Depois de um atraso de 0,1 segundos, um dado

volume de ar pressurizado injeta o pó do dispersor para dentro da fornalha. Este curto atraso minimiza o aquecimento prévio do pó quando este ainda se encontra no dispersor. O pó é disperso por uma descarga de ar de duração de 30 ms de um reservatório de ar de 175 cm³, pressurizado à pressão de 4,8 bar. O volume de ar responsável pela dispersão que é introduzido na fornalha corresponde a cerca de 340 cm³ de ar à temperatura ambiente e à pressão atmosférica. Após um atraso de 6 segundos, o dispersor é automaticamente removido da base da fornalha. O pó disperso é exposto à temperatura reinante na fornalha durante alguns segundos antes que este assente por gravidade, caso não haja ignição (Conti *et al.*, 1993).

Um mecanismo por respiradouro substitui o sistema de rutura de diafragma, que era um microfiltro de fibra de vidro colocado no topo da fornalha de 1,2 L. Este mecanismo por respiradouro consiste numa tampa articulada feita de uma liga de níquel-crómio-ferro de alta resistência e duma flange. A liga foi escolhida devido ao seu baixo coeficiente de expansão e resistência à corrosão. A estrutura da tampa (flange) é ajustada à volta da porção saliente do topo do tubo cerâmico, aparafusado ao topo da placa isoladora permitindo que a janela de respiro se abra aquando dos testes de ignição (ver Figura B.6) (Conti *et al.*, 1993).

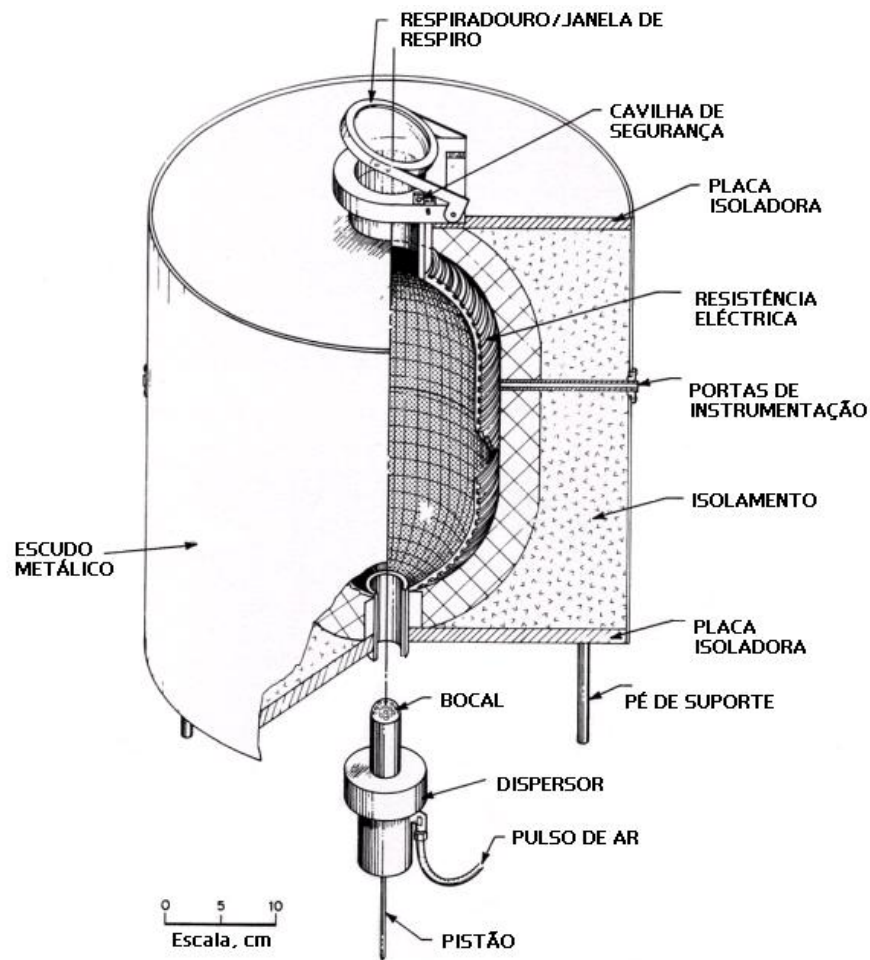


Figura B. 6 – Perspetiva da fornalha de 6,8 L (figura adaptada de Conti *et al.*, 1993).

