



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE EXPLOSIVIDADE
DE UM AERODISPERSÓIDE METÁLICO.**

GLYCON CARDOSO FILHO

ORIENTADOR: CARLOS ALBERTO GURGEL VERAS

CO-ORIENTADOR: PAULO CELSO DOS REIS GOMES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

BRASÍLIA/DF: SETEMBRO – 2009



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE
EXPLOSIVIDADE DE UM AERODISPERSÓIDE
METÁLICO**

GLYCON CARDOSO FILHO

**ORIENTADOR: CARLOS ALBERTO GURGEL VERAS
CO-ORIENTADOR: PAULO CELSO DOS REIS GOMES**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS
MECÂNICAS**

**PUBLICAÇÃO:/09
BRASÍLIA/DF: SETEMBRO – 2009**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE EXPLOSIVIDADE
DE UM AERODISPERSÓIDE METÁLICO**

GLYCON CARDOSO FILHO

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS
MECÂNICAS.**

APROVADA POR:

**Prof. Carlos Alberto Gurgel Veras, PhD (ENM-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Armando de Azevedo Caldeira Pires, PhD (ENM-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof^ª. Thamy Cristina Hayashi (UFBA)
(Examinadora Externa)**

BRASÍLIA/DF, 10 DE SETEMBRO DE 2009

FICHA CATALOGRÁFICA

CARDOSO, GLYCON FILHO

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE EXPLOSIVIDADE DE UM
AERODISPERSÓIDE METÁLICO.

xix, 99 p., 297mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2009).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Explosividade de Aerossol

2.Combustão de Metais

3.Teste de Explosividade

4.Aerossol de Chumbo

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CARDOSO, G. F. (2009). Avaliação de Parâmetros de Explosividade de um Aerodispersóide Metálico. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM.DM-140A/2009, Departamento de Mecânicas, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 101p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Glycon Cardoso Filho.

TÍTULO: Avaliação de Parâmetros de Explosividade de um Aerodispersóide Metálico.

GRAU: Mestre

ANO: 2009

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Glycon Cardoso Filho

SHIS QI 29 Conj. 16 Casa 18, Brasília – DF, Brasil.

(61) 3367-4105 (61) 9986-6115. gcardosof@gmail.com

“E agora meu trabalho humilde
espera que ponhais nele favoráveis
olhos”.

Francisco de Sá Meneses

Dedicado à memória de minha querida e amada avó, Maria Alice Sebastiana Ferreira de Oliveira, uma grande mulher que sempre acreditou em mim.

Agradecimentos

Aos meus pais, que sempre me apoiaram e incentivaram.

À minha linda esposa Ana Carolina e meu amado e querido filho Yan.

Às minhas três irmãs queridas.

Ao meu grande amigo e Professor Paulo Celso dos Reis Gomes por seu apoio incondicional, tanto na minha vida profissional quanto acadêmica.

Ao Prof. Carlos Alberto Gurgel Veras pela brilhante orientação, e por ter me acolhido no meio no caminho.

Ao Prof. Antonio C. P. Brasil Junior, pela orientação inicial e discussões que foram de grande ajuda à este trabalho.

E à todos que de alguma forma ajudaram na elaboração deste trabalho.

RESUMO

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE EXPLOSIVIDADE DE UM AERODISPERSÓIDE METÁLICO.

Diversos aerossóis podem ser intencionalmente manufaturados, ou mesmo gerados pelo processamento de um sólido. Como foco para nosso estudo, tomamos uma Fundição de Chumbo Secundária, também conhecida como recicladora de chumbo, por utilizar baterias automotivas como matéria prima para a fabricação de chumbo. Durante esse processo ocorre a produção de fumos metálicos e outros compostos sólidos dispersos na forma de particulado, os quais são capturados pelo sistema de exaustão. Como primeira justificativa, temos que o chumbo, além de todo o seu potencial danoso à saúde e ao meio ambiente, na forma de particulado finamente disperso no ar, respeitando o pentágono da explosão, é considerado explosivo.

A modelagem matemática da queima de partículas de chumbo mostrou o efeito do tamanho da partícula com temperatura de ignição em relação à lei de oxidação, permitindo também analisar a temperatura da superfície (T_s) e sua temperatura de ignição (T_0). Além da identificação das similaridades do titânio com o chumbo no processo de combustão da partícula em ar ambiente.

A avaliação experimental da explosividade do material, utilizando a Bancada de Teste de Explosão (BTE), mostrou primeiramente a sua simplicidade de fabricação e sua capacidade de avaliar a propagação de chama produzir uma nuvem de aerossol.

ABSTRACT

THE METAL AEROSOL ASSESSMENT FOR EXPLOSIBILITY PARAMETERS

Several aerosols can be intentionally manufactured, or exactly generated by processing a solid. In this project we chose as focus for our study a Secondary Lead Foundry, also known as lead recycling, for use of automotive batteries as raw material in lead manufacture. During this process the production of smoke occurs and other metal compounds are dispersed as solid particles, which are captured by the ventilation system. As a main justification, the lead, in addition to its harmful potential for health and environment, as finely dispersed particles in the air, with the explosion of the pentagon, it is considered as an explosive.

The mathematical modeling of the burning of lead particles showed the effect of particle size with ignition temperature in relation to oxidation law. It also allowed to analyze the surface temperature (T_s) and its ignition temperature (T_0). This mathematical modeling allowed us to identify the similarities between titanium and lead particles during combustion process in the environment air.

The experimental evaluation of the material explosibility, using the Explosion Bench Test (BTE) mainly showed how easy is its manufacture and their ability to assess the spread of flame to produce a cloud of aerosol.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS	xv
1 - INTRODUÇÃO	1
2 – OBJETIVOS	9
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1.- PROCESSO DE RECICLAGEM DO CHUMBO E GERAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO	10
3.2.- A EXPLOSÃO E SEUS ACIDENTES HISTÓRICOS	15
3.3.- DEFLAGRALÇÃO E DETONAÇÕES	18
3.4.- EXPLOSÕES DE AEROSSOL	20
3.4.1.- Explosão de Aerossol Via Testes Laboratoriais	23
3.5.- MECANISMOS DE COMBUSTÃO DE UMA PARTÍCULA	28
3.5.1.- Mecanismos de Combustão de uma Partícula Metálica	29
4 – MODELAGEM MATEMÁTICA.....	38
4.1 - MODELO DE IGNIÇÃO DE UMA PARTÍCULA METÁLICA.	38
4.2 - TEMPERATURA DE IGNIÇÃO DE UMA NUVEM DE AEROSSOL.	47
4.3 - PROPAGAÇÃO DA QUEIMA DE PARTÍCULAS EM COORDENADAS ESFÉRICAS.	52
5 – EXPERIMENTO DE BANCADA	58
5.1 - MATERIAIS.	58
5.2 - METODOLOGIA.	61
5.2.1 - Metodologia de Verificação da Bancada de Teste de Explosividade.	62

6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
6.1 - TESTES DE VERIFICAÇÃO DA BANCADA DE TESTE DE EXPLOSIVIDADE (BTE).	63
6.2. MODELO MATEMÁTICO	66
6.2.1 Resultados e Discussões do Modelo de Ignição de uma Partícula Metálica...	68
6.2.2. Resultados e Discussões da Temperatura de ignição de uma Nuvem de Aerossol e Propagação da Queima de Partículas em Coordenadas Esféricas	76
6.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES DO TESTE COM A MISTURA DE MATERIAIS PARTICULADOS PROVENIENTES DA RECICLADORA DE CHUMBO	83
7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	84
7.1. CONCLUSÕES	84
7.2. RECOMENDAÇÕES	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
ANEXO	
A_ <i>INTERNATIONAL CHEMICAL SAFETY CARDS</i> ICSC: 0052.	95
B_ ORDEM DE SERVIÇO-MANUSEIO DO PÓ DE FILTRO (CHUMBO).....	98

LISTA DE FIGURA

Figura 1.1: Triângulo de Fogo	2
Figura 1.2: Pentágono da Explosão	2
Figura 1.3: (A) forno rotativo, (B)coletor de poeira do tipo filtro manga (Adaptado de Zalosh <i>et al.</i> , 2005).	7
Figura. 3.1: (a) serras para o corte das baterias, (b 22). a parte metálica da bateria.	11
Figura. 3.2: Máquina responsável pela trituração das partes plásticas da bateria	12
Figura. 3.3: Mostra a lateral e a frente de um dos fornos rotativos, o qual é todo fechado para a captura dos gases e aerodispersóide	13
Figura. 3.4: Processo de drenagem do chumbo após sua redução.	14
Figura. Figura. 3.5: (a)Sistema de resfriamento dos gases provenientes do forno rotativo, (b) Sistema de filtros mangas (c) local de armazenado do material particulado retirado do filtro mangas.	15
Figura 3.6: Ilustra como a velocidade de combustão de uma dada massa de um combustível sólido aumenta com o acréscimo de sua subdivisão, (Adaptada de Eckhoff, 2003).	21
Figura 3.7: Mostra a combustão de nuvem de aerossol de magnésio: a linha tracejada indica a posição de fio de tungstênio utilizado como fonte de ignição; as sequências a, b e c mostram o aumento na largura da chama (Adaptado de Dreizin e Hoffmann 1999)	22

Figura 3.8: Equipamento de teste para avaliação da temperatura de inflamabilidade dos gases produzidos pela decomposição exotérmica (Adaptado de Eckhoff, 2003).....	25
Figura 3.9: Modelo de forno de Godbert-Greenwald (Adaptado de Eckhoff, 2003).....	26
Figura 3.10: Foto de uma bomba de 20 litros para teste de explosão, (Adaptado de Eckhoff, 2003).....	27
Figura 3.11: Diagrama de fase, equilíbrio binário de Al-O na pressão de 103Pa (Adaptado de Dreizin, 1996).....	32
Figura 3.12: Esquema do equipamento para gerar micropartícula metálica incandescente. (Adaptado de Dreizin, 1999).....	33
Figura 4.1: Ignição em um balanço térmico (a) balanço térmico (b) excesso de energia, (Adaptado de Wang te al., 2002).....	39
Figura 4.2: Modelo de propagação (Adaptado de Mitsui e Tanaka, 1973) .	53
Figura 5.1: Bancada de teste (Tubo de Teste de Explosividade - BTE).....	59
Figura 5.2: Peneira de diâmetro interno de 6,5 cm, malha da tela de aço 18x16 diâmetro 0,28 milímetros.....	59
Figura 5.3: Equipamento de vibração, marca Vibro Kraft, frequência de vibração constante em 60 Hz.....	60
Figura 5.4: Bico de Bunsen, (fonte de ignição).....	60
Figura 6.1: Chama provocada pela dispersão da farinha de trigo.....	64
Figura 6.2: Chama provocada pela dispersão do amido de milho.....	64
Figura 6.3: Temperatura adimensional de uma partícula de titânio, Θ e a espessura do filme z em função do tempo τ' para o caso $\gamma \gg 1$	69

Figura 6.4: Temperatura adimensional de uma partícula de chumbo, Θ e a espessura do filme z em função do tempo τ' para o caso $\gamma \gg 1$	69
Figura 6.5: Temperatura de ignição de diversas partículas metálicas em função do raio das mesmas para lei de oxidação com $n = 0$	71
Figura 6.6: Temperatura de ignição de diversas partículas metálicas em função do raio das mesmas para lei de oxidação com $n = 1$	72
Figura 6.7: Temperatura de ignição de diversas partículas metálicas em função do raio das mesmas para lei de oxidação com $n = 2$	73
Figura 6.8: Temperatura de ignição de diversas partículas metálicas em função do raio das mesmas para lei de oxidação com $n = 3$	74
Figura 6.9 Temperatura de ignição como uma função do raio da partícula para várias leis de oxidação. Curva 1, $n = 0$; curva 2, $n = 1$; curva 3, $n = 2$ e curva 4, $n > 2$. (reproduzido de Yarin e Hetsroni, 2004).....	75
Figura 6.10: Temperatura de ignição para diferentes diâmetros de partículas de alumínio e magnésio	79
Figura 6.11: Temperatura de ignição para diferentes diâmetros de partículas de titânio e chumbo	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Concentração dos materiais particulados de uma fundição de chumbo secundária. Sistema de filtros mangas (Adaptado de Lewis e Beautement, 2001).....	6
Tabela 1.2. Concentração dos materiais particulados de uma fundição de chumbo secundária. Sistema de filtros mangas (Adaptado de Kreuzsch <i>et. al.</i> , 2001).....	6
Tabela 6.1. Velocidade de propagação da chama no tudo de teste de explosividade	65
Tabela 6.2 Velocidade de propagação da chama em tudo de teste de explosividade (Adaptado de Proust, 2006).....	66
Tabela 6.3. Valores utilizados para a obtenção dos resultados	67
Tabela 6.4: Temperatura da superfície da partícula e temperatura de ignição de uma nuvem de aerossol	78
Tabela 6.5: Temperatura de ignição T_{dl} da partícula de alumínio	81
Tabela 6.6. Temperatura de ignição T_{dl} da partícula de magnésio.....	82
Tabela 6.7. Temperatura de ignição T_{dl} da partícula de titânio.	82
Tabela 6.8. Temperatura de ignição T_{dl} da partícula de chumbo	82

LISTA DE SÍMBOLOS

MODELO DE IGNIÇÃO DE UMA PARTÍCULA METÁLICA

m = Massa da partícula

S = Área superficial da partícula

ρ = Massa específica da partícula

c_p = Calor específico da partícula

h = Coeficiente de troca térmica

δ = Espessura da camada de óxido ou filme de óxido

Q = Calor da reação

T_∞ = Temperatura do gás ambiente

d = Diâmetro da partícula

r_0 = Raio da partícula

Nu = Número de Nusselt

λ = Condutividade térmica da fase gasosa.

n Comportamento da capa de óxido que varia em 0,1,2,...

K_* = Constante da taxa de oxidação

t = Tempo

c = Constante para a equação (4.1.6)

A' = Fator pré-exponencial

E = Energia de ativação

R = Constante universal dos gases

T = Temperatura absoluta

$C_o^m = A$ e C_o = Concentração do oxidante sobre a superfície da partícula

m = Ordem da reação

η = Espessura adimensional da camada de óxido

Θ = Temperatura adimensional da partícula

τ = Tempo adimensional

i = Subscrito, refere-se ao estado inicial da partícula

TEMPERATURA DE IGNIÇÃO DE UMA NUVEM DE AEROSSOL

ι = Diâmetro da esfera;

G_s = Massa total de partículas em suspensão;

ρ_s = Massa específica da partícula, e

C_d = Concentração de aerodispersóide.

D_p = Diâmetro das partículas

Q = Calor da reação;

m = Massa da partícula;

E = Energia de ativação

R = Constante universal dos gases;

T_s = Temperatura da superfície da partícula;

k_s = Constante da taxa de reação, e

C_{ox} = Concentração do oxidante.

k = Condutividade térmica do ar

σ = Constante de Stefan-Boltzmann

ϵ_1 = Emissividade da chama

ϵ_2 = Emissividade partícula

ϵ_3 = Emissividade da parede do reator

F = Fator de forma.

L' = Largura efetiva da nuvem de aerossol

γ = Constante igual a 0,003

PROPAGAÇÃO DA QUEIMA DE PARTÍCULAS EM COORDENADAS ESFÉRICAS

T = Temperatura ambiente

T_f = Temperatura de frente de chama

T_i = Temperatura inicial no tempo $t=0$

$erfc$ = Função erro complementar

b = Raio da frente de chama

α = Difusividade térmica

l = Diâmetro da nuvem de poeira

r = Distância a partir da esfera n

T_{gL} = Temperatura do gás na distância L

L = Distância entre a partícula n e $n+1$

b = Raio da frente de chama

D_p = Diâmetro da partícula

k^* = constante para equação (4.3.3)

T_{dL} = Temperatura da partícula em L

T_{gL} = Temperatura do gás em L

T_f = Temperatura de frente de chama;

ρ_s = Massa específica da partícula

h = Coeficiente de transferência de calor

c_{ps} = Calor específico do sólido

B = Coeficiente de radiação

ϵ_2 = Emissividade da partícula

ϵ_g = Emissividade do gás;

F = Fator de forma.

τ = Tempo de combustão total da partícula

K_D = chamado de constante de queima

c_p = Calor específico do gás;

T_s = Temperatura da superfície da partícula e

λ = Calor latente de vaporização

T_{in} = Temperatura inicial no $t > 0$

1.INTRODUÇÃO

Uma explosão nada mais é do que uma súbita e violenta liberação de energia. A energia produzida pela explosão pode ser dividida em três formas:

- i) Energia mecânica, rompimento de um vaso sob pressão;
- ii) Energia nuclear, como a bomba de Hiroshima;
- iii) Energia química, que de acordo com Eckhoff (2003), é gerada por uma reação química exotérmica que, quando ocorre em um volume constante, dá origem a um aumento súbito e significativo da pressão.

A explosão pode ser denominada uma deflagração, quando está possui uma velocidade de frente de chama subsônica de 1m/s à 1000m/s, ou uma detonação, quando atinge uma velocidade supersônica maior ou igual a 2000m/s, que é a forma mais perigosa da explosão.

A explosão em uma indústria causa centenas de mortos e feridos e milhões em danos à propriedade, por isso o *Advisory Committee on Major Hazards* – ACMH, em sua primeira publicação de 1976, gradua a explosão como o segundo maior perigo na indústria, causando menos acidentes do que os incêndios, porém, causando frequentemente mais perdas de vidas e danos materiais do que os incêndios; por esse motivo é usualmente observada como sendo potencialmente mais perigosa do que os incêndios.

Como em todo incêndio, o fogo de um aerossol ocorre quando o material combustível em suspensão é exposto a uma fonte de calor na presença de oxigênio, constituindo o Triângulo do Fogo (figura 1.1). A remoção de qualquer um dos lados do triângulo paralisa a combustão.

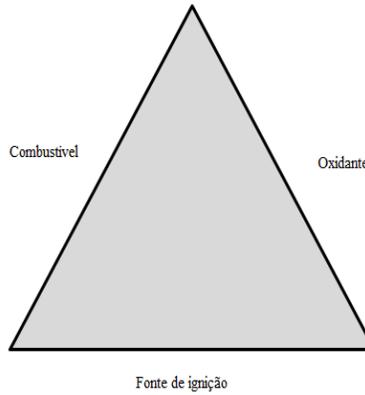


Figura 1.1: Triângulo de Fogo

Uma explosão com aerossol requer a presença simultânea de mais dois elementos além dos mencionados anteriormente; a dispersão desse material com ar e o confinamento, formam um pentágono (figura 1.2) e com a remoção da suspensão ou o confinamento evita-se a explosão, embora ainda possa ocorrer a combustão do material particulado.

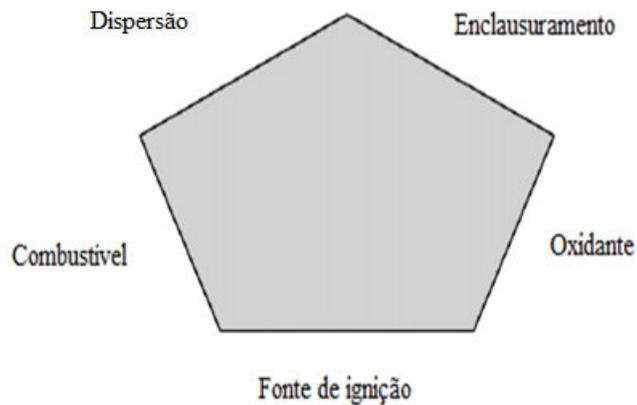


Figura 1.2: Pentágono da Explosão.

Além disso, a concentração do aerossol em suspensão deve estar em uma faixa denominada faixa de explosividade para que ocorra a explosão. Isso é semelhante à faixa de inflamabilidade comumente usada para vapores, porém, a faixa de explosividade para aerossol depende do tamanho médio das partículas em suspensão, isso quer dizer que o mesmo material pode ter variadas faixas de explosividade. A explosão de um aerossol pode gerar uma grande energia criando uma forte onda de pressão que, sem controle, pode destruir prédios e, controlada, pode ser utilizada como propelente para foguetes como o caso do alumínio em pó.

O fenômeno chamado de aerodispersóide ou aerossol explosivo é na realidade bastante simples e fácil de imaginar em termos de experiência do dia a dia. Diversos materiais sólidos particulados podem ser considerados inflamáveis, como vários metais e não metais e alguns materiais orgânicos e inorgânicos.

Diversos aerossóis podem ser intencionalmente manufaturados, como farinha de trigo e pó de alumínio para revestimento, ou mesmo gerado pelo processamento de um sólido. Em caso de transporte e armazenamento desse material, esse, por ser muito fino, é facilmente disperso no ar, gerando uma nuvem potencialmente explosiva do mesmo. A velocidade e a violência desta queima, de acordo com Eckhoff (2003), podem aumentar com o acréscimo de subdivisões desse material.

O risco de explosão devido à combustão de aerodispersóide é bem conhecido há diversos séculos. O primeiro artigo científico sobre esse assunto foi escrito em 1785, em relação à explosão de um silo de farinha de trigo. Muitos outros acidentes como esse, envolvendo diversos materiais tais como madeira, farinha, açúcar, borracha, plástico, metais e produtos farmacêuticos foram relatados por Carson e Mumford (2002).

O risco de uma explosão devido a aerodispersóides está geralmente presente em todos os processos industriais onde ocorre a formação de

partículas, desde que as condições para uma explosão do aerossol sejam satisfeitas (figura 1.2).