A tampa também pode ser aberta manualmente para limpeza. A janela é feita de quartzo e tem a proteção de dois papéis cerâmicos para a proteger da pressão mecânica e calor geradas. Em operação normal a tampa é fechada para isolar a fornalha. Se houver ignição do pó durante um teste a janela do respiro abre-se permitindo a saída da chama e consequentemente dos gases quentes. A janela do respiro abre a uma sobrepressão de 0,03 a 0,1 bar durante as ignições na fornalha de 6,8 L. A janela do respiro está segura por duas cavilhas de segurança para prevenir que a janela caia para trás aquando da sua abertura. Por isso, e após a ignição, a janela tem de ser manualmente colocada na sua posição inicial, ou seja, fechada. A janela de quartzo proporciona uma oportunidade para filmar a alta velocidade a ignição da nuvem de pó ou para medir a radiação da nuvem queimada de pó (Conti *et al.*, 1993).

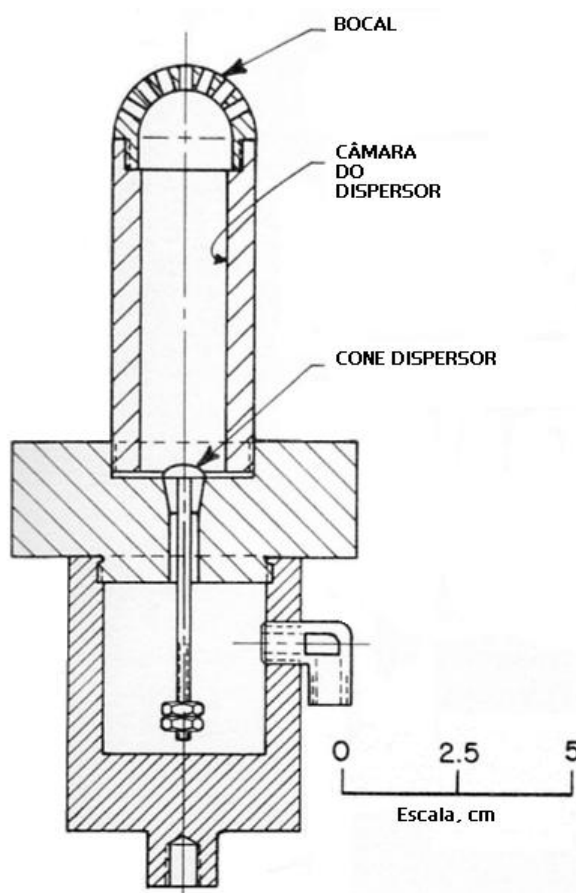


Figura B. 7 – Sistema de dispersão (figura adaptada de Conti *et al.*, 1993).

Nesta fornalha, e após seis segundos da dispersão, o critério ignição consiste em ter de haver abertura da janela do respiro com consequente emissão de chama. A maioria das ignições ocorre após 3 s da dispersão mas o critério dos 6 s é usado nesta fornalha porque o seu diâmetro interno é quase duas vezes o da fornalha de 1,2 L, e por isso, a chama demora mais tempo a se propagar (Conti *et al.*, 1993).

ANEXO C: Modelos Numéricos de Determinação da Temperatura Mínima de Ignição

C.1 – Modelo de Cassel e Liebman e Tanaka

Este modelo define a ignição do pó como equivalente à combustão de uma simples partícula esférica de pó à temperatura ambiente quando injetada dentro de uma fornalha aquecida. Segundo este modelo, a reação heterogénea de oxidação à superfície da partícula é responsável pela sua auto-ignição. Transferência de calor da superfície da partícula para o gás envolvente dá-se somente por condução. Os critérios de ignição usados neste modelo são:

- a) A taxa de geração de calor por unidade de área, $\dot{Q}_{Ga}$, e a taxa de perda de calor por unidade de área, $\dot{Q}_{La}$, são iguais;
- b) As derivadas das taxas de geração em ordem à temperatura são iguais.

$$\dot{Q}_{Ga} = \dot{Q}_{La} \quad (C.1)$$

$$\frac{d\dot{Q}_{Ga}}{dT_s} = \frac{d\dot{Q}_{La}}{dT_s} \quad (C.2)$$

A taxa de geração de calor por unidade de área é dada pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_{Ga} = fC_{ga}H \exp\left(\frac{-E_o}{RT_s}\right) \quad (C.3)$$