Como explanado anteriormente, cinco condições devem estar envolvidas, simultaneamente, para que uma explosão ocorra: a presença do particulado, a mistura desse material com o ar formando uma nuvem, uma fonte de ignição, o oxidante e o confinamento. Observa-se que essas condições estão presentes em várias indústrias que processam materiais sólidos, desde têxteis, alimentos, até fundição de metais.

Como foco para nosso estudo, tomamos uma fundição de chumbo, que pode ser primária ou secundária.

Na fundição de chumbo primária, a indústria processa o minério de chumbo como matéria prima para a fabricação do chumbo. No Brasil, a única empresa de fundição de chumbo primária, a Plumbum Mineração e Metalurgia S/A, encerrou suas operações em 1995.

Fundição de chumbo secundária é também conhecida como recicladora de chumbo, por utilizar baterias automotivas como matéria prima para a fabricação de chumbo.

Uma recicladora de chumbo consiste na recuperação desse elemento através da Pirometalurgia, em que a sucata de chumbo é colocada num forno rotativo (figura 1.3) sob uma atmosfera de redução, na presença de carvão e aço; em alguns casos ocorre a adição de carbonato de sódio (NaCO_3), para reduzir o ponto de fusão.

Durante esse processo ocorre a formação de fumos metálicos e outros compostos sólidos dispersos na forma de particulados, os quais são capturados pelo sistema de exaustão. Os gases da exaustão possuem diversas substâncias, alguns do material particulados que podem estar presente na nesse particulado, estão listadas na tabela 1.1 e 1.2. Essas substâncias são filtradas por um sistema de filtros tipo mangas (figura

1.4) e o material particulado contendo chumbo e outros compostos sólidos fica retido nos elementos filtrantes.

A tabela 1.1 e 1.2 mostram alguns dos prováveis compostos encontrados no sistema de filtros mangas de uma fundição de chumbo secundária. Na Tab. 1.1 sua concentração mássica total é diferente de 100% devido às diferentes técnicas analíticas empregadas por Lewis e Beutement (2001).

Vários estudos e investigações de acidentes têm mostrado que os coletores de poeiras são equipamentos com um grande potencial para gerar uma atmosfera explosiva. Isso não é de se surpreender, tendo em vista o número de coletores de poeira utilizadas em diferentes indústrias. Somado a isso, tem-se o fato de que a suspensão de uma nuvem de particulado é inerente ao seu funcionamento, e, ademais, os coletores por estarem ligados a outros equipamentos que são fontes potencialmente de ignição.

Zalosh *et al.* (2005), relatam inúmeros acidentes com coletores de poeira em diferentes países como Estados Unidos, Inglaterra e Alemanha em um período de 10 anos. Nos Estados Unidos, de um total de 372 acidentes investigados, 156 ou 42% de todos os acidentes investigados, foram causados por explosão em coletores de poeira. Na Inglaterra, de 303 acidentes investigados em indústrias, 55 acidentes, ou 18%, foram provocados por explosões em coletores de poeira e na Alemanha, de um total de 426 acidentes, 76 deles, isto é, 17%, foram provocados por explosões em equipamentos coletores de poeira.

Dos vários metais relacionados na mistura (tabela 1.1 e 1.2), o chumbo é o que gera maior controvérsia quanto a sua capacidade explosiva. Há poucos trabalhos que relacionam o potencial explosivo deste metal.

Tabela 1.1: Concentração dos materiais particulados de uma fundição de chumbo secundária. Sistema de filtros mangas (Adaptado de Lewis e Beutement, 2001)

Componentes	Media % massa
Al ₂ O ₃	0.15
CaO	0.26
Cl	3.52
FeO	1.23
MgO	0.08
Na ₂ O	5.86
PbS	47.70
PbO	42.32
SiO ₂	0.49
ZnO	2.13
Total	103.74

Tabela 1.2: Concentração dos materiais particulados de uma fundição de chumbo secundária. (Adaptado de Kreuzsch *et. al.*, 2007)

Elemento	(%)
Pb	82.28
Cl	9.55
Fe ₂ O ₃	2.85
K ₂ O	1.53
SiO ₂	0.65
Sn	0.61
Zn	0.54
P ₂ O ₅	0.42
CaO	0.36
Sb	0.34
Nd	0.22
As	0.21
Zr	0.19
Br	0.18
Se	0.04
Al ₂ O ₃	0.03
Rb	0.01
Total	~100.00

Uma pesquisa conduzida por Cashdollar *et al.*, (2007) avaliou a explosividade de vários metais incluindo o chumbo, o qual não provocou aumento de pressão. Cabe ressaltar que em seu trabalho, Cashdollar *et al.*, concluíram que a concentração de chumbo, 3600g/m³, utilizada nos testes era muito elevada.

O chumbo, além de todo o seu potencial danoso à saúde e ao meio ambiente, na forma de particulado finamente disperso no ar, respeitando o pentágono da explosão, é considerado explosivo, sendo classificado dessa forma por diversos órgãos internacionais como o *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH), Organização Internacional do Trabalho (OIT), *United Nations Environment Programme* (UNEP) entre outros. Essa informação está contida em um documento de informação de segurança conhecido como, *International Chemical Safety Cards* ICSC: 0052 o qual se encontra no anexo “A” deste trabalho.

No Brasil, as empresas de fundição de chumbo secundária são em sua grande maioria, de pequeno e médio porte, e nelas, em geral, o quesito segurança sempre fica em segundo plano, tornando assim o ambiente mais perigoso aos trabalhadores.

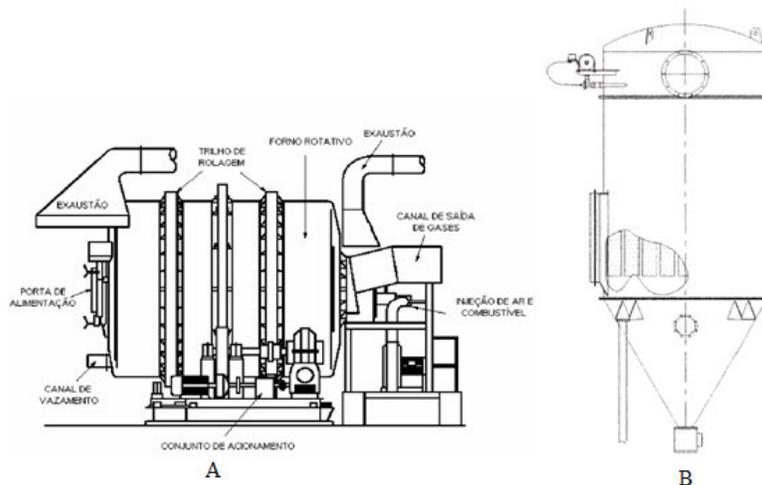


Figura. 1.3: (A) forno rotativo, (B) coletor de poeira do tipo filtro manga (Adaptado de Zalosh *et al.*, 2005).

A seguir são apresentados os objetivos desse trabalho juntamente com seus objetivos específicos, a terceira parte da dissertação apresenta as revisões bibliográficas. Dando prosseguimento, na quarta parte desse trabalho são apresentados os seguintes modelos matemáticos: ignição de uma partícula metálica; temperatura de ignição de uma nuvem de aerossol e propagação da queima de partículas em coordenadas esféricas. Na quinta seção o experimento de bancada é apresentado, juntamente com os materiais utilizados para a sua fabricação e a metodologia empregada, em seguida os resultados obtidos para a parte experimental e a modelagem matemática para, ignição de uma partícula metálica, temperatura de ignição de uma nuvem de aerossol e propagação da queima de partículas em coordenadas esféricas, são apresentados e discutidos. A sétima parte dessa dissertação é reservada para as conclusões e recomendações.

2.OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi verificar parâmetros relacionados com a explosividade do chumbo na forma de particulado, parâmetros esses como: temperatura de ignição; temperatura da superfície da partícula; comportamento da capa de óxido e propagação da chama.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- .1. Modelar matematicamente a queima de uma partícula e de uma nuvem de particulado metálico, empregando-se dados específicos do chumbo, alumínio titânio e magnésio;
- .2. Modelar matematicamente a propagação da frente de chama em coordenadas esféricas para uma nuvem de particulado metálico, empregando-se dados específicos do chumbo, alumínio titânio e magnésio;
- .3. Projetar e construir uma bancada para avaliação da velocidade de propagação da frente de chama e da ignição das partículas proveniente do filtro mangas de uma recicladora de chumbo;
- .4. Realizar os testes e confrontar os resultados teóricos com aqueles obtidos experimentalmente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. PROCESSO DE RECICLAGEM DO CHUMBO E GERAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO

O processo de reciclagem do chumbo é constituído de várias etapas que têm os seguintes objetivos:

- Separar os materiais passíveis de se reciclar,
- Separar o chumbo de outros metais e contaminantes e,
- Minimizar a emissão de poluentes.

O passo inicial para a reciclagem é a separação dos componentes das bateria. Existem dois tipos de separação, hidráulico e manual.

No processo de separação hidráulico, o ácido sulfúrico contido no interior da bateria é recolhido e neutralizado. A bateria passa por trituração para possibilitar a liberação dos componentes. A separação dos componentes é feita através de suas propriedades físicas tais como tamanho, área e densidade das partículas. São utilizados como método de separação, o peneiramento e a separação hidráulica.

Phillips e Lim (1998), descrevem um processo de separação hidráulica onde a bateria é triturada e passa por um vibrador que separa a pasta e o ácido dos componentes. Em seguida o material passa por um hidrosseparador que extrai, por densidade, a grelha metálica e o polipropileno. O efluente gerado no hidrosseparador é levado para uma peneira, na qual é recolhido o polímero originário do envelope. Posteriormente o ácido sulfúrico (H_2SO_4), e a pasta, são dessulfurizados. Para isso, o material recebe hidróxido de sódio (NaOH) ou carbonato de sódio ($NaCO_3$), que reage com os íons sulfato (SO_4) contido na pasta e no ácido, formando sulfato de sódio (Na_2SO_4). A pasta dessulfurizada é extraída por filtração e a fase líquida é depurada e cristalizada permitindo a separação do sulfato de sódio produzido e o efluente líquido.

Outra forma de separação desses componentes consiste no processo manual. As tampas das baterias são separadas das caixas utilizando-se serras, a Fig.3.1a mostra as serras responsáveis pelo corte das baterias. Em seguida o ácido é drenado e recolhido em reservatório onde o mesmo de acordo com Phillips e Lim (1998) o ácido sulfúrico (H_2SO_4), é dessulfurizados. Para isso, o material recebe hidróxido de sódio (NaOH) ou carbonato de sódio ($NaCO_3$), que reage com os íons sulfato (SO_4) contido na pasta e no ácido, formando sulfato de sódio (Na_2SO_4). Após a drenagem, as placas são retiradas das caixas, (Fig.3.2b), sendo que nesse processo de separação as placas permanecem inteiras. A tampa e a caixa são posteriormente trituradas, empacotadas e enviadas para unidade de reciclagem.



Figura. 3.1: (a) serras para o corte das baterias, (b) a parte metálica da bateria

Depois de separados da parte metálica, o material polimérico que constitui a bateria é picado e sofre outra separação, feita através da diferença de densidade entre os diversos polímeros, que resulta em uma fração de polipropileno e outra, que pode ser composta de ebonite, baquelite e envelopes separadores de polietileno.

A Fig.3.2 mostra o equipamento responsável pela trituração das caixas das baterias e separação da parta polimérica e do que restou da parte metálica e do acido.



Figura. 3.2: Máquina responsável pela trituração das partes plásticas da bateria.

A obtenção do chumbo secundário a partir da fração metálica previamente separada, (Fig.3.1b). Essa fração metálica é constituída de grelha e pasta que foram separadas na etapa anterior.

De acordo com Guerrero *et al.* (1997) a parte metálica da bateria é composta de aproximadamente 40% de liga de chumbo e 60% de óxido de chumbo. Esta sucata é levada ao forno juntamente com ferro e carvão, e em alguns casos, o carbonato de sódio (Na_2CO_3) é adicionado, de acordo com Lewis e Beutement (2001), com a função de diminuir o ponto de fusão e a viscosidade do material fundente. Através da fundição, os compostos de chumbo são reduzidos a chumbo elementar, cujo processo requer alta temperatura (acima de 1000°C) e atmosfera redutora.

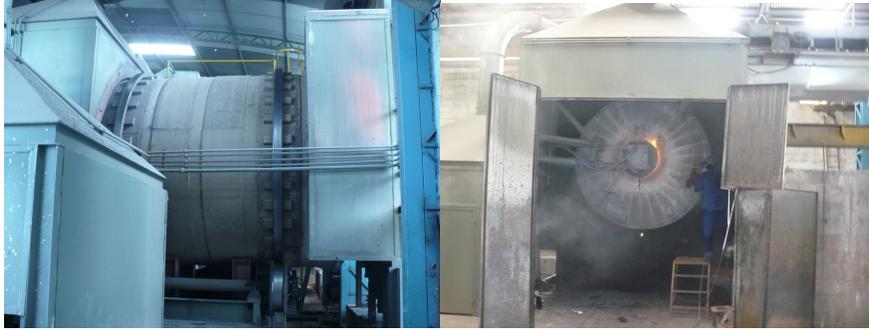


Figura. 3.3: Mostra a lateral e a frente de um dos fornos rotativos, o qual é todo fechado para a captura dos gases e aerodispersóide.

No armazenamento das frações metálicas, ferro, carvão e os demais reagentes químicos ficam estocados em baias ou depósitos. Estes componentes são levados a dois fornos rotativos (Fig.3.3) através de uma esteira. A carga é composta da sucata metálica da bateria, à qual é adicionada 5% de soda, 5% de redutor, antracito ou carvão vegetal e 5% de aço. O aço reage com $PbSO_4$ formando $FeSO_4$, parte do SO_4 se transforma em SO_2 que reage com o $NaCO_3$ formando Na_2SO_4 . O carregamento do forno rotativo é feito em duas etapas. Na primeira, 4 toneladas da mistura citada anteriormente são colocadas no forno, fundindo por 2 horas e o chumbo convertido é drenado, (Fig.2.4). Na segunda etapa, mais 2 toneladas da mistura são carregadas e fundidas por mais 2 horas. Após esse tempo, o chumbo reduzido e a escória, constituída de $FeSO_4$, Na_2SO_4 e 3% ou mais de chumbo. O chumbo na forma líquida é colocado em cadinhos onde são resfriados e seguem para área de refino (Guerrero *et al.*, 1997).



Figura. 3.4: Processo de drenagem do chumbo após sua redução.

O efluente gasoso passa através de trocadores de calor, (Fig.3.5a), depois vai para a unidade de filtros mangas, (Fig.3.5b), onde o material particulado fica retido e cai no fundo do reservatório, sendo transportado por uma rosca transportadora, até um galpão sem sistema de ventilação, somente com uma entrada para a Pá Carregadeira, (Fig.3.5c).

A Fig. 3.5 mostra o processo de tratamento do gases e particulados proveniente do forno rotativo e a geração e armazenamento do material particulado.



Figura. 3.5: (a) Sistema de resfriamento dos gases provenientes do forno rotativo, (b) Sistema de filtros mangas (c) local de armazenado do material particulado retirado do filtro mangas.

3.2 A EXPLOSÃO E SEUS ACIDENTES HISTÓRICOS

Em 1766, Cavendish obteve hidrogênio pela reação de ácido clorídrico e ácido sulfúrico com vários metais tais como zinco, ferro e estanho. Algumas de suas pesquisas mais famosas englobam a composição do ar, da água e também a do ácido nítrico. Durante a pesquisa para descobrir a composição da água, ele sofreu acidentes, por diversas vezes, explosões de recipientes nos quais ele misturava oxigênio e hidrogênio, (Cardillo, 2001)

No mesmo trabalho, Cardillo (2001) relata a descoberta acidental de SO_2 feita por Priestley no final do século XVIII, ao tentar obter SO_2 pelo aquecimento do ácido sulfúrico. Devido a uma falha no reator houve um aumento de pressão seguido de uma explosão.

Em Turim, Itália 1785, a explosão de um silo de farinha de trigo foi investigada. Esta foi a primeira investigação técnica de uma explosão com aerodispersóide na literatura (Cardillo, 2001).

A reconstituição do acidente feita por ele, considerando o que sabemos hoje em dia, pode parecer um pouco ingênua, visto que Morozzo considerava que a ignição se relacionava a um gás inflamável gerado pela farinha, sem dar muita importância ao papel da propagação da explosão pelas partículas de farinha suspensas no ar.

Naquele tempo, a inflamabilidade do hidrogênio, metano e outros gases combustíveis já era conhecida pela comunidade científica, mas poucos cientistas poderiam considerar a possibilidade da explosão por um aerodispersóide.

No século XVII, o carvão foi a principal fonte de energia, em relação a outras. Na Grã-Bretanha os riscos relacionados à mineração do carvão eram conhecidos em parte, pois nesta época só se conhecia a inflamabilidade do metano. Pensava-se que quando ocorria uma explosão em uma mina, o causador era o gás metano.

A primeira pessoa a identificar o aerossol de carvão como sendo o causador de uma explosão em uma mina foi Michael Faraday quando, juntamente com um geólogo, Charles Lyell, produziram um relatório sobre o desastre em uma mina de carvão em Haswell em 1844, onde ocorreram 95 mortes, (Cardillo, 2001).

Em fevereiro de 1999, um incêndio e uma explosão mortal ocorreram em uma fundição em Massachusetts, USA, matando 3 pessoas e ferindo 9.

A investigação foi conduzida pela OSHA (*Occupational Safety Health Administration*), órgão federal norte-americano responsável pela saúde e segurança no trabalho. O relatório da investigação indicou que o início do incêndio se deu no interior de uma máquina de molde a partir de uma fonte desconhecida e propagando-se através dos dutos de ventilação que alimentavam um depósito contendo resina de formaldeído fenólico na forma de particulado.

Uma pequena deflagração inicial ocorreu no duto, suspendendo a poeira que estava depositada. Em seguida a nuvem de aerossol formada forneceu combustível para a segunda explosão a qual foi suficientemente poderosa para levantar o telhado e causar rachaduras nas paredes e a morte de trabalhadores, (Brown, 1925).

Em janeiro de 2003, um incêndio seguido de uma explosão devastadora destruiu uma indústria farmacêutica na Carolina do Norte, Estados Unidos, que manufacturava látex. Seis empregados foram mortos e 38 pessoas saíram feridas, incluindo 2 bombeiros.

A Comissão de Investigação de Riscos e Segurança Química dos Estados Unidos (CSB), uma agência federal independente, assumiu a investigação do acidente, concluindo em seu relatório final que o acúmulo de uma nuvem de aerossol de polietileno causou a explosão. Em razão da intensidade dos estragos provocados pela explosão, a CSB foi incapaz de determinar a fonte de ignição e como o particulado foi disperso (Brown, 1925).

De acordo com o Pritchard. (2004), em Fevereiro de 2003, uma indústria que produzia isolamento acústico no Kentucky, Estados Unidos, foi cenário de outro acidente fatal provocado pela explosão de uma nuvem de aerossol, matando 7 trabalhadores e ferindo 37.

Novamente a CSB investigou o caso. Seu relatório cita o provável local da ignição com um pequeno incêndio de uma fornalha a qual inflamou a nuvem de particulado criada pela proximidade dos dutos de exaustão. A isso se seguiram uma sequência de explosões catastróficas através de toda a indústria.

De acordo com o OSHA (2005), particulado metálico finamente dividido e disperso no ar pode explodir quando confinado em um vaso, recipiente ou prédio. Em outubro de 2003, nos Estados Unidos, uma planta industrial em Indiana, que produzia rodas de automóveis, foi cenário de um incidente que provocou a morte de um trabalhador e feriu outro.

Na investigação, também conduzida pela OSHA (2005), o relatório concluía que a explosão de uma nuvem de um aerossol metálico foi provocada por uma primeira explosão de uma nuvem desse particulado, ocorrida perto do forno de fundição. Em seguida, o fogo propagou-se através do duto de exaustão até o equipamento coletor de poeira (filtro manga), conseqüentemente havendo uma segunda explosão muito mais forte e devastadora.

3.3 DEFLAGRAÇÃO E DETONAÇÕES

Uma explosão pode ser classificada de duas formas, detonação e deflagração. Eckhoff (2003) distinguiu a duas classes de explosão da seguinte forma: a primeira é a deflagração que possui uma velocidade de frente de chama subsônica que pode ir de 1m/s a 1000m/s, enquanto a segunda, a detonação, atinge uma velocidade supersônica igual ou maior que 2000m/s.

A forma mais severa de uma explosão é a detonação. Na detonação, uma onda de choque se antecipa à explosiva. Essa onda de detonação tem propriedades bem definidas. De acordo com Lees (1996), a onda de detonação pode se desenvolver por um processo de transição. Essa transição pode ser ilustrada pela combustão de uma mistura de gás inflamável com ar em um tubo, o qual é inicialmente à pressão constante.

Segundo Lees (1996), se ocorrer a ignição e a energia for liberada do começo ao fim do tubo, os gases da queima se expandem, e a frente de deflagração move-se a uma velocidade igual a do som. Se a velocidade de chama for suficientemente baixa, a combustão continua à pressão constante, mas se a velocidade da chama for alta o suficiente para um efeito significativo na velocidade de propagação, perturbações na pressão são criadas. Nesse caso a aceleração da frente de chama pode alcançar alta velocidade e se transformar de deflagração a uma detonação. A onda de detonação então transporta-se com uma velocidade maior do que a do som através dos gases não queimados.