A taxa de perda de calor por unidade de área é dada pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_{La} = \frac{k}{r_d}(T_s - T_i) \quad (C.4)$$

As equações finais derivadas das anteriores são:

$$C_{ga} fH \exp\left[\frac{-E_o}{RT_s}\right] = \frac{k}{r_d} (T_s - T_i) \quad (C.5)$$

e

$$\dot{Q}_{La} = \frac{k}{r_d} (T_s - T_i) C_{ga} fH \exp\left[\frac{-E_o}{RT_s}\right] \left[\frac{E_o}{RT_s^2}\right] = \frac{k}{r_d} \quad (C.6)$$

Foram realizados estudos experimentais sobre a ignição de pós de magnésio e de ligas de partículas de magnésio-alumínio (50:50) expondo-os ao ar quente da fornalha. Os valores observados da temperatura de ignição para simples partículas de ambos os pós como função do tamanho das partículas estão de acordo com a previsão do modelo.

Também foi postulado que para nuvens de pós mono-dispersas a temperatura de ignição seria mais baixa que a de uma única partícula. Isto é devido à transferência de calor das partículas reativas para as suas vizinhas, e ao escudo interior das nuvens envolvendo as partículas contra a perda de calor. Este modelo não pode ser aplicado a pós orgânicos porque é assumida a heterogeneidade da reação na superfície da partícula (Mittal *et al.*, 1997).

A temperatura mínima de ignição, T_i , é igual à temperatura da parede da fornalha que corresponde à temperatura para a condição de ignição.

C.2 – Modelo de Cassel Nagy e Surincik

Neste caso a ignição do pó disperso na fornalha de Godbert-Greewald é analisada. Amido de milho misturado com uma substância inerte foi usado como amostra de pó para este estudo. O modelo foi desenvolvido por simulação das condições de queima na fornalha. O processo de ignição é descrito como oxidação heterogênea de partículas sólidas. Calor é transferido principalmente por condução e convecção. A condição para que ocorra a ignição usado neste modelo é de que a taxa de geração de calor e a taxa de perda de calor são iguais, conforme modelo anterior.

As equações desenvolvidas do modelo são apresentadas de seguida. A taxa de geração de calor é definida por

$$\dot{Q}_G = \frac{k_r H C_{gF}}{M_{ot}} f(x) \exp\left[\frac{-S_d E_o}{RT_r}\right] \quad (C.7)$$

onde

$$f(x) = \left[\frac{C_d}{C_d + b' C_{gF}}\right]^{n_d} \left[1 - \frac{C_d}{C_d + b' C_{gF}}\right]^{n_o} \quad (C.8)$$

e

$$b' = M_{dt} / M_{ot} \quad (C.9)$$

A taxa de perda de calor/consumo é definida por

$$\dot{Q}_L = k_c \frac{R}{S_d E_o} T_F^2 (\sum N_i c_{pi} + V) \quad (C.10)$$

onde

$$V = \dot{V}' / k_c \quad (C.11)$$

Na equação (C.7), T_r é a temperatura da reação quando ocorre ignição. É assumida por ser aproximadamente igual a T_F e substituída pela anterior. A correlação obtida como função das equações (C.7) e (C.9) é:

$$C_{gF} f(x) \exp\left[\frac{-S_d E_o}{RT_F}\right] = k' T_F^2 (\sum N_i c_{pi} + V) \quad (C.12)$$

onde

$$k' = \frac{k_c R M_{ot}}{S_d k_t H E_o} \quad (C.13)$$

A equação (C.12) contém seis constantes: S_d , k' , V , n_d , n_o e b' . Os valores aproximados de E_o , V e k' foram determinados usando dados experimentais. Os restantes valores foram obtidos experimentalmente em que se variou a concentração de oxigénio e pó.

A temperatura mínima de ignição é dada pela temperatura da fornalha, T_F , (Mittal *et al.*, 1997).

C.3 – Modelo de Mitsui e Tanaka

Este modelo estuda a ignição de uma nuvem esférica de partículas e leva em consideração a transferência de calor nas suas fronteiras. O número de partículas de um tamanho específico dentro da nuvem de pó e o raio da nuvem são estimados baseando-se na concentração do pó. A ignição é assumida como uma reação heterogénea na superfície das partículas. É modelado transferência de calor por convecção e radiação de um dado elemento da nuvem de pó para a sua envolvente (Mittal *et al.*, 1997).