Segundo Wingerden e Stavseng (1996), a onda de detonação foi observada experimentalmente há mais de 100 anos atrás. Chapman e Jouguet foram os primeiros a descrever uma onda de combustão supersônica. A teoria de Chapman-Jouguet (CJ) trata a onda de detonação como descontínua e com infinitas taxas de reações químicas.

Durante a Segunda Guerra Mundial, Zeldovich, Von Neumann e Döring (ZND) aprimoraram o modelo CJ pela introdução da taxa de reação. A teoria de ZND dá a mesma velocidade e pressão de detonação da teoria de CJ. A diferença entre as duas teorias é a espessura da onda de detonação, ou onda de choque como nomeada pelo modelo de ZND, (Lees, 1996).

Como apontado por Lee (1987), não existe, a priori, razão para assumir que a teoria clássica de Chapman-Jouguet para detonação, a qual tem sido com êxito aplicada para uma pré-mistura de gases explosivos, sólidos e líquidos, não é aplicável para uma mistura explosiva de materiais particulados sólidos dispersos no ar. Essa teoria, desenvolvida independentemente por Chapman e Jouguet, prediz a velocidade de detonação, temperatura, pressão e concentração dos produtos de reação.

Segundo Eckhoff (2003), as diferenças feitas entre os experimentos realizados por Chapman e Jouguet foram: Chapman, de forma simples, postula que uma frente de detonação é uma onda de choque que impulsiona em sua trilha de reações químicas e que supre a energia requerida para manter uma estável propagação da onda de choque através do gás explosivo. Jouguet trabalhou segundo esse modelo, mas a sua abordagem ligeiramente diferente revelou a mais importante conclusão: de que a velocidade da onda de detonação iguala-se a velocidade do som nos produtos de reação imediatamente atrás da onda de choque.

A teoria CJ é relacionada somente com sistemas simples, baseado em um gás homogêneo não reativo em condições iniciais, e os correspondentes produtos da reação. A teoria resulta das três equações da continuidade, conservação da massa, momento e energia, e mais uma, a equação de estado (Eckhoff, 2003).

3.4 EXPLOSÕES DE AEROSSOL

Segundo Eckhoff, (2003), o fenômeno chamado poeira de explosões é, na realidade, bastante simples e fácil de entender, em termos de experiência da vida cotidiana. Qualquer material sólido que possa queimar terá um aumento na sua velocidade com o crescente grau de subdivisão do material. A Fig. 3.6 (a) ilustra como um pedaço de madeira, uma vez inflamado, queimará, lentamente, liberando o seu calor durante um longo período de tempo. Quando cortados em pedaços pequenos, como ilustrado na Fig. 3.6 (b), aumenta a taxa de combustão, porque a área total de contato entre a madeira e o ar foi aumentada.

Além disso, a ignição de madeira tornou-se mais fácil. Se a subdivisão continuar até ao nível de pequenas partículas de dimensões da ordem de 0,1mm ou menos, e as partículas estiverem suspensas em um grande volume de ar suficiente para dar a cada partícula espaço suficiente para a sua queima irrestrita, a taxa de combustão será intensa, tornando-se uma nuvem de material particulado explosivo.

O número de subdivisão do sólido pode ser expresso em termos, ou de seu tamanho de partículas característico, ou da área superfície total por unidade de volume ou unidade de massa de sólido. A última característica é chamada de área superficial específica dos sólidos subdivididos (Eckhoff, 2003).

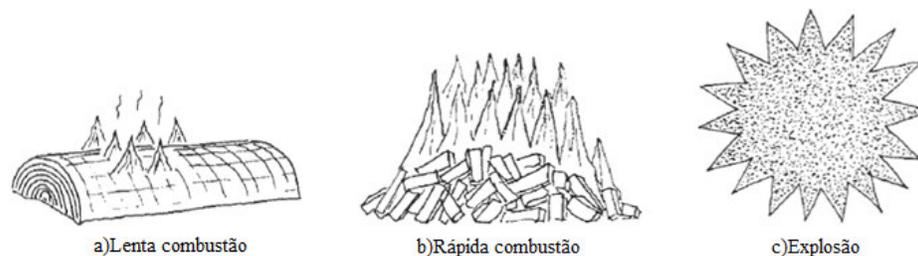


Figura 3.6: Ilustração do aumento da velocidade de combustão de uma dada massa de um combustível sólido aumenta com o acréscimo de sua subdivisão, (Adaptada de Eckhoff, 2003).

A primeira tentativa para descobrir a concentração de mínima e máxima explosividade para uma nuvem de aerossol foi desenvolvida por Jaeckel (1924), que considerava a transferência de calor em uma dimensão de uma frente de chama plana para uma camada adjacente da nuvem de aerossol não queimada. A mínima concentração de explosividade, de acordo com Jaeckel, é a mínima quantidade de particulado, por unidade de volume da nuvem de aerossol, que pela queima completa libera energia suficiente para aquecer o próximo volume de nuvem de aerossol até sua temperatura de ignição.

De acordo com Jaeckel, a concentração de explosividade máxima decorre do fato de que o ar contém uma quantidade limitada de oxigênio, a qual é totalmente consumida pela combustão completa de uma dada quantidade de aerodispersóide em concentração estequiométrica. Um aumento da concentração de poeira, tem apenas o efeito de aumentar a energia que é necessária para o aquecimento do próximo volume para a temperatura de ignição, considerando que o excesso de particulado atua apenas como um dissipador de calor.

Dreizin e Hoffmann (1999) analisaram a combustão à pressão constante de nuvens de aerossol constituída somente por magnésio, com uma granulométrica elevada (diâmetros de 100 – 300 μ m). Através da análise

das várias imagens empregadas para extrair informações das estruturas da chama, utilizando uma filmagem em alta velocidade, a combustão das partículas de magnésio foi assim identificada e definida. Com isso, Dreizin e Hoffmann (1999) observaram a estrutura da chama, incluindo o pré-aquecimento e a típica zona de combustão de um aerossol inflamável. A zona de combustão e o pré-aquecimento foram identificados pela diferença na intensidade e aspecto da emissão de radiação. A velocidade de propagação da zona de aquecimento na mistura de gases não queimados foi da amplitude de 0,15 a 0,30m/s. A propagação da zona de combustão se deu em uma taxa menor do que 0,1m/s (Fig. 3.7).

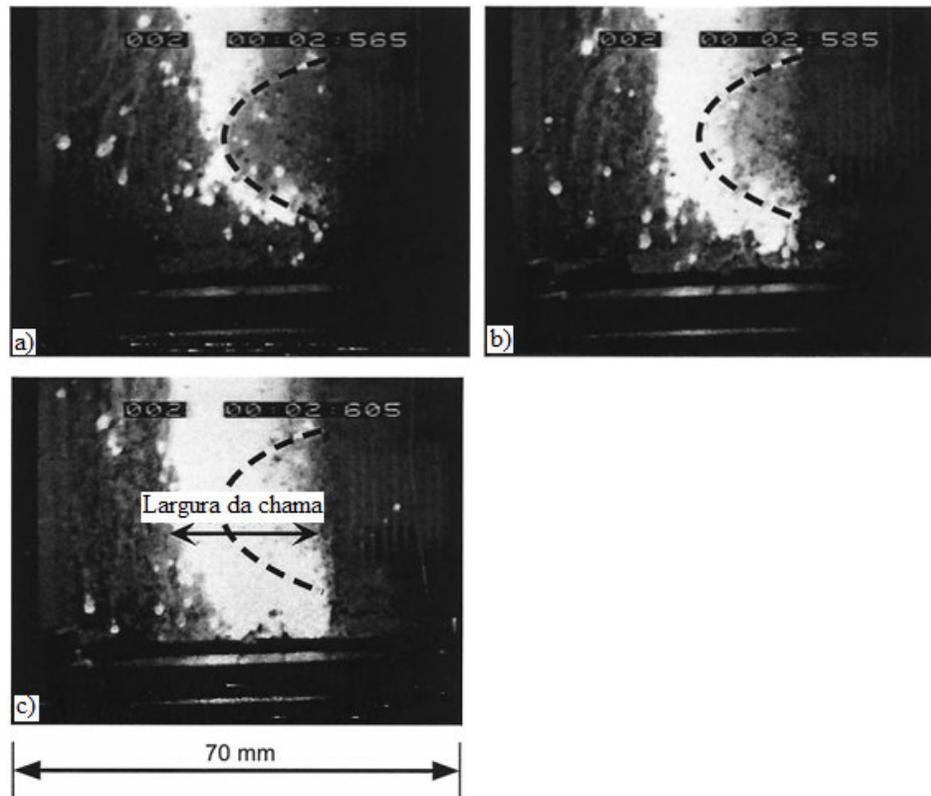


Figura 3.7: Mostra a combustão de nuvem de aerossol de magnésio: a linha tracejada indica a posição de fio de tungstênio utilizado como fonte de ignição; as sequências a, b e c mostram o aumento na largura da chama (adaptado de Dreizin e Hoffmann 1999).

3.4.1 Explosão de Aerossol Via Testes Laboratoriais

Vários produtos químicos novos são inventados todos os anos, e inúmeros já existentes são processados e utilizados de novas maneiras, como na forma de um particulado muito fino. Por isso, testes laboratoriais são necessários para descobrir se o material em questão pode ser um aerossol explosivo ou não.

Ural (1989) revisou a literatura sobre metodologia de testes relacionados com a dispersão de material particulado. Um método destacado por ele, consistia da seguinte metodologia: Dois centímetros cúbicos de material particulado eram vertidos através de uma estreita fenda vertical em um tubo de 2,5m de altura e 45mm de diâmetro. As partículas eram separadas no ar à medida que caíam através do tubo, após 6 segundos todo o material que chegava ao final do tubo era retirado. As partículas que não atingiram o fundo do tubo no tempo estipulado foram consideradas por Andreasen como sendo o número que representava a porcentagem de dispersam do material.

No entanto, Ural (1989) conclui que algumas das propriedades do material poderiam ter causado sua aglomeração, o que faria com que este material caísse mais rápido, ou se fixasse na parede do tubo.

O processo de dispersão de um material particulado não é tão simples quanto parece. Vários fatores podem influenciar a dispersão, como por exemplo, tamanho e forma das partículas. A umidade atmosférica influencia em sua aglomeração, e a carga eletrostática faz com que as partículas se unam às paredes de um silo.

Segundo Eckhoff (2003), antes de dar início a testes mais específicos e caros, às vezes é desejável considerar a execução de um ensaio introdutório para determinar se o aerossol em questão pode produzir uma nuvem explosiva ou não. Isso é feito através de uma verificação visual, uma avaliação qualitativa do material químico particulado, permitirá saber se este poderá ou não produzir uma nuvem de material particulado em uma concentração que, na presença de uma fonte de ignição, inflamará e conseguirá propagar uma chama autossustentável. Se não for este o caso, o material particulado poderá ser excluído de testes mais caros e desnecessários.

Normalmente, no primeiro momento, o aerossol testado encontra-se no estado em que foi recebido no laboratório, como excesso de partículas maiores que $1400\mu\text{m}$ que devem ser removidas por processo de peneiramento. No entanto, se após esse processo, a nuvem de aerossol não propagar a chama autossustentável, a amostra é seca a 105°C por 1 hora e realiza-se novamente o teste. Se a propagação da chama continuar não ocorrendo, a amostra seca é separada em frações de tamanhos diferentes e novamente testada; caso não funcione, o material pode ser considerado não explosivo (Eckhoff, 2003).

A *American Society for Testing and Materials* desenvolveu um método de ensaio para determinar as temperaturas limites de inflamabilidade de produtos químicos em geral, e que inclui também um procedimento de testes para material particulado (Eckhoff, 2003).

Uma amostra com volume de 50cm^3 é colocada no fundo de um recipiente esférico de vidro, de volume igual a 5 litros. Este recipiente é mantido a uma temperatura em elevação por um fluxo de ar aquecido que passa através de uma manta aquecedora em que o frasco é colocado. Um agitador magnético garante que o gás que é produzido pelo aquecimento seja misturado constantemente com o ar contido no recipiente de vidro. Deste modo, existe uma concentração de gás razoavelmente homogêneo em todo o recipiente. A inflamabilidade da mistura gás/ar é testada por

meio de uma faísca elétrica descarregada perto do centro do recipiente (Eckhoff, 2003).

A Fig. 3.8 mostra o equipamento para teste, denominado, método-rápido, proposto por Eckhoff (2003), onde são colocados 4 tubos de ensaio com o mesmo tipo de material particulado. Esses tubos ficam em uma base aquecida.

O tubo de ensaio (a) é usado para recolher os gases de queima para outras finalidades de teste.

O tubo de ensaio (b) permite um simples teste direto e rápido. A base que suporta o tubo de ensaio é aquecida até uma determinada temperatura, produzindo uma quantidade de gases que são inflamáveis ou não, no topo do tubo de ensaio.

Os tubos de ensaio (c) e (d) permitem a detecção de qualquer decomposição exotérmica do material particulado em uma temperatura selecionada.

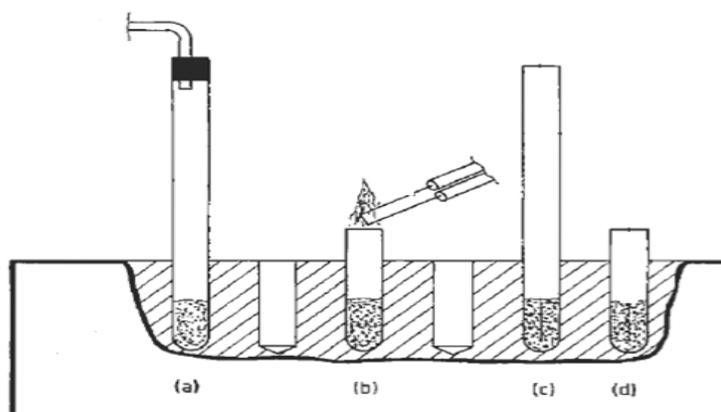


Figura 3.8: Equipamento de teste para avaliação da temperatura de inflamabilidade dos gases produzidos pela decomposição exotérmica (Adaptado de Eckhoff, 2003).

Nos Estados Unidos, como descrito por Dorsett *et al.* (1960), a temperatura de ignição de uma nuvem de aerossol em contato com uma superfície quente é tradicionalmente determinada no forno de Godbert-Greenwald (Fig.3.9). Neste aparelho, a superfície interna de um tubo cilíndrico de material cerâmico colocado na vertical, com a extremidade inferior aberta. A temperatura conhecida é mantida constante no interior do cilindro e uma amostra de material particulado é dispersa como uma nuvem para dentro do tubo, de cima para baixo, por um sistema de ar comprimido. A temperatura da parede interna do tubo é automaticamente controlada, podendo ser alterada até que a temperatura mínima de ignição fosse identificada.

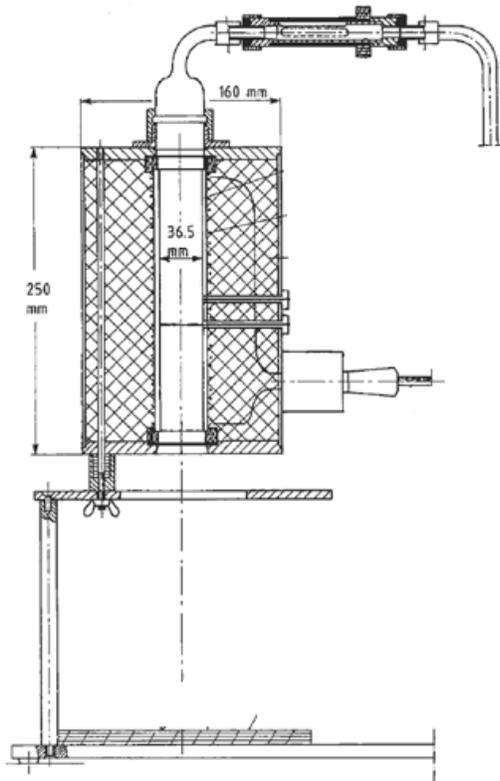


Figura 3.9: Modelo de forno de Godbert-Greenwald
(Adaptado de Eckhoff, 2003).

Cashdollar e Zlochower (2007), avaliaram a explosividade de vários metais e outros elementos na forma de nuvem de aerossol dispersa em ar. Os materiais particulados incluem: bromo, carbono, magnésio, alumínio, silicone, enxofre, cromo, titânio, ferro, níquel, cobre, zinco, nióbio, molibdênio, estanho, háfnio, tântalo, tungstênio e chumbo. Todos esses elementos foram separados por propriedades químicas similares, como mais voláteis e menos voláteis. Os testes de inflamabilidade foram conduzidos em uma câmara de explosão de 20 litros, (Fig. 3.10). Utilizando como fonte de ignição um explosivo pirotécnico, localizado no centro da câmara de teste. Os dados obtidos experimentalmente de máximo aumento de pressão e máxima temperatura de explosividade foram comparados com os valores calculados numericamente, de máxima pressão adiabática e máxima temperatura adiabática.

Em seu trabalho Cashdollar e Zlochower (2007) relatam que somente quatro desses materiais não explodiram, entre eles o chumbo, que foi utilizado neste experimento com um diâmetro médio da partícula de $40\mu\text{m}$ e uma fonte de ignição de 5000 Joules. Os autores concluem que os motivos que levaram a não explosão do material foram, o valor da máxima concentração adiabática, 3600g/m^3 , que é muito alto, e a máxima temperatura adiabática, 1830K que é provavelmente muito baixa para sustentar a reação nessa concentração.



Figura 3.10: Foto de uma bomba de 20 litros para teste de explosão, (Adaptado de Eckhoff, 2003).

3.5 MECANISMOS DE COMBUSTÃO DE UMA PARTÍCULA

Para um melhor entendimento dos mecanismos envolvidos em uma explosão, é necessário o entendimento do processo de combustão de uma única partícula.

Segundo Eckhoff (2003), um dos primeiros estudos sobre a queima de uma partícula foi realizado por Nusselt em 1924, quando propôs que a oxidação de um carbono puro fosse essencialmente uma conversão direta do carbono sólido em dióxido de carbono na superfície da partícula.

Gomez e Vastola (1985) compararam a ignição e a combustão de uma partícula de carvão e uma coque em um reator de fluxo pistonado, pelo cálculo da concentração de CO e CO₂ na corrente de gás a jusante, como uma função do tempo. Carvão sub-betuminoso contendo 22% de umidade, 4,6% de cinzas, 33,8% de voláteis e 39,6% de carbono, foi utilizado no estudo. Para cada análise, uma partícula selecionada de tamanho entre 850 a 1000µm era injetada em um forno, utilizando ar com oxidante da reação. O experimento foi conduzido em cinco temperaturas: 928K, 980K, 1076K, 1118K e 1273K. Para cada faixa de temperatura um tipo de análise foi desenvolvida.

A conclusão que extraída de Gomez e Vastola (1985), é que duas reações químicas ocorrem na combustão de uma partícula de carvão. A reação é divididas em duas, totalmente diferentes em natureza: uma, envolve os voláteis liberados pela pirólise do carvão, reação homogênea e a outra, na superfície do carbono, reação heterogênea.

Froelich et al. (1987) estudaram a combustão de partículas de carvão com diâmetros de 80 a 100µm, 30% de material volátil, e o ar foi utilizado como oxidante em uma temperatura de 1400K. Seus experimentos determinaram a relação entre temperatura da partícula e o tempo de permanência no forno.

A taxa de gaseificação da partícula de carvão e do carbono sólido, após cinco milésimos de segundo (ms) no forno, e sua temperatura, atingiram um pico de 2200K, que foi atribuída à volatilização e ignição dos voláteis. Um segundo, aumento de temperatura, menos acentuado, o qual se inicia em 10ms e termina em 60ms, apresentando um pico da temperatura por volta de 1800K, foi associado à combustão do carbono sólido.

3.5.1 Mecanismos de Combustão de uma Partícula Metálica

A combustão de uma partícula de alumínio em um gás aquecido e com variação da concentração de oxigênio foi estudada por Friedman e Macek (1963). Eles concluíram que a combustão somente ocorre após fusão do óxido que recobre a partícula (ponto de fusão 2300K.)

Na década de 60 Cassel realizou experiências somente com partículas de alumínio de 60 μ m de diâmetro. As partículas inflamaram a uma temperatura de 2570K. Cassel ainda observou que, após 2ms, tempo de aquecimento da partícula para ignição, ocorreu uma zona de queima centralizada, com diâmetro aproximadamente de nove vezes o diâmetro original da partícula, desenvolvida ao redor da mesma. Depois de 3ms, o envoltório de óxido mostrou um descolamento, mas depois se tornou alongado e progressivamente transformou-se em um cilindro de comprimento superior a 10 vezes o seu diâmetro. Esta expansão do envoltório de óxido ou filme de óxido ocorreu no estado líquido (Eckhoff, 2003).

Razdobreev *et al.* (1976) estudaram a ignição e combustão de uma partícula de alumínio de diâmetros de 230 a 680 μ m, aquecida por um laser com fluxo aproximadamente de 150W/cm². Com esse fluxo, a partícula somente se funde. Para a ignição, foi necessário um fluxo mais alto do que 250W/cm². O coeficiente de reflexão não foi mensurado, mas assumido em torno de 96 a 50%, o que significa que a metade do fluxo de luz incidente foi absorvida pela partícula. O tempo adequado para a

ignição por aquecimento através da radiação foi: 100ms para uma partícula de tamanho de 230 μm , 270ms para partícula de diâmetro de 400 μm e 330ms para um diâmetro de 680 μm .

Ermakov *et al.* (1982) calcularam o temperatura superficial de uma partícula de alumínio de diâmetros de 400 a 1200 μm no momento de ignição. O aquecimento foi conduzido por um laser de comprimento de onda de 10,6 μm em um fluxo constante de incidência sobre a partícula na ordem de 1500 a 4500W/cm², mais alto do que o fluxo utilizado por Razdobreev *et al.* (1976).

A temperatura de ignição da partícula observada por Ermakov *et al.* (1982) foi avaliada por um termopar de tungstênio – rênio, cuja espessura de junção era de 18 a 20 μm e foi localizada no cento da partícula. Um microscópio com câmera fotográfica de alta velocidade, 4500 frames/s, foi utilizado juntamente com a avaliação de temperatura. A avaliação simultânea permitiu uma comparação detalhada da temperatura da partícula com o fenômeno físico observado na superfície da partícula. O aparecimento de uma chama na forma de uma língua em uma seção limitada da superfície foi notado a uma temperatura de 2070 \pm 50K. Com um aquecimento de 2170K, a chama em forma de língua, propagou-se por toda a superfície da partícula, e a temperatura permaneceu constante em 2170K durante queima subsequente.

Com isso Ermakov *et al.* (1982) concluíram que a temperatura de ignição obtida no experimento mostrou que a ignição não foi causada pela fusão da película de óxido, mas sim por sua destruição devido ao aumento das tensões provocado por termomecanismo durante o processo de aquecimento. Isso foi mostrado pelas fotos da superfície da partícula no instante do aparecimento da chama em formato de língua.

Dreizin (1996) assumiu em seu trabalho que, durante o processo de queima de uma partícula metálica há a formação de um sistema bifásico, oxigênio e alumínio (Al-O). Para isso, ele fez uso de um diagrama de fases (Fig. 3.11) como forma de explicar os resultados obtidos. Para a

produção das partículas ele utilizou a técnica de geração de uma partícula por um microarco elétrico, que será explicado mais adiante, (Fig.3.12).

O diagrama (Fig.3.11) proposto por Dreizin (1996) mostra a temperatura versus uma faixa de concentração de interesse, partindo do ponto “a” sobre o diagrama onde indica a ebulição do alumínio puro; o oxigênio é fornecido no trecho “ab”, (ebulição do líquido) e o trecho “ac” (gás) indica a mínima concentração de oxigênio na fase gasosa, ou o limite da concentração de oxigênio que pode ser alcançado no líquido quando ocorre uma rápida dissolução. Assim, o teor de oxigênio em um sistema contendo Al-O, pode exceder o limite de equilíbrio da solução indicado pelo ponto “b” (o qual é menos de 1%), mas deve ser sempre inferior à concentração correspondente ao ponto “c”, em torno de 14%. Quando a concentração do oxigênio aumenta, o ponto de ebulição do alumínio diminui 220°C, e no final, após as três fases (solução líquida de Al-O, Al₂O₃ líquida e gás) a temperatura de equilíbrio (aproximadamente 2240°C, trecho “bce” na Fig. 3.11) é atingida, e a alumina (Al₂O₃) começa a se formar. Assim, a gota metálica queimada é constituída de duas fases: uma, essencialmente de alumínio puro (ponto b) e, alumina (ponto e). A temperatura da gota é assim limitada pelo nível de equilíbrio “bc”, ou seja, aproximadamente 2240°C. A temperatura pode ser alta ao redor da superfície da partícula e a fase vapor correspondente também possui dois componentes, apresentado no diagrama pelo trecho “ac” e “dc”. De fato, o novo componente da fase vapor “dc” é a alumina vaporizada, a qual é normalmente constituída de moléculas de espécies de subóxido AlO e Al₂O. Sua pressão parcial de vapor aumenta rapidamente de 0,01 para 0,15atm quando a temperatura aumenta de 2350°C para maiores ou iguais a 2500°C.

Considerando essas mudanças inferidas pelo diagrama de fase Al-O, Dreizin (1996) sugeriu que a transição durante a combustão ocorre quando a concentração do oxigênio atômico dissolvido na partícula de alumínio alcança o limite de solubilidade (de 14% para uma rápida dissolução) e a gota atinge, assim, o equilíbrio das três fases (2240°C).

Assim, a composição da gota é transformada de uma solução de Al-O para uma mistura de dois líquidos: um composto de alumínio quase puro (maior parte da gota metálica) e a segunda de Al_2O_3 .

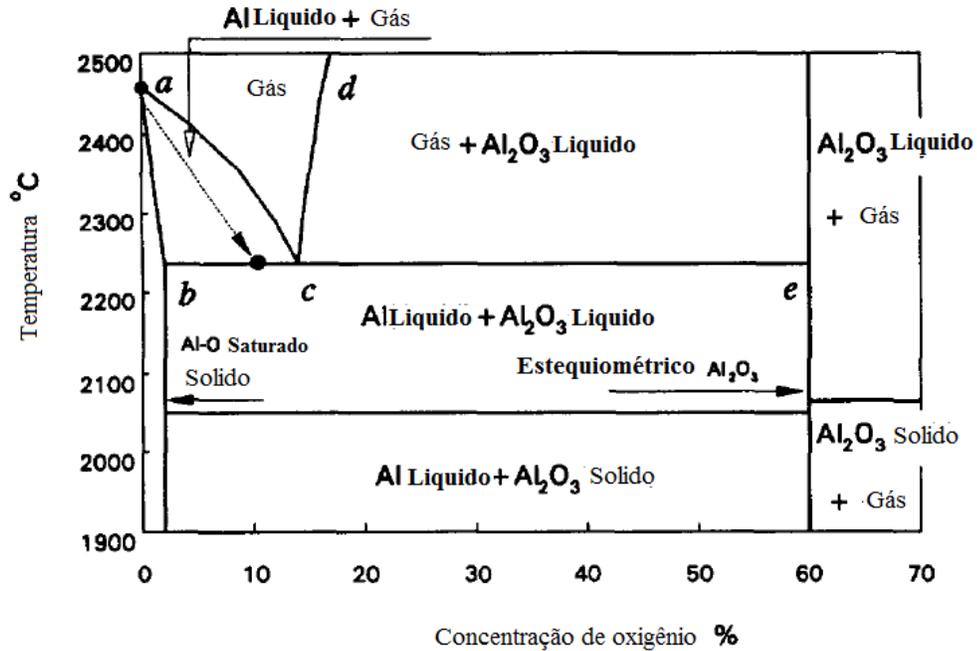


Figura 3.11: Diagrama de fase, equilíbrio binário de Al-O na pressão de 103Pa, (Adaptado de Dreizin, 1996).

Dreizin (1999) estudou a combustão de uma partícula de alumínio em diferentes tipos de atmosfera, as quais foram: nitrogênio mais oxigênio (N_2/O_2), argônio mais oxigênio (Ar/O_2), hélio mais oxigênio (He/O_2). Sua pesquisa focou na identificação das condições sobre as quais se desenvolve uma combustão assimétrica de uma partícula de alumínio e também ilustrou o comportamento da combustão da partícula de alumínio.

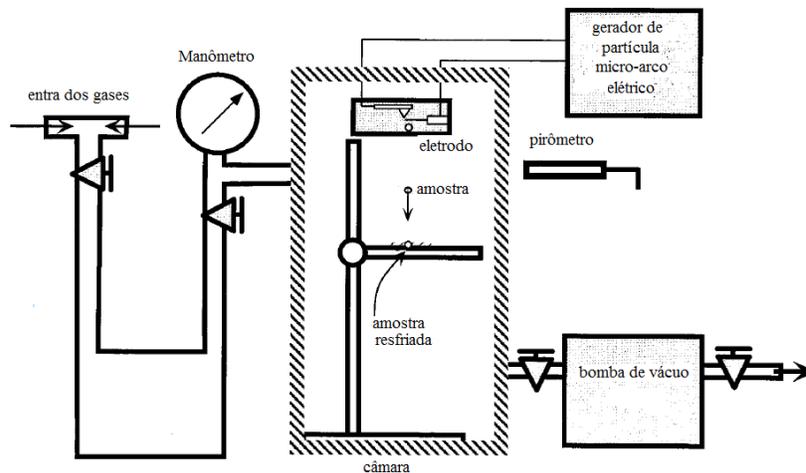


Figura 3.12: Esquema do equipamento para gerar micropartícula metálica incandescente. (Adaptado de Dreizin, 1999)

A técnica experimental utilizada por Dreizin (1999) em seu estudo foi baseada na geração de um microarco elétrico (Fig.3.12), que dispersa uma única gota metálica, com diâmetro de $90\mu\text{m}$ e $250\mu\text{m}$. A queima das partículas metálicas líquidas, que foram produzidas no equipamento, ocorreu dentro de uma câmara transparente com atmosfera controlada. Essas partículas foram rapidamente resfriadas, utilizando uma das três atmosferas anteriormente descritas. Após o resfriamento, sua superfície e interior eram examinados por microscópio óptico.

Com essa técnica, Dreizin (1999) notou uma oscilação no brilho inicial que apontava uma queima assimétrica da partícula. Essa oscilação foi notada em todas as atmosferas de O_2/N_2 , Ar/O_2 e He/O_2 . As partículas também tiveram sua capa de óxido analisadas, e em todas as capas de óxidos que foram analisadas, somente as partículas resfriadas em mistura de Ar/O_2 e He/O_2 , tiveram um filme de óxido marcadamente menor do que aquelas encontradas em partículas resfriadas com uma mistura de N_2/O_2 .

Utilizando um espectrômetro, Dreizin (1999) analisou a superfície e o interior das partículas parcialmente queimadas em diferentes tipos de atmosfera, detectou oxigênio dissolvido no interior de todas as partículas parcialmente queimadas, independente da mistura de gases utilizada para a queima. A análise da superfície e do interior das partículas foram somente efetuadas para aquelas com diâmetro inicial de 250 μ m.

As análises mostraram a presença de oxigênio no seu interior. Estas análises confirmam sua teoria proposta anteriormente, Dreizin (1996), sobre a presença de oxigênio no interior da partícula de alumínio, levando-o a propor a formação de um sistema binário Al-O com a finalidade de entender o comportamento da queima da partícula de alumínio.

Dreizin (2000), descreve a combustão de metais em 2 estágios: O estágio I, após a ignição, tanto a combustão da fase vapor quanto as dissoluções do oxigênio na queima do metal ocorrem simultaneamente. A importância da reação na fase vapor pode ser avaliada usando o critério de Glassman, baseado na comparação do ponto de ebulição do metal e de seu óxido. O critério de Glassman considera a queima de um metal como o de uma gota. À medida que o oxigênio pode ser dissolvido no metal, ele pode ser avaliado usando o diagrama de fase metal-oxigênio. A dissolução do oxigênio é um processo exotérmico que resulta na formação de uma nova fase contínua: uma solução metal-óxido que normalmente está no estado de equilíbrio para o sistema metal-óxido na alta temperatura de combustão do metal.

A exotermia da dissolução do oxigênio é sempre menor que a da oxidação, porque, quando a concentração de oxigênio aproxima-se da estequiometria do óxido e a temperatura decresce, o óxido torna-se termodinamicamente favorável à mistura e a solução metal-gás torna-se metaestável.

Além da adição do oxigênio, outros gases como nitrogênio podem ser frequentemente dissolvidos na queima da partícula metálica. No entanto, uma solução mais complexa, ternária, de metal-gás pode ser formada na queima da partícula desses complexos metal-oxigênio ou metal-nitrogênio. Por causa da pequena área de queima da partícula metálica (em torno de 100 micra ou menor, em muitas aplicações) e a rápida taxa de difusão do gás na alta temperatura do metal, a solução é bastante uniforme sobre o volume da partícula.

Quando a queima do metal se torna saturada com a dissolução do gás, a taxa de reação, tanto da superfície quanto a da fase vapor muda. Porque a solução saturada de metal-gás não pode absorver gases adicionais, a taxa de reação da superfície metal-gás decresce com a solução próxima da saturação.

A taxa de vaporização do metal é também afetada porque a temperatura de gaseificação (e.g. ponto de ebulição para metal puro) muda com a composição da solução metal-óxido. A mudança na taxa de vaporização em metal é muito evidente.

Assim, para metais com baixo ponto de ebulição, como Al e Mg, (ponto de ebulição para o alumínio puro é em torno de 200K maior que o da solução saturada Al-O) a taxa de mudanças causada por esse processo indica que o primeiro estágio de combustão está concluído.

No estágio II, descrito por Dreizin (2000), há o início do segundo estágio de combustão. Este foi associado com a mudança de fase ocorrida na queima da partícula metálica, e, esse estágio inicia-se quando a nova fase, tal como nova solução rica em oxigênio ou óxido estequiométrico, precipita da solução saturada metal-óxido do estágio I.

Se o limite de solubilidade do oxigênio for baixo (como o do Al e Mg), a solução saturada metal-óxido poderá ser formada após a ignição da partícula. Para metais capazes de dissolver quantidades significativas de gás (e.g. metais de transição), o processo de dissolução de oxigênio

continua até que a concentração de oxigênio dissolvido torne-se comparável à que contém na solução de óxido estequiométrico.

Se a solubilidade do oxigênio aumenta com a diminuição da temperatura, como para o Al, a composição da partícula queimada, segue o diagrama de fases após a solução saturada ser produzida e a temperatura da partícula é diminuída.

Como resultado de novas reações, um novo líquido é precipitado, rico em oxigênio. Se a solubilidade do oxigênio diminui com a diminuição da temperatura (como Zr, Ti, Cu), quando o equilíbrio do limite da solubilidade é atingido, a taxa de dissolução torna-se próxima de zero e a temperatura da partícula diminui rapidamente.

A solução formada em alta temperatura torna-se supersaturada quando a temperatura diminui. Um equilíbrio produz a transição de fase rica em gás e rico em metal. A fase tem início quando a temperatura de transição de fase não variante (ou seja, equilíbrio eutético, peritético ou monotético) em uma sistema metal-gás é alcançado.

Uma vez que a natureza metaestável da solução metal-gás existe a princípio na fase de transição, à liberação do calor que acompanha a transição de fase pode ser causada pelo aumento de temperatura da partícula.

Além disso, a espécie gasosa (*i.e.* nitrogênio dissolvido) pode ser liberada ao mesmo tempo e pode causar resfriamento da partícula, expansão, fratura e até explosão. Em todos os casos, a separação de fase produz uma queima não homogênea da partícula, tanto na superfície quanto internamente.

Trunov *et al.* (2005) estudaram o efeito da transformação da fase polimórfica no filme de óxido Al_2O_3 , formado na combustão de uma partícula de alumínio. Para isso, os autores usaram a termografia a fim de analisar a formação e o comportamento desta estrutura, utilizando, para

isso, partículas de tamanhos variados que foram aquecidas com oxigênio em diferentes taxas de aquecimento até o máximo de 1500°C.

As amostras parcialmente oxidadas foram selecionadas, a fase oxidada foi analisada por difração de raio X. Os dados experimentais foram confrontados com o estabelecido para a mudança de fase polimórfica do Al_2O_3 .

Durante o estágio 1, de 300 até 550°C, a espessura da camada naturalmente amorfa de alumina na superfície da partícula já existente, aumenta. A taxa desse processo é controlada pelo contra-fluxo difusivo do Al positivo.

Em torno de 550°C, quando a espessura da camada de óxido excede a camada crítica da alumina em torno de 4nm, há transformação do óxido em $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. O volume específico do $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ é menor do que o da alumina amorfa já existente, então, essa formação de $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ na superfície do Al se dá parcialmente.

A taxa de oxidação aumenta rapidamente no estágio 2, mas decresce quando a camada de $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ se torna contínua. Durante o estágio de oxidação 3, a camada de $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ aumenta e transforma-se parcialmente em uma estrutura do tipo $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ polimórfico. Finalmente, o estágio de oxidação 4 é observado antes da transição para o estágio $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, resultando em uma ruptura abrupta da capa de óxido.

4. MODELAGEM MATEMÁTICA

4.1. MODELO DE IGNIÇÃO DE UMA PARTÍCULA METÁLICA

Na temperatura ambiente, a superfície dos metais é coberta por uma fina camada de óxido. Conforme Fedorov e Kharlamova (2003), o processo de oxidação em alta temperatura, depende significativamente da espessura da camada de óxido.

A Combustão de uma partícula de magnésio foi reportada inicialmente por Cassel e Liebman na década de cinquenta, e depois por vários outros autores como Dreizin et al. (1999).

Outros metais, também foram estudados, como o cobre, tungstênio, aço, tântalo e molibdênio, e são considerados na pesquisa desenvolvida por Dreizin et al. (1994).

Todos esses trabalhos propuseram modelos teóricos para estimativa dos parâmetros relacionados à ignição da partícula metálica. Uma aproximação efetiva para a solução do problema da modelagem foi proposta por Yarin e Hetsroni (2004). Essa teoria baseava-se na aplicação do método clássico da teoria da explosão térmica, proposta por Semenov (1935), para estudar a ignição das partículas metálicas.

A teoria de Semenov considera uma amostra de um produto inflamável de volume V , superfície S , C a capacidade térmica e ρ a massa específica. A energia total conservada é dada pela seguinte equação.

$\rho CV dT_s/dt = \dot{q}_g - \dot{q}_l$, onde T_s , \dot{q}_g e \dot{q}_l são a temperatura da superfície do sólido, a taxa de calor gerado e a taxa do calor perdido, respectivamente. Os valores de \dot{q}_g e \dot{q}_l podem ser obtidos pelas seguintes equações: $\dot{q}_g = VQc^n A \exp(-E/RT_s)$ e $\dot{q}_l = hS(T_s - T')$, onde Q representa o calor liberado pela reação, A é o fator pré-exponencial, E energia de ativação, c é a concentração do reagente e n é a ordem da reação h é o coeficiente de transferência de calor associado com o calor

transferido da amostra para o ambiente e T' e a temperatura do ambiente (reator).

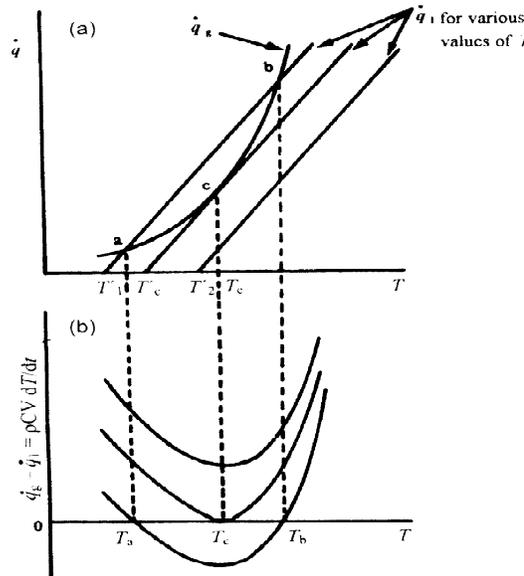


Figura 4.1. Ignição em um balanço térmico (a) balanço térmico (b) excesso de energia, (Adaptado de Wang et al., 2002).

A figura 4.1 demonstra que $\dot{q}_g(T)$ é uma função exponencial da temperatura, e $\dot{q}_l(T)$ é uma função linear do tempo com uma inclinação hS . Quando $T' = T_1'$, a amostra é aquecida lentamente e reage na intersecção da temperatura (T_a) da curva $\dot{q}_g(T)$ e linha $\dot{q}_l(T)$ no ponto a, devido ao fato de que $\dot{q}_l(T)$ é maior que $\dot{q}_g(T)$ para um pequeno acréscimo de temperatura da amostra. Como sabemos que a explosão térmica ocorre sempre que $\dot{q}_g(T)$ exceder $\dot{q}_l(T)$, se T' for elevado a T_2' , de qualquer maneira a amostra irá inflamar-se, uma vez

que $\dot{q}_g(T)$ é sempre maior que $\dot{q}_l(T)$. Entre T_1' e T_2' , existe uma temperatura crítica do reator (T_c' na figura 3.1), na qual a curva \dot{q}_g e linha \dot{q}_l , são tangenciais. Em T_c' , uma amostra inflamável será aquecida e elevando sua temperatura para T_c . Isso é a ignição espontânea (ou alto ignição) de acordo com a teoria da ignição espontânea de Semenov. Tal condição é necessária para a ignição da partícula $(\dot{q}_g)_{T_c} = (\dot{q}_l)_{T_c}$ e $(d\dot{q}_g/dT_s)_{T_c} = (d\dot{q}_l/dT_s)_{T_c}$, onde T_c representa a temperatura crítica da amostra. Sendo assim, podemos concluir que quando $\dot{q}_g = \dot{q}_l$ ou $d\dot{q}_g/dT_s = d\dot{q}_l/dT_s$, T' será a temperatura de ignição.