Consideremos o espaço esférico da nuvem de pó cujo diâmetro é l onde as partículas de pó estão distribuídas. Então:

$$l = \sqrt[3]{6G_s / \pi C_{dn}} \quad (C.14)$$

onde l é o diâmetro da esfera, G_s a massa total de partículas de pó, ρ_s a massa volúmica da partícula, D_p o diâmetro da partícula e C_{dn} a concentração da nuvem de pó. O número de partículas, n , é dado por

$$n = 6G_s / \pi \rho_s D_p^3 \quad (C.15)$$

A taxa de calor gerado, G , da nuvem esférica de pó é dada por

$$\dot{G} = nQ \frac{dm}{dt} = A \frac{nD_p^2}{\sqrt{T_s}} \left\{ \exp \left(-\frac{E}{RT_s} \right) \right\} \quad (C.16)$$

onde

$$A = \pi C_g K_s Q \quad (C.17)$$

O calor, $\dot{U}_{np}$, libertado pela nuvem de pó é devido a convecção e radiação, e é dado por

$$\dot{U}_{np} = nh\pi D_p^2 (T_s - T_{in}) + \pi B_r l^2 (T_s^4 - T_{in}^4) \quad (C.18)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor do sólido para o gás e, B_r , o coeficiente de radiação, sendo os dois calculados como

$$h = 2k / D_p \quad (C.19)$$

$$B_r = \sigma \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 F \quad (C.20)$$

onde k é a condutividade térmica do ar, σ a constante de Stefan-Boltzmann, ε_1 , ε_2 e ε_3 as emissividades da chama, da partícula e da parede da fornalha, respetivamente, e F o fator de forma.

ε_1 pode ser calculado pela seguinte relação semi-empírica

$$\varepsilon_1 = 1 - \exp(-\gamma_e L' C_d) \quad (C.21)$$

onde L' é largura efectiva da nuvem de pó e γ_e uma constante igual a 0,03 por Beér (1962) e 0,005 por Foster e McGrath (1960). Usando estes valores ε_1 pode ser razoavelmente determinado.

A temperatura mínima de ignição da nuvem de pó pode ser obtida igualando as equações (C.16) e (C.18), e também usando $\frac{d\dot{G}}{dT_s} = \frac{d\dot{U}}{dT_s}$. Assim temos

$$\frac{6A'}{\sqrt{T_s}} \left\{ \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right) \right\} = \frac{12k}{D_p} (T_s - T_0) + \frac{\pi^{1/3} 6^{2/3} B \rho_s D_p}{G_s^{1/3} C_{dn}^{2/3}} (T_s^4 - T_{in}^4) \quad (C.22)$$

$$6A' \left(\frac{E}{RT_s^{5/2}} - \frac{1}{2T_s^{3/2}} \right) \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right) = \frac{12k}{D_p} + 4(6)^{2/3} \pi^{1/3} B \rho_s \left(\frac{D_p}{G_s^{1/3} C_{dn}^{2/3}} \right) (T_s^3) \quad (C.23)$$

Eliminando T_s , a temperatura da superfície do sólido, simultaneamente das equações acima, temos a temperatura mínima de ignição, T_{in} , em relação ao tamanho da partícula e a uma série de propriedades e variáveis (Mitsui *et al.*, 1973).

Este modelo tem sido aplicado para a previsão da temperatura mínima de ignição de uma série de pós incluindo pós de ligas de alumínio-magnésio com partículas de 10 a 70 μm de tamanho, pós de magnésio, pós de acetilcelulose, etc. As concentrações utilizadas rodam os 40 g/m^3 (Mittal *et al.*, 1997).

O modelo desenvolvido por Mitsui e Tanaka tem sido aplicado a pós inorgânicos e orgânicos. No entanto, uma análise mais cuidada deste modelo mostrou discrepâncias na sua aplicação na maioria dos pós orgânicos. Estas discrepâncias são devidas ao facto do modelo de Mitsui e Tanaka ser baseado no pressuposto que a oxidação da partícula de pó é um fenómeno superficial e que a reação na superfície da partícula é responsável pela auto-ignição da nuvem de pó. Isto é aceitável em alguns metais e sólidos não voláteis e no fundo reflete-se na concordância de resultados experimentais e previstos para os pós metálicos (Mittal *et al.*, 1997).