Yarin e Hetsroni (2004) afirmam que de acordo com a teoria da explosão térmica, o estado crítico de um sistema é determinado em relação ao estado não permanente. Mas, por motivo de simplificação do problema de ignição de uma partícula, tem-se:

- i. Uma partícula esférica perfeita;
- ii. A forma esférica da partícula não é modificada durante o aquecimento e ignição;
- iii. As propriedades físicas do sólido e dos reagentes gasosos são invariáveis;
- iv. O meio gasoso não absorve radiação, e

Considerando a equação do balanço térmico para uma partícula metálica introduzida instantaneamente em um gás oxidante. Assumindo que a transferência de calor por radiação é desprezível. Com base nisso a equação de balanço de calor para uma partícula metálica esférica será:

$$mc_p \frac{dT}{dt} = \rho QS \frac{d\delta}{dt} - hS(T - T_\infty) \quad (4.1.1)$$

Onde:

m = massa da partícula;

S = área superficial da partícula;

ρ = massa específica da partícula;

c_p = calor específico da partícula;

h = coeficiente de troca térmica;

δ = espessura da camada de oxido ou filme de oxido;

Q = calor da reação; e

T_∞ = temperatura do gás ambiente.

Levando em consideração que:

$$m = \rho(4/3)\pi r_0^3, \quad (4.1.2)$$

$$S = 4\pi r_0^2 \quad (4.1.3)$$

$$h = (Nu\lambda) / d \quad (4.1.4)$$

Onde,

d = diâmetro da partícula

r_0 = raio da partícula

Nu = número de Nusselt

λ = condutividade térmica da fase gasosa.

Reescrevendo a equação (4.1.1):

$$\frac{1}{3} \rho c_p r_0 \frac{dT}{dt} = \rho Q \frac{d\delta}{dt} - \frac{\lambda}{2r_0} Nu(T - T_\infty) \quad (4.1.5)$$

A equação (4.1.5) deve ser complementada pela relação que determina a taxa de oxidação do metal. A dependência de δ em relação ao t , como uma regra, pode ser aproximada por (Yarin e Hetsroni 2004):

$$\delta^{n+1} = K_* t + c \quad (4.1.6)$$

Onde, n pode variar em 0,1,2....;

K_* = a constante da taxa de oxidação;

t = o tempo; e

c = uma constante.

Dependendo dos valores do parâmetro n , é possível distinguir entre linear ($n=0$), parabólica ($n=1$) e cúbica ($n=2$) a lei de oxidação dos metais. No caso ($n=0$) a taxa de crescimento do óxido é constante, e nesse caso a reação conduz à formação de uma capa de óxido frágil e facilmente permeável, com isso a taxa de transporte do gás reagente é controlada pelo mecanismo de absorção. Se ($n=1$) corresponde a formação de uma camada de um produto mais denso (capa de óxido), enquanto que a taxa de oxidação é determinada pelo transporte difusivo do reagente gasoso através do filme. No caso ($n=2$) e ($n \geq 3$) a reação é caracterizada por uma enorme dificuldade de se processar devido à camada de óxido. Com isso, podemos notar que a real lei de oxidação dos metais é mais complexa do que a lei descrita pela equação (4.1.6) (Yarin e Hetsroni 2004).

Com diferenciação da equação (4.1.6), se obtêm:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{K_*}{(n+1)} \frac{1}{\delta^n} \quad (4.1.7)$$

A dependência de $K_*(T)$ pode ser aproximada pela lei de Arrhenius.

$$K_* = A' \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) C_o^m \quad (4.1.8)$$

Onde:

A' = o fator pré-exponencial;

E = energia de ativação;

R = constante universal dos gases, e

T = temperatura absoluta.

Com auxílio das equações (4.1.7) e (4.1.8) a taxa do crescimento da capa de óxido é dada por:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{k_n C_o^m}{\delta^n} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4.1.9)$$

Onde:

$k_n = (k_o A)/(n+1)$;

$k_o = \text{constante} = A'$;

$C_o^m = A$, C_o = concentração do oxidante sobre a superfície da partícula, e

m = ordem da reação.

As condições iniciais para o sistema de equações (4.1.5) e (4.1.9) são dados por:

$$t = 0, T = T_i, \delta = \delta_i \quad (4.1.10)$$

Utilizando a adimensionalização proposta por Yarin e Hetsroni (2004), variáveis adimensionais são:

Espessura adimensional da camada de óxido

$$\eta = \frac{\delta - \delta_i}{\delta_i} \quad (4.1.11)$$

Temperatura adimensional da partícula

$$\Theta = \frac{E}{RT_\infty^2} (T - T_\infty) \quad (4.1.12)$$

Tempo adimensional

$$\tau = t \frac{3Q}{c_p} \frac{E}{RT_\infty^2} \frac{k_n C_o^m}{r_o \delta_i^n} \exp\left(-\frac{E}{RT_\infty}\right) \quad (4.1.13)$$

$$\chi = \frac{Q\rho}{\delta_i^n} \frac{E}{RT_\infty} \frac{2r_o}{\lambda} k_n C_o^m \exp\left(-\frac{E}{RT_\infty}\right) \quad (4.1.14)$$

$$\beta = \frac{RT_{\infty}}{E} \quad (4.1.15)$$

Temperatura adimensional inicial da partícula:

$$\Theta_i = \frac{E}{RT_{\infty}^2} (T_{\infty} - T_i) \quad (4.1.16)$$

Raio adimensional da partícula:

$$\gamma = \frac{r_o}{3\delta_i} \frac{c_p RT_{\infty}^2}{EQ} \quad (4.1.17)$$

Onde, o subscrito i refere-se ao estado inicial da partícula.

Portanto, as equações (4.1.5) e (4.1.9) reduzem para o seguinte formato.

$$\frac{d\Theta}{d\tau} = \varphi(\eta) \exp\left(\frac{\Theta}{1+\beta\Theta}\right) - \frac{\Theta}{\chi} \quad (4.1.18)$$

$$\frac{d\eta}{d\tau} = \gamma\varphi(\eta) \exp\left(\frac{\Theta}{1+\beta\Theta}\right) \quad (4.1.19)$$

Onde $\varphi(\eta) = (1+\eta)^n$.

As condições iniciais para as equações (4.1.18) e (4.1.19) são:

$$\tau = 0, \eta = 0, \Theta = -\Theta_i \quad (4.1.20)$$

As condições de ignição segundo Yarin e Hetsroni (2004) são: $\eta = \gamma z - 1$

e $\tau' = \tau/\gamma^n$. Com isso, chegamos as seguintes equações:

$$\frac{d\Theta}{d\tau'} = \frac{1}{z^n} \exp\left(\frac{\Theta}{1+\beta\Theta}\right) - \frac{\Theta}{\Omega} \quad (4.1.21)$$

$$\frac{dz}{d\tau'} = \frac{1}{z^n} \exp\left(\frac{\Theta}{1+\beta\Theta}\right) \quad (4.1.22)$$

As condições iniciais são:

$$\tau' = 0, z = \frac{1}{\gamma}, \Theta = -\Theta_i \quad (4.1.23)$$

Onde, z é espessura adimensional da camada de óxido e Ω é o parâmetro

de aquecimento, $z = \frac{\delta}{r_o} \frac{3QE}{c_p RT_\infty^2}$; e $\Omega = \frac{\chi}{\gamma^n}$

Nos casos onde o raio adimensional da partícula for $\gamma \gg 1$, as condições iniciais são as mesmas das condições estabelecidas em (4.1.23).

$$\tau' = 0, \quad z = 0, \quad \Theta = -\Theta_i \quad (4.1.24)$$

Yarin e Hetsroni (2004), demonstram que no caso de uma condição crítica, esta pode ser representada da seguinte forma:

$$\Omega_{cr} = \left(\frac{3QE}{c_p RT_{\infty,cr}} \right)^{n+1} \frac{c_p \rho k_n C_o^m}{3\lambda r_o^{n-1}} \exp\left(-\frac{E}{RT_{\infty,cr}} \right) = c^* \quad (4.1.25)$$

Onde:

$T_{\infty,cr}$ = temperatura de ignição, ou seja, a temperatura do gás ambiente corresponde à temperatura de ignição;

c_p = calor específico do material;

c^* = constante para as seguintes condições:

- i. No caso de $n = 0$ e 1 , $c^* = 1,57$ para $\Theta_i = 0$;
- ii. No caso $n \geq 2$, $c^* = 2,47$ para $\Theta_i = 0$.

4.2. TEMPERATURA DE IGNIÇÃO DE UMA NUVEM DE AEROSSOL

O processo de explosão de um aerodispersóide foi considerado da seguinte forma por Mitsui e Tanaka, (1973): (i) o calor é fornecido para a superfície de uma partícula para elevar sua temperatura; (ii) ocorre a oxidação da superfície da partícula, de forma a promover o aumento ainda maior da temperatura.

Para alguns materiais a reação promovida produz gases inflamáveis como um resultado da degradação térmica; (iii) os gases assim produzidos misturam-se com o ar ambiente, promovendo a ignição e a produção de

chama, e (iv) o calor gerado devido a chama promove a oxidação e ignição de outras partículas.

Conforme essa teoria, a base para a análise da explosão de aerodispersóide procede-se da seguinte forma: processo de oxidação e ignição da partícula e a teoria de transferência de calor envolvendo, convecção e radiação, assim, a explosão de aerossol ocorre na seguinte ordem:

Oxidação → (mecanismo de ignição) → combustão → (mecanismo de propagação) → explosão.

Considerando um espaço esférico de uma nuvem de aerossol cujo diâmetro é l , no qual as partículas em suspensão são igualmente distribuídas. Tem-se:

$$l = \sqrt[3]{\frac{6G_s}{\pi C_d}} \quad (4.2.1)$$

Onde:

l = o diâmetro da esfera;

G_s = a massa total de partículas em suspensão;

ρ_s = a massa específica da partícula, e

C_d = a concentração de aerodispersóide.

O número de partículas é dado por

$$n' = 6G_s / \pi \rho_s D_p^3 \quad (4.2.2)$$

Onde D_p é o diâmetro das partículas.

A taxa de geração de calor pela reação química G , para uma nuvem específica de aerossol é dada por:

$$G = n' Q \frac{dm}{dt} = J \frac{n' D_p^2}{\sqrt{T_s}} \left\{ \exp \left(- \frac{E}{RT_s} \right) \right\} \quad (4.2.3)$$

Onde, $J = \pi C_{ox} k_s Q$.

Q = calor da reação;

m = massa da partícula;

E = energia de ativação;

R = constante universal dos gases;

T_s = temperatura da superfície da partícula;

k_s = constante da taxa de reação, e

C_{ox} =concentração do oxidante.

A perda de calor para o ambiente U , nessa nuvem de aerossol é devida ao processo convectivo e radiativo, de modo que:

$$U = n'h\pi D_p^2 (T_s - T_0) + \pi B r^2 (T_s^4 - T'^4) \quad (4.2.4)$$

Onde, B é o coeficiente de radiação e h é o coeficiente de troca térmica e pode ser escrito como:

$$h = 2k/D_p \quad (4.2.5)$$

Onde, k é a condutividade térmica do ar.

O coeficiente de radiação é dado por,

$$B = \sigma \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3 F \quad (4.2.6)$$

Onde, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 são respectivamente, a emissividade da chama, da partícula e da parede do reator. F é o fator de forma.

Com relação a ϵ_1 , existe uma relação semi empírica (Mitsui e Tanaka, 1973)

$$\epsilon_1 = 1 - \exp(-\gamma L' C_{ox}) \quad (4.2.7)$$

Onde:

L' = a efetiva largura da nuvem de aerossol e

γ = constante igual a 0,003 dada por Mitsui e Tanaka, (1973). Utilizando esses valores, ϵ_1 pode ser avaliado razoavelmente.

De acordo com a teoria de Semenov, podemos dizer que para ocorrer a ignição $dG/dT_s = dU/dT_s$, tem-se:

$$\frac{6J}{\sqrt{T_s}} \left\{ \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right) \right\} = \frac{12k}{D_p} (T_s - T') + \frac{\pi^{1/3} 6^{2/3} B \rho_s D_p}{G_s^{1/3} C_d^{2/3}} (T_s^4 - T_0^4) \quad (4.2.8)$$

Simplificado em função de T_s :

$$6J \left(\frac{E}{RT_s^{5/2}} - \frac{1}{2T_s^{3/2}} \right) \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right) = \frac{12k}{D_p} + 4(6)^{2/3} \pi^{1/3} B \rho_s \left(\frac{D_p}{G_s^{1/3} C_d^{2/3}} \right) (T_s^3) \quad (4.2.8.a)$$

4.3. PROPAGAÇÃO DA QUEIMA DE PARTÍCULAS EM COORDENADAS ESFÉRICAS

A propagação da queima de partículas pode ser obtida pela solução da equação de difusão em relação a coordenadas esféricas, quando a esfera n está em combustão (Fig. 4.2).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right\} \quad (4.3.1)$$

onde, T é a temperatura na distância r para a esfera n no tempo t e α é a difusividade térmica. A condição inicial é $T = T_i$ quando $t = 0$. As condições limites são $T = T_f$, onde T_f é a temperatura de frente de chama, quando $r = b$ ($t > 0$) e $T = T_i$, sendo T_i a temperatura inicial da partícula, quando $r \rightarrow \infty$. A solução é dada como:

$$\frac{T - T_i}{T_f - T_i} = \left(\frac{b}{r} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{r - b}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad (4.3.2)$$

Onde:

T = temperatura ambiente;

T_f = temperatura de frente de chama;

T_i = temperatura inicial no tempo $t=0$;

$erfc$ = função erro complementar;

b = raio da frente de chama;

α = difusividade térmica;

l = diâmetro da nuvem de poeira

r = distância a partir da esfera n

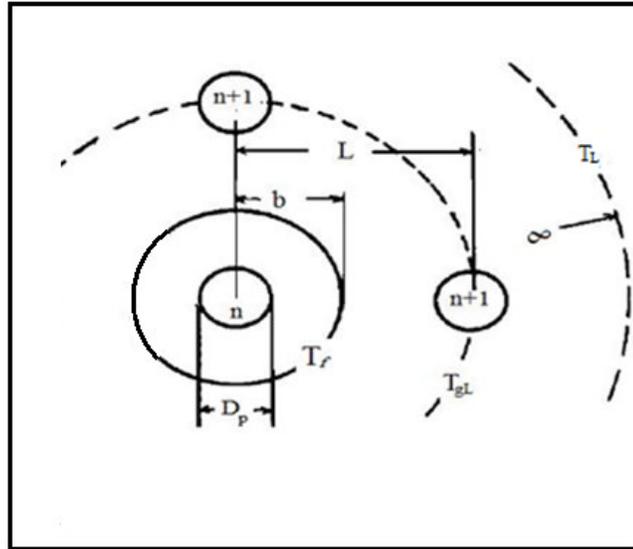


Figura 4.2: Modelo de propagação (Adaptado de Mitsui e Tanaka, 1973)

Então, a temperatura do gás em $r = L$ é

$$T_{gL} = (T_f - T_i) \left(\frac{b}{L} \right) erfc \left(\frac{L-b}{2\sqrt{\alpha t}} \right) + T_i \quad (4.3.2.a)$$

Onde:

T_{gL} = temperatura do gás na distância L ;

L = distância entre a partícula n e $n+1$;

b = raio da frente de chama, é definido como:

$$b = \left(\frac{1}{4}\right) D_p \left\{ 1 + \sqrt{1 + (2k^*/D_p)} \right\} \quad (4.3.3)$$

Onde:

D_p = diâmetro da partícula;

k^* = uma constante dependente do material e do equilíbrio químico.

Os dados experimentais de k^* fornecidos por Mitsui e Tanaka (1973) e Nomura e Tanaka (1980) correspondem a um valor de k^* igual a 10cm, isso para n-heptano. Na falta de valores de k^* para materiais sólidos, assumimos o k^* , do n-heptano.

Um balanço de energia para cada partícula se obtém considerando a transferência de calor da partícula queimada n, para a partícula n+1, como dado na equação

$$\frac{\pi}{6} D_p^3 \rho_s c_{ps} \frac{dT_{dL}}{dt} = h\pi D_p^2 (T_{gL} - T_{dL}) + \pi D_p^2 B (T_f^4 - T_{dL}^4) \quad (4.3.4)$$

Onde:

T_{dL} = temperatura da partícula em L;

T_{gL} = temperatura do gás em L;

T_f = temperatura de frente de chama;

ρ_s = massa específica da partícula;

h = coeficiente de transferência de calor;

c_{ps} = calor específico do sólido;

B = coeficiente de radiação, o qual nesse caso é expresso por:

$$B = \sigma \epsilon_2 \epsilon_g F \quad (4.3.5)$$

Em que,

ϵ_2 = emissividade da partícula;

ϵ_g = emissividade do gás;

F = fator de forma.

Utilizando $h = 2k/D_p$ (Mitsui e Tanaka, 1973), na equação 4.3.4, eliminando T_{dl}^4 , assim:

$$\frac{dT_{dl}}{dt} = \left(\frac{12k}{c_p \rho_s D_p^2} \right) (T_{gL} - T_{dl}) + \left(\frac{6B}{\rho_s c_{ps} D_p} \right) T_f^4 \quad (4.3.6)$$

A razão entre o tempo t e o tempo de combustão total de uma partícula τ é definida como:

$$\eta = \frac{t}{\tau} \quad (4.3.7)$$

Onde τ é o tempo de combustão total da partícula, e é dado como:

$$\tau = K_D D_p^2 \quad (4.3.8)$$

K_D é chamado de constante de queima e é dada por

$$K_D = \frac{\rho_s c_p}{16k \ln \left\{ 1 + c_p (T_f - T_s) / \lambda \right\}} \quad (4.3.9)$$

Na Eq. (4.3.9),

c_p = calor específico do gás;

T_s = temperatura da superfície da partícula e

λ = calor latente de vaporização.

De acordo com Mitsui e Tanaka (1973), e Nomura e Tanaka (1980), a constante de queima, K_D encontra-se na faixa de 100 a 300 para várias gotas de líquido e de 300 a 2000 para várias partículas de materiais sólidos.

Então, continuando:

$$\frac{dT_{dL}}{d\eta} = \left\{ \frac{12K_D k (T_{gL} - T_{dL})}{\rho_s c_{ps}} \right\} + \frac{6BK_D D_p T_f^4}{\rho_s c_{ps}} \quad (4.3.6.a)$$

Integrando:

$$T_{dL}(\eta) = \frac{1}{\exp(\xi\eta)} \left[\int_0^\eta (e^{\eta\xi}) (\xi T_{gL}(\eta) + \zeta T_f^4) d\eta + T_{in} \right] \quad (4.3.10)$$

Onde:

$$\xi = 12K_D k / \rho_s c_{ps} \quad (4.3.11);$$

$$\zeta = 6BK_D D_p / \rho_s c_p \quad (4.3.12);$$

T_{in} = temperatura inicial no $t > 0$

T_{in} é claramente igual a T_{dl} quando $dT_{dl}/d\eta = 0$, o qual é substituído na equação (4.3.6.a) para obter:

$$T_{in} = T_i + BD_p T_f^4 / 2k \quad (4.3.13)$$

Da equação (4.3.2.a), a temperatura ambiente em L, T_{gL} pode ser expressa como:

$$T_{gL}(\eta) = (T_f - T_i)(b/L) \operatorname{erfc} \left(\frac{L-b}{2\sqrt{\alpha K_D D_p^2 \eta}} \right) + T_i \quad (4.3.14)$$

5. EXPERIMENTO DE BANCADA

A seguir, são apresentados os materiais utilizados para a montagem e execução do tubo de teste vertical, aqui denominada Bancada de Teste Explosividade (BTE), e a metodologia proposta para a avaliação experimental.

5.1. MATERIAIS

Os materiais utilizados na montagem e execução da Bancada de Teste de Explosividade (BTE) para avaliação de explosividade de materiais particulados são:

- 1) Tubo vertical de 1,20 metros de comprimento, feito de alumínio, com diâmetro interno de 7,5cm, (Fig. 5.1);
- 2) Peneira com diâmetro interno de 6,5cm, malha da tela de aço com 18x16, e diâmetro 0,28 milímetros (Fig. 5.2);
- 3) Equipamento de vibração, marca Vibro Kraft, com frequência de vibração 60Hz, (Fig. 5.3);
- 4) Bico de Bunsen, utilizado como fonte de ignição, (Fig. 5.4);
- 5) Mangueira de gás;
- 6) Cilindro de GLP;
- 7) Suporte para o tubo, de 71cm de altura por 20cm de largura, (Fig. 5.1);
- 8) Câmera filmadora digital modelo Cyber-Shot, marca Sony, com 8.1 megapixels.



Figura 5.1: Bancada de teste (Tubo de Teste de Explosividade - BTE).



Figura 5.2: Peneira com diâmetro interno de 6,5cm, malha da tela de aço 18x16 e diâmetro 0,28 milímetros.



Figura 5.3: Equipamento de vibração, marca Vibro Kraft, com frequência de vibração constante em 60Hz.



Figura 5.4: Bico de Bunsen (fonte de ignição).

5.2. METODOLOGIA

Com os materiais citados anteriormente, montou-se uma bancada, para os experimentos do presente estudo, como apresenta a Fig. (5.1), com os comprimento e diâmetro do tubo de alumínio escolhidos aleatoriamente. Inicialmente foi utilizado um funil vibratório, para o teste de dispersão de material. Porém, o mesmo não dispersava homoganeamente o material particulado. Solucionando tal problema com a “construção” de uma peneira (Fig.5.2), ligada por uma haste de metal a um equipamento de vibração (Fig.5.3).

Os passos seguintes foram utilizados para verificar se o material particulado, uma mistura contendo 50% em massa de partículas de chumbo, pode ou não ser considerado um material explosivo, e posteriormente, avaliar sua velocidade de propagação da chama.

- i. Coleta do material particulado, proveniente dos filtros mangas, e acondicionamento do mesmo. Para a coleta e acondicionamento foi utilizado o procedimento descrito no apêndice B deste trabalho;
- ii. Separação do material em quantidades menores;
- iii. Armazenamento do material em local livre de umidade (Dessecador);
- iv. Adição do material particulado à peneira vibratória;
- v. Inicialização do sistema de vibração para a dispersão do material particulado no interior do tubo;
- vi. Três segundos após o início do sistema de vibração, tempo necessário para o aparecimento da primeira nuvem de aerossol na extremidade inferior do tubo, a fonte de ignição é acionada manualmente, (o acionamento manual do bico de Bunsen é feito por um sistema de trilho que permite o seu deslocamento horizontalmente, para dentro e fora do tubo);

- vii. No caso de não ocorrer a propagação da chama na execução do passo (vi), a amostra deve ser aquecida para a retirada de toda a umidade e realização dos passos iv, v e vi;
- viii. Filmagem dos passos (iv), (v) e (vi) utilizando uma câmera digital;
- ix. Análise das imagens.

Os passos (i) a (vii) correspondem à execução da primeira etapa da metodologia, denominada visualização, através da qual se verifica qualitativamente a propagação da chama. Para a execução da segunda etapa, passos (viii) e (ix), denominada de teste quantitativo, foi necessária a perfuração de dois orifícios no tubo de alumínio, cada um com 1cm de diâmetro interno. Um a 8cm do topo da BTE, denominado de furo superior e o outro a 55cm de abaixo do furo superior, denominado furo inferior, (Fig.5.1).

Todo o material particulado foi utilizado da forma que foi coletado no filtro manga, sem sofrer nenhum tipo de processamento para separação de tamanhos de partículas.

5.2.1. Metodologia de Verificação da Bancada de Teste de Explosividade

A metodologia de verificação da Bancada de Teste de Explosividade consistiu em analisar a configuração utilizada para a construção da bancada de teste e sua metodologia, descrita anteriormente, que seriam capazes de formarem uma nuvem de aerossol em uma faixa de explosividade. Para tanto, foi necessário a utilização de matérias de fácil aquisição e manipulação, como a farinha de trigo e o amido de milho. Os resultados dos testes são apresentados no item 6 desta dissertação.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa parte do trabalho, apresentam-se os resultados e suas respectivas discussões sobre: i) calibração da Bancada de Teste de Explosividade (BET), ii) testes com a mistura de materiais particulados provenientes do filtro manga da Recicladora de Chumbo; teste qualitativo (visualização da chama) e quantitativo (velocidade de propagação da chama), iii) modelo matemático proposto para o cálculo da combustão de partículas metálicas e nuvem de aerossol metálico.

6.1. TESTES DE VERIFICAÇÃO DA BANCADA DE TESTE DE EXPLOSIVIDADE (BTE)

Neste item são apresentados e discutidos os resultados obtidos na avaliação qualitativa (visual) e quantitativa para a calibração da BTE. A calibração da Bancada de Teste de Explosividade foi concebida para a realização de testes qualitativos, que permitem a visualização da propagação da chama, e de testes quantitativos para a avaliação da propagação da chama.

Para os materiais particulados, farinha de trigo e amido de milho, foram realizados três testes. A chama observada, para a farinha de trigo e de amido de milho é apresentada, respectivamente, nas figuras 6.1 e 6.2. Nestas figuras, é visível o aparecimento do furo superior, utilizado para a avaliação quantitativa da velocidade de propagação de chama, e a saída da chama pelo topo do tubo de testes de comprimento 1,20m. Das três vezes que cada um destes materiais particulados foi testado na BTE, somente duas, de cada material, propagaram a chama do início ao fim do tubo. Logo, pode-se afirmar que a BTE é capaz de dispersar o material particulado na forma de uma nuvem de aerossol que, ao entrar em contato com a fonte de ignição (bico de Bunsen, temperatura adiabática $T_{ad} = 1721,8K$, para uma mistura 50% de propano C_3H_8 e 50% butano

C_4H_{10}), consegue propagar uma chama autossustentável. As velocidades, para cada material, são apresentadas na tabela 6.1.



Figura 6.1: Chama provocada pela dispersão da farinha de trigo.



Figura 6.2: Chama provocada pela dispersão do amido de milho.

Tabela 6.1. Velocidade de propagação da chama no tudo de teste de explosividade.

Material particulado	S_L.[m/s] (teste1)	S_L.[m/s] (teste 2)
Farinha de trigo	0,20	0,22
Amido de milho	0,23	0,25

Na tabela 6.1, a primeira coluna apresenta os materiais particulados utilizados para o teste da avaliação quantitativa, e na segunda e terceira colunas temos as velocidades de propagação de chama (S_L) obtidas para os dois materiais particulados.

A seguir são apresentados os resultados e discussões sobre a calibração quantitativa da BTE. Com base nesses resultados e discussões é verificado se a metodologia proposta para a avaliação de velocidade de propagação de chama é viável e, ainda, se o equipamento permite tal análise.

A tabela 6.2 mostra os valores obtidos, na literatura, da velocidade de propagação de chama e a concentração de diversos materiais, entre eles, o amido de milho, com um dos resultados muito próximo do obtido nos experimentos com a BTE (Tab. 6.1). Os resultados foram obtidos de diversas referências bibliográficas, (Wingerden e Stavseng, 1996; Sun et al., 1998; Proust, 2006 e Sun et al., 2006).

Os valores das velocidades, 0,2m/s para a farinha de trigo e 0,23m/s para o amido de milho, condizem com o esperado para uma alta velocidade de chama (0,1m/s a 10m/s), como definida por Johansen e Ciccarelli (2008).

Comparando as tabelas 6.1 e 6.2, verifica-se que, o método proposto para obtenção da velocidade de chama é válido, e que os resultados obtidos foram satisfatórios. Sendo assim, pode-se afirmar que, a metodologia

para a obtenção da velocidade de chama e o equipamento BTE podem ser utilizados para outros particulados sólidos.

Tabela 6.2. Velocidade de propagação da chama em tudo de teste de explosividade .

Material particulado	S_L [m/s]	Concentração [g/m ³]
Amido de milho	0,23	150
Enxofre	0,23	100
Licopódio	0,26	50
Lignito	0,4	600
Alumínio	0,65	600
Ferro	0,2	530

6.2. MODELO MATEMÁTICO

A seguir, são apresentados os resultados para a modelagem matemática da ignição de uma partícula metálica, temperatura de ignição de uma nuvem de aerossol e propagação da queima de partículas em coordenadas esféricas. Os valores numéricos, utilizados como parâmetro para a obtenção dos resultados, foram retirados de diferentes bibliografias e são apresentados na tabela 6.3.

Na Tab. 6.3, k^* é uma constante definida por Mitsui e Tanaka (1973); D_p é o diâmetro da partícula; MW é o peso molecular para os diferentes metais; λ é o calor latente de vaporização; T_f é a temperatura de frente de chama; T_0 é a temperatura de ignição das partículas metálicas; P_f é o ponto de fusão; P_e é o ponto de ebulição; $P_{f_{ox}}$ é o ponto de fusão do óxido; $P_{e_{ox}}$ é o ponto de ebulição do óxido; E é a energia de ativação; ϵ_2 é a emissividade da partícula; α é a difusividade térmica do gás; k é a condutividade térmica do gás; F é o fator de forma para partículas metálicas esférica; ϵ_g é a emissividade do gás; σ é a constante de Stefan-Boltzmann; T_i é a temperatura inicial no tempo igual a zero; C_d é a concentração do material particulado e R é a constante dos gases.

Tabela 6.3. Valores utilizados para a obtenção dos resultados

Parâmetro	Alumínio (Al)	Magnésio (Mg)	Titânio (Ti)	Chumbo (Pb)
k^* [cm] ⁱ	10	10	10	10
D_p [cm] ⁱ	0,02	0,02	0,02	0,02
MW [g/mol] ^b	26,97	24,32	47,90	207,21
λ [cal/g] ^b	2263	1337	174,3	203
ρ_s [g/cm ³] ^b	2,7	1,738	4,507	11,35
c_{ps} cal/g K	0,1 ^c	0,170 ^c	0,1249 ^c	0,03105 ^h
T_f [K]	3000 ^f	3000	3000 ^g	1830
T_0 [K]	2273 ^d	1053 ^j	2400 ^g	-
P_f [K] ^a	934	923	1941	600
P_e [K] ^a	2793	1363	3560	2043
$P_{f_{ox}}$ [K] ^a	2346	3073	2143	1159
$P_{e_{ox}}$ [K] ^c	3254	3873	3246	1746
E [cal/mol]	23168 ⁱ	17700 ⁱ	42992 ^b	16170 ^b
ϵ_2	0,031 ⁱ	0,028 ⁱ	0,035 ^b	0,055 ^b
α [cm ² /s] ⁱ	0,277	0,277	0,277	0,277
k [cal/cm K] ⁱ	2,21X10 ⁻²	2,21X10 ⁻²	2,21X10 ⁻²	2,21X10 ⁻²
F	0,5	0,5	0,5	0,5
ϵ_g ⁱ	0,25	0,25	0,25	0,25
σ [cal/cm ² K ⁴]	1,35x10 ⁻¹²	1,35x10 ⁻¹²	1,35x10 ⁻¹²	1,35x10 ⁻¹²
T_i (t=0)	298,15	298,15	298,15	298,15
C_d [g/cm ³]	0,4x10 ⁻⁴	0,4x10 ⁻⁴	0,4x10 ⁻⁴	0,4x10 ⁻⁴
R [cal/mol K] ⁱ	1,986	1,986	1,986	1,986

^a JANAF Thermochemical Tables (1998);
^b Perry's chemical engineers' handbook;
^c Glassman, Yetter (2008);
^d Trunov et al. (2005);
^e Dreizin (1996);
^f Shoshin e Dreizin (2006);
^g Molodetsky et al. (1992);
^h Cashdollar e Zlochower (2007);
ⁱ Mitsui e Tanaka, (1973);
^j Gosteev e Fedorov (2005).

O *software* utilizado para a resolução do modelo matemático foi o EES (*Engineering Equation Solver*), onde o método numérico que o programa emprega para integrar funções e resolver equações diferenciais, é usada a variação da regra do trapézio associado a um algoritmo de predição-correção.

6.2.1 Resultados e Discussões do Modelo de Ignição de uma Partícula Metálica

A seguir, os resultados obtidos pela modelagem matemática são analisados e discutidos. O diâmetro da partícula utilizada para os cálculos foi de $2\mu\text{m}$.

Para uma base de comparação com o chumbo (Pb), foram escolhidos três metais: alumínio (Al), magnésio (Mg) e titânio (Ti) devido à extensa bibliografia sobre os seus parâmetros de ignição e queima. O Pb, ao contrário dos outros metais citados anteriormente, possui uma bibliografia limitada, e por isso, foi assumido que a espessura inicial da camada de óxido (δ_i) é igual à média da camada dos três metais Al, Mg e Ti com o valor de 0,5nm.

Os resultados da solução numérica das equações (4.1.21) e (4.1.22), sujeitas às condições (4.1.24), são apresentados nas figuras 6.3 (Ti) e 6.4 (Pb). Vê-se que uma pequena variação no parâmetro adimensional de aquecimento, Ω , onde $\Omega = \chi/\gamma^n$, que corresponde a uma pequena variação de temperatura no período de pré-ignição, conduz a uma mudança brusca na temperatura da partícula e na espessura do filme de óxido (para um raio adimensional $\gamma \gg 1$), mudando significativamente durante o período de pré-ignição.

Tal aumento brusco da camada de óxido é esperado, de acordo com o experimento conduzido por Trunov *et al.* (2005). Nesse experimento, verificou-se o aumento da espessura da camada naturalmente amorfa, já existente na superfície da partícula de alumina, durante o aquecimento de

300 para 550°C. Em torno de 550°C, a espessura desta camada de óxido, aumenta de 0,5nm (espessura da camada natural de óxido) para 4nm.

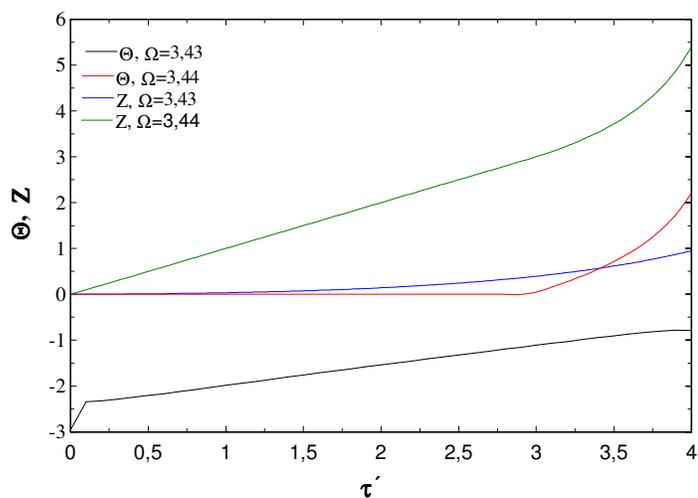


Figura 6.3: Temperatura adimensional de uma partícula de titânio Θ e a espessura do filme z , em função do tempo τ' para o caso $\gamma \gg 1$.

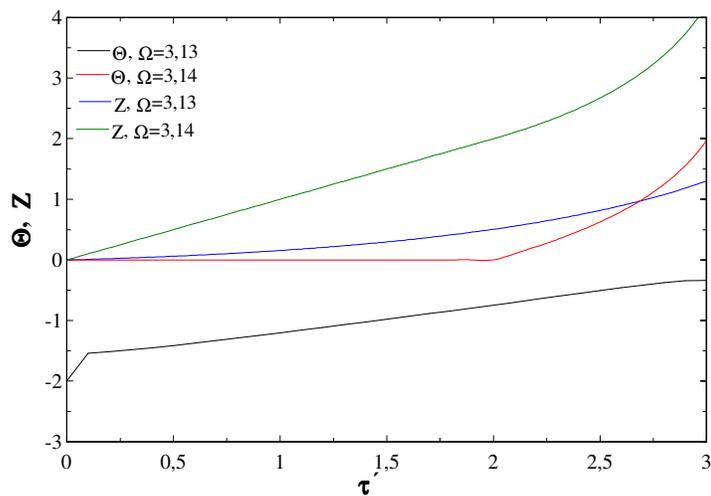


Figura 6.4: Temperatura adimensional de uma partícula de chumbo, Θ e a espessura do filme z , em função do tempo τ' para o caso $\gamma \gg 1$.

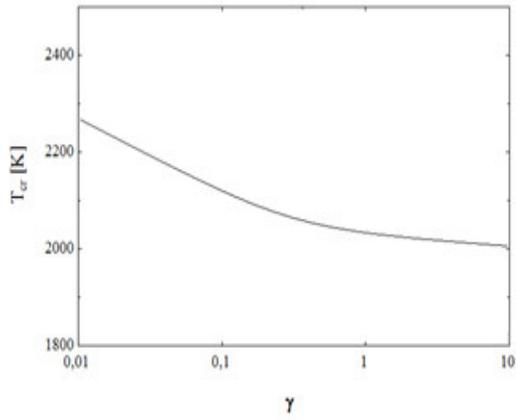
Os resultados apresentados a seguir para alumínio, magnésio e titânio serviram de base para a calibração do modelo e análise dos resultados do Pb. Nas figuras a seguir, T_{cr} é igual a $T_{\infty,cr}$, e corresponde à temperatura de ignição dada pela Eq. (4.1.25), onde c^* é uma constante. Os valores desta constante variam em função do valor do expoente n : no caso de $n = 0$ e 1 , $c^* = 1,57$, no caso $n \geq 2$, $c^* = 2,47$, essas duas condições são para a constante c^* e são válidas somente para $\Theta = 0$, Θ e obtido pela Eq.(4.1.12), isto significa que, T_{∞} é igual a T , no momento da ignição, teoria de Semenov.

A Eq. (4.1.25), permite estudar o efeito do aumento do tamanho da partícula provocado pelo crescimento da capa de óxido, na temperatura crítica de ignição, em relação à lei de oxidação ($n= 0, 1, 2\dots$). Observadas as figuras 6.5 a 6.8. Em todos os casos (Al, Mg, Ti e Pb), quando $n = 0$, a temperatura de ignição diminui com o aumento do raio, mostrando que, quanto maior a partícula, menor a influência da capa de óxido.

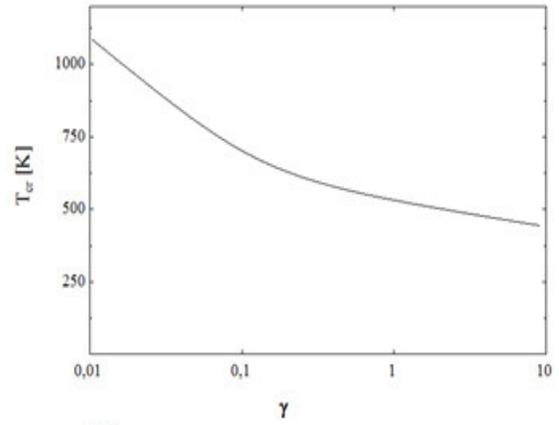
Para o expoente $n = 1$ (Fig. 6.6), a temperatura de ignição diminui inicialmente com o raio de partícula (γ) menor que 0,1, e em seguida, o filme de óxido satura-se e torna-se constante, independente do aumento da partícula.

Quando a rigidez da capa de óxido aumenta para valores do expoente n igual a 2 (Fig. 6.7) e n igual a 3 (Fig.6.8), T_{cr} também mostra o mesmo padrão inicial (Fig. 6.5 e 6.6): diminui com raios de partículas (γ) menores que 0,1. Em seguida, a temperatura de ignição aumenta com o raio. Para $n = 3$ o aumento é mais acentuado que $n=2$.

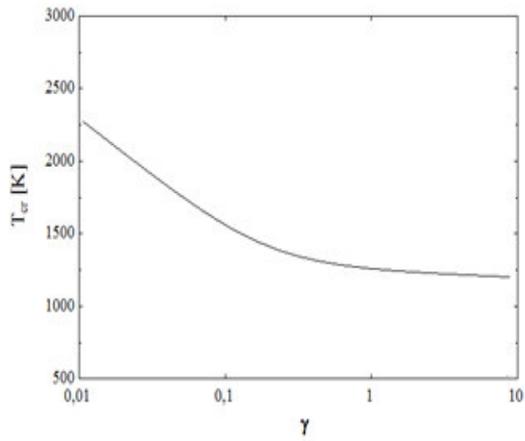
Observando a Fig. 6.9, pode-se verificar que na linha tracejada para $\gamma < 1$, todos os valores de T_{cr} são próximos. O mesmo acontece com os resultados obtidos pra Al, Mg, Ti e Pb. Nas Fig. de 6.5 a 6.8, observa-se que todos os valores de temperatura de ignição (T_{cr}) para Pb, ficaram entre 1500 e 2000K.



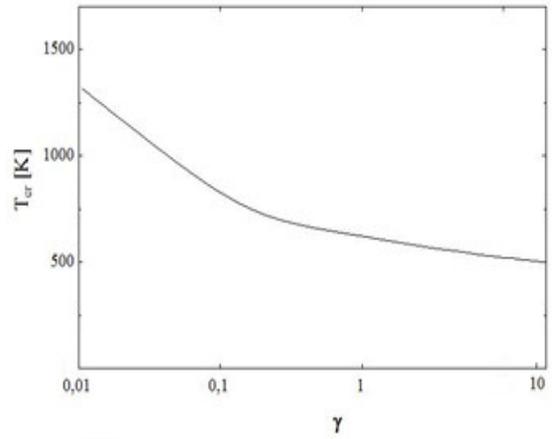
Al



Mg



Ti



Pb

Figura 6.5: Temperatura de ignição de diversas partículas metálicas em função do raio das mesmas para lei de oxidação com $n = 0$.

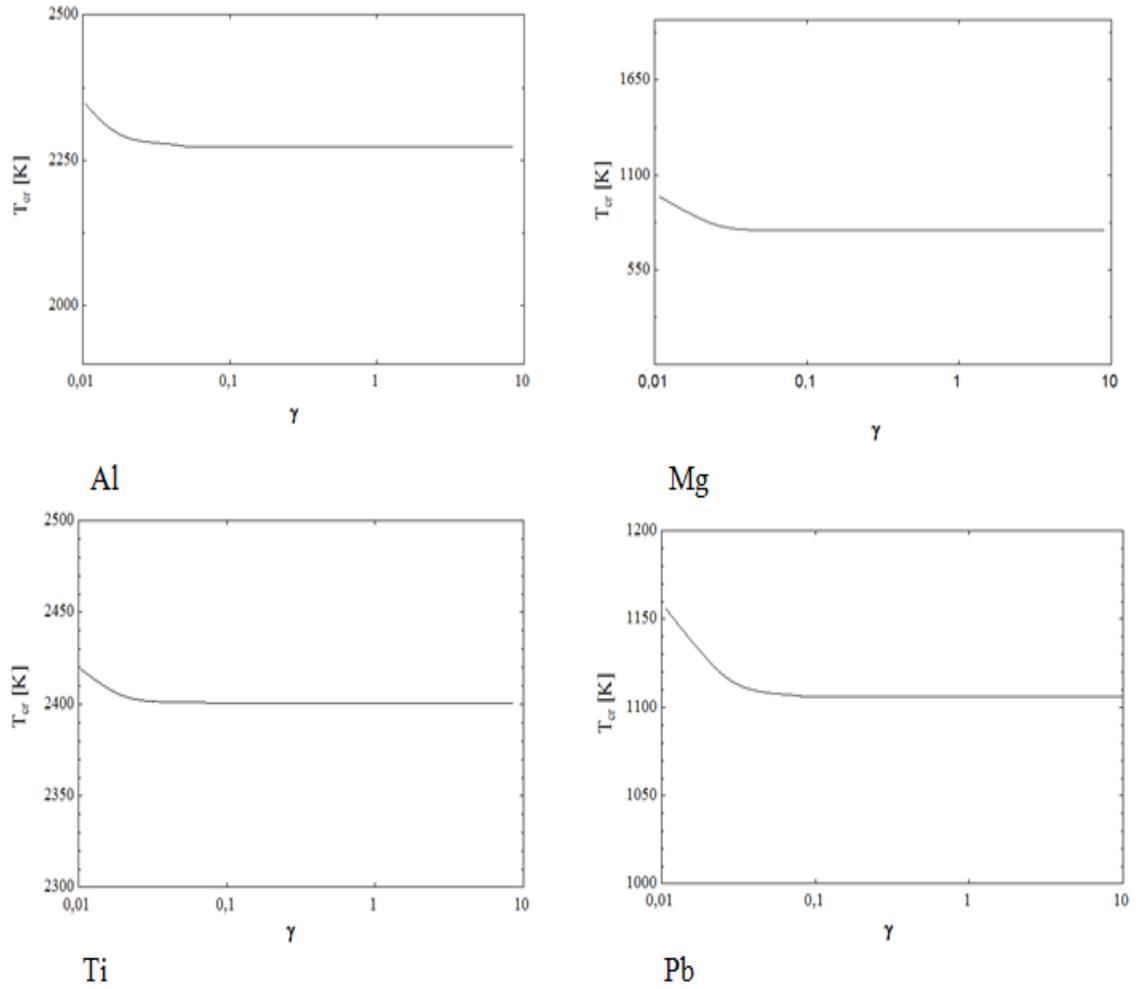
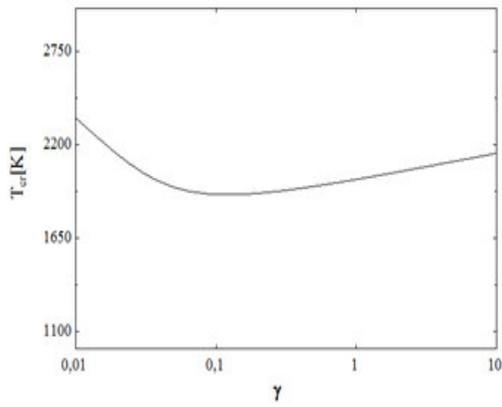
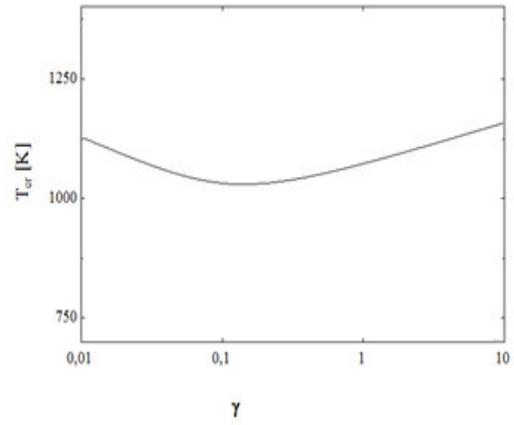


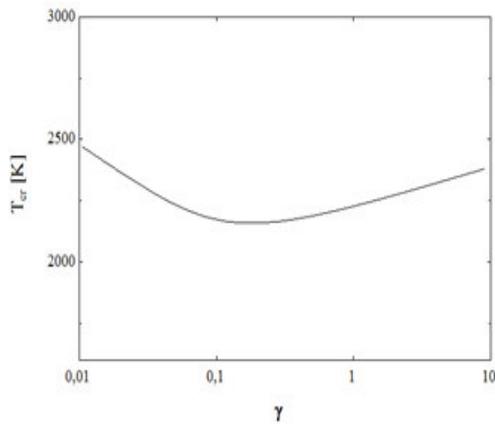
Figura 6.6: Temperatura de ignição de diversas partículas metálicas em função do raio das mesmas para lei de oxidação com $n = 1$.



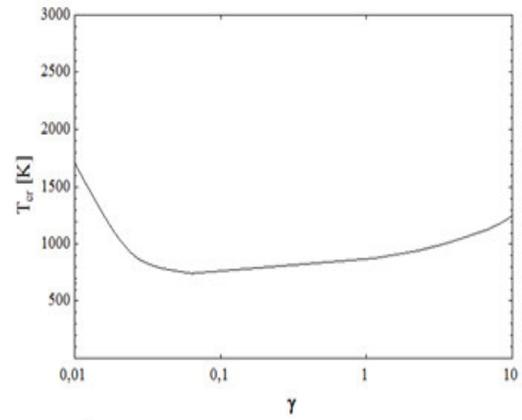
Al



Mg

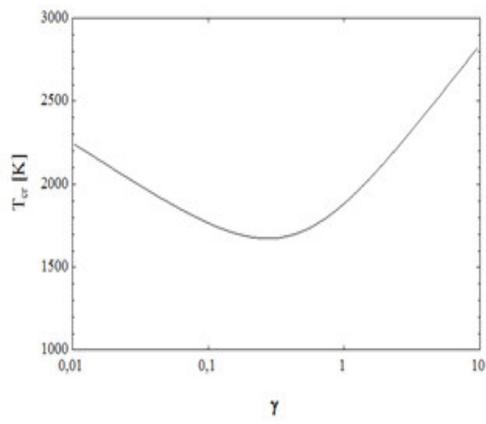


Ti

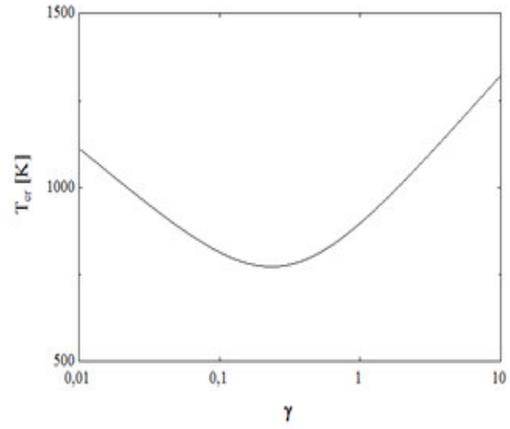


Pb

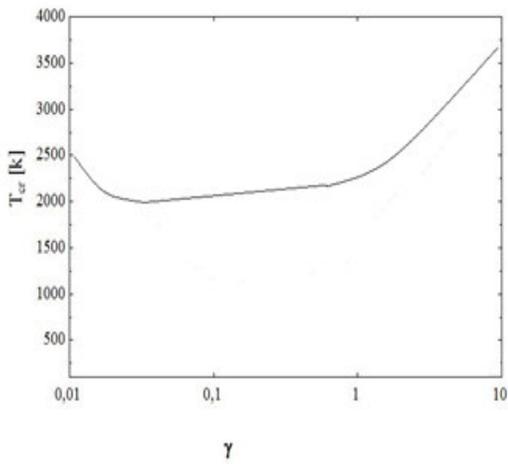
Figura 6.7: Temperatura de ignição de diversas partículas metálicas em função do raio das mesmas para lei de oxidação com $n = 2$.



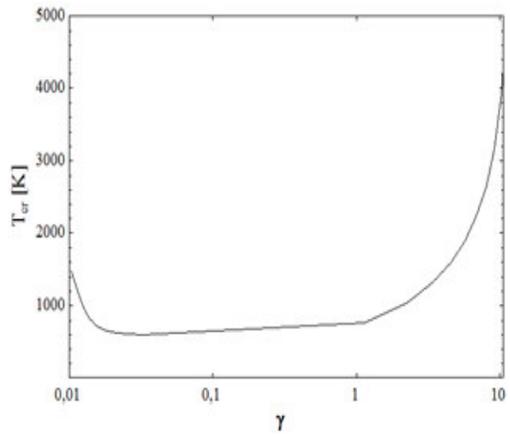
Al



Mg



Ti



Pb

Figura 6.8: Temperatura de ignição de diversas partículas metálicas em função do raio das mesmas para lei de oxidação com $n = 3$.

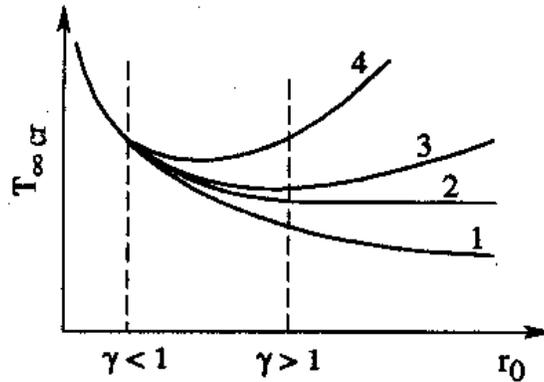


Figura 6.9: Temperatura de ignição como uma função do raio da partícula para várias leis de oxidação. Curva 1, $n = 0$; curva 2, $n = 1$; curva 3, $n = 2$ e curva 4, $n > 2$. (reproduzido de Yarin e Hetsroni, 2004).

O expoente n determina a dependência da taxa de oxidação na espessura da capa de óxido. Segundo Fedorov e Kharlamova (2003), Para o magnésio $n = 0$ e alumínio $n = 1$. Logo, tendo como base os resultados obtidos, para o Mg pode-se dizer que, quanto maior a o raio da partícula, menor a influencia da capa de óxido e, para o Al, que para raios maiores que (γ) 1, a capa de óxido é constante independente do aumento do raio. Para o Ti e o Pb, nas referências bibliográficas utilizadas neste trabalho, não foi encontrada menção sobre o expoente n para ambos. O que se pode dizer, observando os resultados, é que para raio de partícula muito menor que 1 ($\gamma \ll 1$) todos os metais (Al, Mg, Ti e Pb) seguiram a lei de oxidação para $n = 0$, quanto a raios maiores e igual a 1 ($\gamma \geq 1$), como base no modelo matemático, não é possível concluir qual será o comportamento do chumbo.

6.2.2. Resultados e Discussões da Temperatura de ignição de uma Nuvem de Aerossol e Propagação da Queima de Partículas em Coordenadas Esféricas

Utilizando o sistema de equações (4.2.8) e (4.2.8.a), os resultados obtidos são apresentados na Tab. 6.4 e nas figuras 6.10 e 6.11. Comparando a Tab. 6.4, em que os valores de T_0 foram calculados pela Eq. (4.2.8), com a Tab. 6.3, onde há o valor da temperatura de ignição para Al, Mg e Ti, que são fornecidos, pode-se observar que os valores gerados pela modelagem matemática para Al e Ti são mais altos, enquanto que para o Mg, o valor foi idêntico. Isso pode ser em razão de ter-se assumido o valor de J' do Mg, fornecido por Mitsui e Tanaka (1973), tanto para o Al e Ti como para o Pb. É de se referir que no trabalho de Mitsui e Tanaka (1973) é encontrado somente o valor de J' para o Mg.

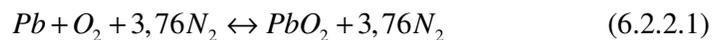
Na mesma Tab. 6.4, os valores de T_s são mais altos que a temperatura de ignição dos metais. Ao comparar o valor obtido pelo modelo para T_s do Al, com o valor obtido experimentalmente por Ermakov *et al.* (1982), em que se avaliou a temperatura da superfície, para uma partícula de Al com diâmetro entre 0,02cm e 0,04cm e obtiveram T_s no momento da ignição igual a 2070K, e após a ignição, a temperatura da superfície da partícula de alumínio permaneceu constante em 2170K. Pôde-se observar, portanto, que tal resultado encontrado é menor que o obtido pela modelagem matemática, em que $T_s = 2289K$. O fato do valor de T_s obtido pelo modelo ser mais alto que a temperatura de ignição é que ele considera que a reação de combustão é heterogênea.

Para o alumínio e o magnésio, a temperatura da superfície da partícula foi mais baixa que a temperatura de fusão dos seus respectivos óxidos, ocorrendo também no experimento conduzido por Ermakov *et al.* (1982). Para o chumbo (Tab. 6.4), a temperatura da superfície (T_s) também foi mais alta que a temperatura de ignição (T_0). Em relação ao ponto de

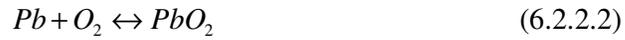
fusão de seu óxido, a temperatura da superfície foi mais alta, diferentemente do ocorrido com o AL e o Mg. Mas se comparada com o Ti, nota-se que a temperatura da superfície da partícula também foi mais alta que o ponto de fusão do óxido de titânio.

Esta similaridade do Ti e do Pb pode ser explicada pela forma da reação de oxidação que, segundo Steinberg *et al.* (1992), se o ponto de ebulição do óxido metálico for maior que o do metal, então, a combustão ocorre no estado vapor, reação de oxidação homogênea (Al: $Pe = 2793K$ e $Pe_{ox} = 3254K$; e Mg: $Pe = 1363K$ e $Pe_{ox} = 3873K$). A condição contrária: temperatura de ebulição do metal maior que a do seu óxido (Titânio: $Pe=3560K$ e $Pe_{ox} = 3246K$; Chumbo: $Pe = 2043K$ e $Pe_{ox} = 1746K$), o processo de combustão ocorre na superfície da partícula, reação de oxidação heterogênea. Essa teoria é conhecida como teoria de Glassman. Logo, o Pb e o Ti queimam da mesma forma, na superfície da partícula (reação heterogênea).

Como foi visto, o Pb queima de forma heterogênea, e assumindo que a queima ocorra somente na superfície, sem geração de subprodutos que possam queimar externamente à superfície, a maior temperatura produzida pela reação ocorrerá na superfície da partícula. Na Tab. 6.3 foi estimada uma temperatura de frente de chama, que no caso do Pb, é a própria temperatura da superfície da partícula. Para estimar esse valor T_s , foi considerada a seguinte reação química:



A partir desta reação, foi calculada a Temperatura da Chama Adiabática à pressão constante, e obteve-se o valor de 1830K, sendo para a combustão do chumbo em ar ambiente. Se a queima ocorrer somente com oxigênio, a reação é:



E o valor da Temperatura da Chama Adiabática para o Pb subiria para 4155K, um aumento de 2325K. Mas para o modelo, assume-se a queima de Pb em ar ambiente Eq. (6.2.2.1).

Nas figuras 6.10 e 6.11, observa-se o aumento da temperatura de ignição com a diminuição do diâmetro da partícula, este fenômeno, segundo Mitsui e Tanaka (1973), é devido à emissividade das partículas metálicas.

Tabela 6.4. Temperatura da superfície da partícula e temperatura de ignição de uma nuvem de aerossol.

Metal	T_s (K)	T_0 (K)
Alumínio	2289	2274
Magnésio	1055	1053
Titânio	2404	2401
Chumbo	1175	1173

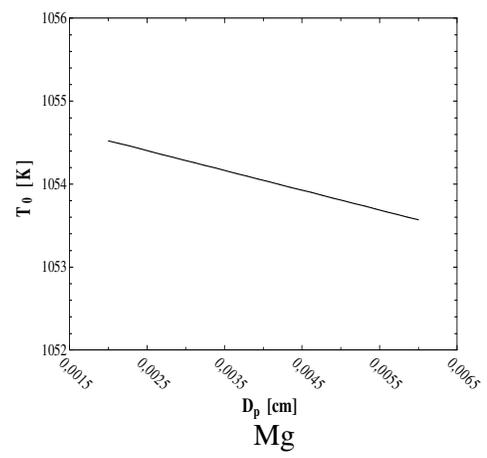
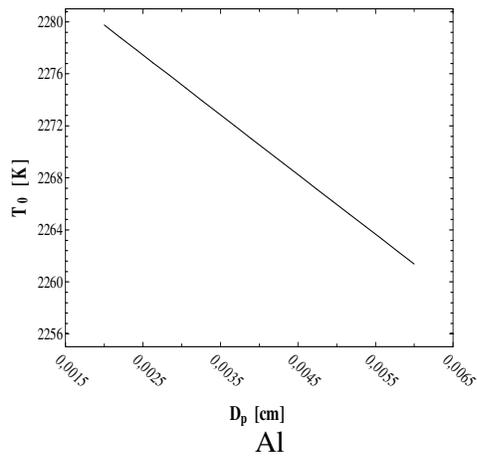


Figura 6.10: Temperatura de ignição para diferentes diâmetros de partículas de alumínio e magnésio.

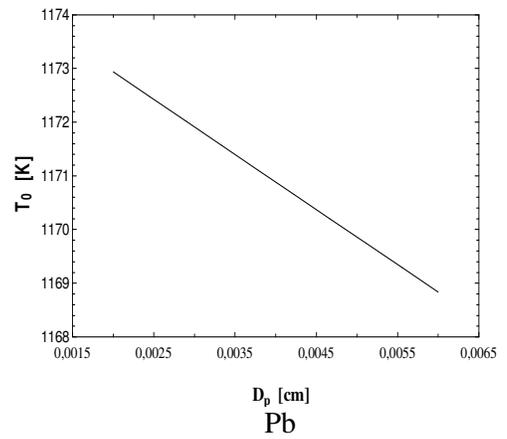
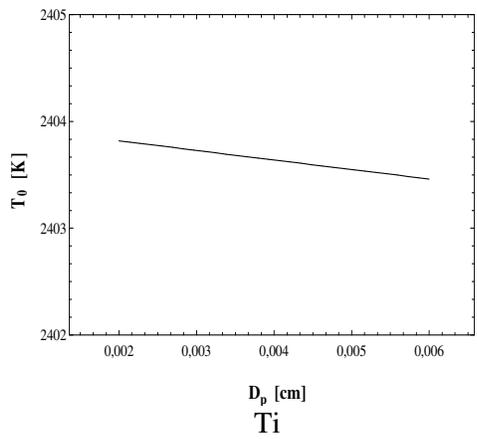


Figura 6.11: Temperatura de ignição para diferentes diâmetros de partículas de titânio e chumbo.

Em relação ao modelo para o cálculo da temperatura de ignição de uma nuvem de aerossol, equações (4.2.8) e (4.2.8.a), o modelo é mais apropriado à queima de partículas que reagem de forma heterogênea, como o Pb.

As tabelas 6.5 a 6.8 apresentam os resultados obtidos para a propagação da combustão em coordenadas esféricas (Fig. 4.2).

Em relação aos resultados obtidos para a propagação de queima em coordenadas esféricas, tabelas 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8, em que apresentam a temperatura de ignição T_{dl} para uma partícula (n+1), separada por uma distância L de uma partícula (n) em combustão, obtendo a capacidade de propagação de calor em uma nuvem de aerossol metálico e consequentemente sua capacidade de explosão.

As tabelas 6.5 (Al), 6.6 (Mg), 6.7 (Ti) e 6.8 (Pb) mostram a temperatura de ignição T_{dl} das partículas metálicas a uma distância L, de uma partícula queimando (Fig. 4.2), para diferentes η , onde T_0 é a temperatura de ignição obtida na Tab. 6.3.

Cada T_{dl} foi calculada para diferentes η , onde $\eta = t/\tau$, que é a razão entre o tempo t e o tempo de combustão total τ de uma partícula. Quando L é calculada por $L = (\rho/C_d)^{1/3} D_p$ (a equação para L é fornecida por Nomura e Tanaka, 1980), T_{dl} pode ser obtida a partir da equação (4.3.10) pelo uso de T_{in} , temperatura inicial em $t > 0$, equação (4.3.13) e $T_{gL}(\eta)$, temperatura ambiente em L em relação à η , equação (4.3.14).

Para a figura 4.2, T_0 representa a temperatura de ignição para a partícula, de acordo com o modelo proposto por Mitsui e Tanaka (1973). Como forma de simplificação dos cálculos para o modelo, propagação da queima de partículas em coordenadas esféricas, o tamanho das partículas foi considerado constante.

Se T_{dL} for próximo de T_0 em um η menor que 1, a partícula (n+1) queimará antes que a partícula anterior (n) tenha sido consumida por completo. Por outro lado, se η for maior que 1, quando T_{dL} aproxima-se T_0 , então, a nuvem de aerossol não explodirá, como pode ser visto nas tabelas 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8, em que o valor de T_{dL} ficou abaixo do valor de T_0 . Portanto, o limite inferior de explosividade pode ser definido, de acordo com o presente modelo, para $\eta = 1$, quando T_{dL} alcança T_0 .

Como citado por Mitsui e Tanaka (1973) o valor de K_D , constante de queima, para partículas sólidas é de 300s/cm² a 2000s/cm². O que pode ser observado para o Pb na Tab. 6.8, é que seu valor ficou dentro da faixa, com o valor igual a 466,6s/cm². Após todas estas considerações, o que se pode inferir ao aerossol de chumbo, é que sua mínima temperatura de ignição é em torno de 1173K, o que é acima do ponto de fusão do seu óxido como o do titânio.

Tabela 6.5: Temperatura de ignição T_{dL} da partícula de alumínio.

Temperatura/ metal	Alumínio [K]
T_0	2273
$T_{dL(\eta=1)}$	2277
$T_{dL(\eta<1)}$	2299
$T_{dL(\eta>1)}$	1353

Tabela 6.6: Temperatura de ignição T_{dL} da partícula de magnésio.

Temperatura/ metal	Magnésio [K]
T_0	1053
$T_{dL(\eta=1)}$	1066
$T_{dL(\eta<1)}$	1072
$T_{dL(\eta>1)}$	426

Tabela 6.7: Temperatura de ignição T_{dL} da partícula de titânio

Temperatura/ metal	Titânio [K]
T_0	2400
$T_{dL(\eta=1)}$	2403
$T_{dL(\eta<1)}$	2410
$T_{dL(\eta>1)}$	2299

Tabela 6.8: Temperatura de ignição T_{dL} da partícula de chumbo.

Temperatura/ metal	Chumbo [K]
T_0	-
$T_{dL(\eta=1), K}$	1174
$T_{dL(\eta<1), K}$	1284
$T_{dL(\eta>1), K}$	864
$K_D, s/cm^2$	466,6

6.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES DO TESTE COM A MISTURA DE MATERIAIS PARTICULADOS PROVENIENTES DA RECICLADORA DE CHUMBO

Em razão da toxicidade do material (composição do material, vide tabelas 1.1.e 1.2), somente dez testes foram realizados com a mistura contendo chumbo. Nos cinco primeiros, não se visualizou a propagação da chama. Para os cinco testes restantes, secou-se a amostra em estufa a 36°C por 24 horas, e após esse tempo, as amostras foram novamente testadas na BTE, e igualmente ao teste anterior, a propagação da chama não foi visualizada.

Quanto aos resultados obtidos, não foi possível afirmar se a mistura de metais, proveniente da Recicladora de Chumbo, é ou não explosiva, uma vez que o material particulado foi testado na forma como foi coletado, sem qualquer tratamento para separação de tamanho de partículas, e para podermos afirmar que o material particulado em questão não é explosivo, se faz necessária a separação deste material em diferentes granulometrias, e somente no caso de nenhuma das granulometrias ser possível a visualização da chama, podemos considerar que tal material não é explosivo.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1. CONCLUSÕES

A análise e discussão dos resultados obtidos neste trabalho permitiram as seguintes conclusões:

Permitiu verificar, que o chumbo, queima de forma heterogênea, assim como o titânio, e ainda que sua temperatura de ignição é por volta de 1173K para uma partícula de 20 μ m, e que para partículas menores, a temperatura de ignição do chumbo aumenta, seguindo o comportamento da maioria dos metais.

Quanto ao teste de explosividade, é possível inferir que, a respeito da Bancada de Teste de Explosividade (BTE) ou tubo de teste vertical, o equipamento mostrou-se eficiente, no que diz respeito à formação de uma nuvem explosiva. Em relação ao teste com a mistura de material particulado proveniente do filtro magas, na condição do teste, apesar do baixo ponto de ignição do chumbo encontrado pela modelagem matemática, não houve a visualização da propagação da chama autossustentada.

7.2. RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se como forma de continuidade para o melhor entendimento dos fenômenos da combustão e explosão de partículas de chumbo, a avaliação experimental da estrutura da capa de óxido, a fim de definir sua lei de oxidação ($n = 0, 1 \dots$).

Sugere-se uma avaliação de explosividade de partículas de chumbo com diâmetros de $20\mu\text{m}$, na BTE.

Para que o material particulado, coletado nos filtros maga da Recicladora de Chumbo, seja ou não considerado um aerossol explosivo faz-se necessário, outros testes, como:

- Testar a amostra em diferentes granulometrias, e/ou
- Uma fonte de ignição mais forte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Borton, J. (2002). “Dust Explosion Prevention and Protection.” Institution of Chemical Engineers -IChemE, Warwickshire UK, 2, 8-25.
- Brown, H. R. (1925). “Dust Explosions in Industrial Plants.” *Industrial and Engineering Chemistry*, 17, 8.
- Paolo, C.(2001). “Some historical accidental explosions.” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 14, 69–76
- Carson, P. e Mumford, C. (2002). “Hazardous Chemicals Handbook.” Butterwort Heinemann, London UK, 1, 1-2.
- Cashdollar, K.L. e Zlochower I.A. (2007). “Explosion temperatures and pressures of metals and other elemental dust clouds.” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 20, 337-348.
- Davis, W. C. (1987). “The Detonation of Explosives.” *Scientc American*, 98-105.
- Dorsett, H. G., M. Jacobson, J. Nagy, *et al.* (1960) “Laboratory Equipment and Test Procedures for Evaluating Explosibility of Dusts.” Report Inv. 5424. Washington, DC: U.S. Bureau of Mines.
- Dreizin, E. L. (1994). “Internal and Surface Phenomena in Metal Combustion.” *NASA*, N96, 15571.
- Dreizin, E. L. (1996). “Experimental Study of Stages in Aluminum Particle Combustion in Air.” *Combustion and Flame*, 105, 541-556.

Dreizin, E. L. (1999). "Experimental Study of Stages in Aluminum Particle Combustion in Air." *Combustion and Flame*, 116, 323–333.

Dreizin, E. L. e Hoffmann, V. K. (1999). "Constant Pressure Combustion of Aerosol of Coarse Magnesium Particles in Microgravity." *Combustion and Flame*, 118, 262–280.

Dreizin, E. L., Keil, D. G e Felder, W. (1999). "Phase Changes in Boron Ignition and Combustion." *Combustion and Flame*, 119, 272-290.

Eckhoff, R.K. (2003). "Dust explosions in the process industries." (3rd ed) *Elsevier Science*, Boston USA.

Eckhoff, R. K. (2008). "Understanding dust explosions. The role of powder science and technology." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, xxx, 1–12

Ermakov, V. A., A. A. Razdobreev, A. I. Shorik, et al. (1982) "Temperature of Aluminium Particles at the Time of Ignition and Combustion." *Fizika Goveniya i Vzryva* 18, no. 2, pp. 141-143. (English translation in *Combustion, Explosion, and Shock Waves* (1982), pp. 12-16, published by Plenum Publishing Corporation, New York.)

Fedorov, A.V. e Kharlamova Y.V. (2003). "Ignition of an Aluminum Particle." *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 39, 544-547.

Friedman, R., and A. Macek. (1962) "Ignition and Combustion of Aluminium Particles in Hot Ambient Gases." *Combustion and Flame* 6, 9-19.

- Froelich, D., Corbel, S. e Prado, G. (1987). “Experimental Study and Modelling of the Combustion of a Coal Particle.” *International Chemical Engineering*, 27, 66-69.
- Glassman, I. e Yetter R. (2008). “Combustion”, Elsevier, San Diego USA, 09, 495-700.
- Gomez, C.O., e Vastola, E J. (1985). “Ignition and Combustion of Single Coal and Char Particles. A Quantitative Differential Approach.” *Fuel*, 64, 559-563.
- Gosteev Y. A. e Fedorov A. V. (1998). “Mathematical Study of Thermal Explosion of a Magnesium Particle with Allowance for Metal Evaporation.” *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 34, 2.
- Gosteev Y. A. e Fedorov A. V. (1999). “Ignition of a Cloud of Metal Particles in the Continuum Regime. I. Adiabatic Flow.” *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 35, 5.
- Gosteev Y. A. e Fedorov A. V. (2005). “Discrete-Continual Model of Flame Propagation in a Gas Suspension of Metal Particles. I. One-Dimensional Approximation.” *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 41, 2, 190–201.
- Gosteev Y. A., Fedorov A. V. e Shul’gin, A. V. (2005). “Discrete -Continual Model of Flame Propagation in a Gas Suspension of Metal Particles. II. Allowance for the Pre-Flame Oxidation Reaction.” *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 41, 2, 202–205.
- Guerrero, A. Romero, A. Morales, R. D e Chavez, F. (1997). “Thermodynamic Analysis of the Soda Ash Smelting of Lead Acid Aattery Residue in a Rotary Furnace.” *Canadian Metallurgical Quarterly*, 36, 121-130,

Jaekel, 6.(1924) “Die Staubexplosionen.” *Zeitschrijtfur technische Physik*, pp. 67-78.

JANAF. (1998). “Thermochemical Tables.” *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 9.

Johansen, C. e Ciccarelli, G. (2008). “Combustion in a horizontal channel partially filled with a porous media.” *Shock Waves*, 18, 97–106.

Khaikin, B I., Bloshenko, V N e Merzhanov, A G. (1970). “On ignition of metal particles.” *Journal Combustion, Explosion and Shock Waves*. 6, 412.

Kreusch, M.A., Ponte, M.J.J.S., Ponte, H.A., Kaminari, N.M.S., Marino, C.E.B. e Mymrin, V. (2007). “Technological improvements in automotive battery recycling.” *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 368–380.

Lee, J.H.S. (1987). “Dust Explosions: An Overview.” *Proceedings of the International Symposium on Shock Tubes and Waves*, Aachen, Germany, pp. 21-38.

Lees, F. P. (1996). “Loss Prevention in the Process Industries.” (2rd ed), *Butterworth-Heinemann*, Boston USA.

Lewis, A. E. e Beautement, C. (2002). “Prioritising objectives for waste reprocessing: a case study in secondary lead refining”. *Waste Management*, 22, 677–685.

Liedel, N., Busch, K.A. e Linch, J. (1977). “Occupational exposure sampling strategy manual”. *NIOSH*, Cincinnati USA, 77-173, 132.

- Marmo L., Cavallero D. e Debernardi M.L. (2004). "Aluminium dust explosion risk analysis in metal workings." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 17, 449–465.
- Merzhanov, A. G. (1975). "Thermal theory of metal particle ignition", *AIAA Journal*, 13, 209.
- Mitsuil, R. e Tanaka, T. (1973). "Simple Models of Dust Explosion. Predicting Ignition Temperature and Minimum Explosive limit in Terms of Particle Size." *Industrial Engineering Chemical Process Design and Development*, 12, No. 3
- Molodetsky, I. E., Vicenzi, E. P., Dreizin, E. L. e Law, C. K. (1992). "Phases of Titanium Combustion in Air." *Combustion And Flame*, 112, 522-532.
- Nomura, S.I., e Tanaka, T. (1978). "Theoretical Discussion of the Flame Propagation Velocity of a Dust Explosion. The Case of Uniform Dispersion of Monosized Particles. Heat Transfer." *Japanese Research*, 7, 79-86.
- Nomura, S.I., e Tanaka, T. (1980). "Prediction of Maximum Rate of Pressure Rise Due to Dust Explosion in Closed Spherical and Non-Spherical Vessels." *Industrial Engineering Chemical Process Design and Development*, 19, 451-459.
- Nomura, S.I., Torimoto, M., e T. Tanaka. (1984). "Theoretical Upper Limit of Dust Explosions in Relation to Oxygen Concentration." *Industrial Engineering Chemical Process Design and Development*, 23, 420-423.
- OSHA (2005). "Combustible Dust in Industry: Preventing and Mitigating the Effects of Fire and Explosions." *Safety and Health Information Bulletin*, 07, 31.

Perry, R. H. (1997). "Perry's chemical engineers' handbook." McGraw-Hill, New York, U.S.A, 2, 2.1-2.204.

Phillips, M. J. e Lim S.S. (1998). "Secondary lead production in Malaysia". *Journal of Power Sources*, 73, 11–16.

Pritchard D.K. (2004). "Literature review – explosion hazards associated with nanopowders." *Health & Safety Laboratio, HSE*.

Proust, C. (2006). "Flame propagation and combustion in some dust-air mixtures." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19, 89–100.

Razdobreev, A. A., A. I. Skorik, e Y. V. Frolov. (1976) "Ignition and Combustion Mechanism of Aluminium Particles." *Fizika Goreniya i Vzvyva* 12, no. 2, pp. 203-208. (English translation in *Combustion, Explosion, and Shock Waves* (1976), pp. 203-208, published by Plenum Publishing Corporation, New York.)

Shchepakina, E. e Sobolev, V. (2008). "Modelling of Critical Phenomena for Ignition of Metal Particles", *Journal of Physics: Conference Series*. 138, 012-025.

Shoshin, Y. L. e Dreizin, E. L. (2006). "Particle Combustion Rates for Mechanically Alloyed Al–Ti and Aluminum powders Burning in Air." *Combustion and Flame*, 145, 714–722.

Steinberg, T. A. e Wilson, D. B. (1992). "The Combustion Phase of Burning Metals.", *Combustion and Flame*, 91, 200-208.

Stephan, C.R., (1990). "Coal dust as a fuel for fires and explosions.", *US Mine Safety and Health Administration, Pittsburgh*, No.01-066-90

- Sun, J. Dobashi, R e HIRANO, T. (1998). "Structure of Flames Propagating through Metal Particle Clouds and Behavior of Particles." *The Combustion Institute*, 1998, 2405–2411.
- Sun, J. Dobashi, R e HIRANO, T. (2006). "Structure of flames propagating through aluminum particles cloud and combustion process of particles." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 19, 769–773.
- TrosteI, L. J e Frevert, H. W.(19220). "Dust Explosions in Industrial Plants." *Industrial and Engineering Chemistry*, 15, 3.
- Trunov, M. A., Schoenitz, M., Zhu, X. e Dreizin, E. L., (2005), "Effect of polymorphic phase transformations in Al₂O₃ film on oxidation kinetics of aluminum powders", *Combustion and Flame*. 140, 310–318.
- Tulis, A. I. e Selman, J. R., (1984). "Unconfined Aluminium Particle Two-Phase Detonation in Air." *AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics*, 94, pp. 277-292.
- Tulis, A. J. (1984). "Initiation and Propagation of Detonation in Unconfined Clouds of Aluminium Powder in Air." *Proceedings of the Ninth International Seminar on Pyrotechnics*.
- Ural, E. A. (1989) "Experimental Measurement of the Aerodynamic Entrainability of Dust Deposits." 12th International Colloquium on Dynamic Explosive Reaction Systems, Ann Arbor, MI.
- Wang, T., Zhu, M. e Zhang, J. (2002). "Evaluation of the Ignition Temperature in Thermal Explosion Synthesis of TiAl₃ by Differential Scanning Calorimetry." *Journal Material Science Technologic*, 18, 4.

Williams F. A., (1985). "Combustion Theory" Redwood City, CA: Addison, Wesley.

Williams F. A. (1997). "Some Aspects of Metal Particle Combustion", *Physical and Chemical Aspects of Combustion: A Tribute to Irv Glassman ed F L Dryer and R F Sawyer*, Netherlands, 267-289.

Wingerden, K. V. e Stavseng, L. (1996). "Measurements of the laminar burning velocities in dust-air mixtures." *VDI-Berichte* 1272, 553-564.

Wolanski, P., Lee, D., Sichel, M., et al. (1984). "The Structure of Dust Detonations." *AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics*, 94, 242-263.

Yarin, L. P. e Hetsroni, G. (2004). "Combustion of Two-Phase Reactive Media." *Heat and Mass Transfer*, Springer, New York, USA.

Yetter R. A. e Dryer F. L. (2001). "Metal Particle Combustion and Classification Microgravity Combustion: Fire in Free Fall", *H Ross*, 419-478.

Zalosh, R., Grossel, S., Kahn, R., e Sliva, D. (2005). "Dust Explosion Scenarios and Case Histories in the CCPS Guidelines for Safe Handling of Powders and Bulk Solids." *AICHe Loss Prevention Symposium Session on Dust Explosions*, Atlanta, USA.

ANEXO

A - INTERNATIONAL CHEMICAL SAFETY CARDS

ICSC: 0052

International Chemical Safety Cards

LEAD

ICSC: 0052


Lead metal
Plumbum
Pb
Atomic mass: 207.2
(powder)

ICSC # 0052
CAS # 7439-92-1
RTECS # [OF7525000](#)
October 08, 2002 Peer reviewed

TYPES OF HAZARD/ EXPOSURE	ACUTE HAZARDS/ SYMPTOMS	PREVENTION	FIRST AID/ FIRE FIGHTING
FIRE	Not combustible. Gives off irritating or toxic fumes (or gases) in a fire.		In case of fire in the surroundings: use appropriate extinguishing media.
EXPLOSION	Finely dispersed particles form explosive mixtures in air.	Prevent deposition of dust; closed system, dust explosion-proof electrical equipment and lighting.	
EXPOSURE	See EFFECTS OF LONG-TERM OR REPEATED EXPOSURE.	PREVENT DISPERSION OF DUST! AVOID EXPOSURE OF (PREGNANT) WOMEN!	
• INHALATION		Local exhaust or breathing protection.	Fresh air, rest.
• SKIN		Protective gloves.	Remove contaminated clothes. Rinse and then wash skin with water and soap.
• EYES		Safety spectacles.	First rinse with plenty of water for several minutes (remove contact lenses if easily possible), then take to a doctor.
• INGESTION	Abdominal pain. Nausea. Vomiting.	Do not eat, drink, or smoke during work. Wash hands before eating.	Rinse mouth. Give plenty of water to drink. Refer for medical attention.

SPILLAGE DISPOSAL	STORAGE	PACKAGING & LABELLING
Sweep spilled substance into containers; if appropriate, moisten first to prevent dusting. Carefully collect remainder, then remove to safe place. Do NOT let this chemical enter the environment. Personal protection: P3 filter respirator for toxic particles.	Separated from food and feedstuffs incompatible materials See Chemical Dangers.	R: S:

SEE IMPORTANT INFORMATION ON BACK

ICSC: 0052

Prepared in the context of cooperation between the International Programme on Chemical Safety & the Commission of the European Communities (C) IPCS CEC 1994. No modifications to the International version have been made except to add the OSHA PELs, NIOSH RELs and NIOSH IDLH values.

International Chemical Safety Cards

LEAD

ICSC: 0052

<p>I</p> <p>M</p> <p>P</p> <p>O</p> <p>R</p> <p>T</p> <p>A</p> <p>N</p> <p>T</p> <p>D</p> <p>A</p> <p>T</p> <p>A</p>	<p>PHYSICAL STATE; APPEARANCE: BLUISH-WHITE OR SILVERY-GREY SOLID IN VARIOUS FORMS. TURNS TARNISHED ON EXPOSURE TO AIR.</p> <p>PHYSICAL DANGERS: Dust explosion possible if in powder or granular form, mixed with air.</p> <p>CHEMICAL DANGERS: On heating, toxic fumes are formed. Reacts with oxidants. Reacts with hot concentrated nitric acid, boiling concentrated hydrochloric acid and sulfuric acid. Attacked by pure water and by weak organic acids in the presence of oxygen.</p> <p>OCCUPATIONAL EXPOSURE LIMITS: TLV: 0.05 mg/m³ A3 (confirmed animal carcinogen with unknown relevance to humans); BEI issued (ACGIH 2004). MAK: Carcinogen category: 3B; Germ cell mutagen group: 3A; (DFG 2004). EU OEL: as TWA 0.15 mg/m³ (EU 2002). OSHA PEL*: 1910.1025 TWA 0.050 mg/m³ See Appendix C *Note: The PEL also applies to other lead compounds (as Pb) -- see Appendix C. NIOSH REL*: TWA 0.050 mg/m³ See Appendix C *Note: The REL also applies to other lead compounds (as Pb) -- see Appendix C. NIOSH IDLH: 100 mg/m³ (as Pb) See: 7439921</p>	<p>ROUTES OF EXPOSURE: The substance can be absorbed into the body by inhalation and by ingestion.</p> <p>INHALATION RISK: A harmful concentration of airborne particles can be reached quickly when dispersed, especially if powdered.</p> <p>EFFECTS OF SHORT-TERM EXPOSURE:</p> <p>EFFECTS OF LONG-TERM OR REPEATED EXPOSURE: The substance may have effects on the blood bone marrow central nervous system peripheral nervous system kidneys , resulting in anaemia, encephalopathy (e.g., convulsions), peripheral nerve disease, abdominal cramps and kidney impairment. Causes toxicity to human reproduction or development.</p>
---	--	---

PHYSICAL PROPERTIES	Boiling point: 1740°C Melting point: 327.5°C	Density: 11.34 g/cm ³ Solubility in water: none
----------------------------	---	---

ENVIRONMENTAL DATA	Bioaccumulation of this chemical may occur in plants and in mammals. It is strongly advised that this substance does not enter the environment.	
---------------------------	---	---

NOTES

Depending on the degree of exposure, periodic medical examination is suggested. Do NOT take working clothes home.
 Transport Emergency Card: TEC (R)-51S1872

ADDITIONAL INFORMATION

ICSC: 0052	LEAD
(C) IPCS, CEC, 1994	

IMPORTANT LEGAL NOTICE:	Neither NIOSH, the CEC or the IPCS nor any person acting on behalf of NIOSH, the CEC or the IPCS is responsible for the use which might be made of this information. This card contains the collective views of the IPCS Peer Review Committee and may not reflect in all cases all the detailed requirements included in national legislation on the subject. The user should verify compliance of the cards with the relevant legislation in the country of use. The only modifications made to produce the U.S. version is inclusion of the OSHA PELs, NIOSH RELs and NIOSH IDLH values.
--------------------------------	---

**B_ ORDEM DE SERVIÇO-MANUSEIO DO PÓ DE
FILTRO (CHUMBO).**

B - ORDEM DE SERVIÇO (Coleta de Amostra)

Substâncias químicas: as substâncias químicas presentes no material são especificadas nas tabelas 1.1 e 1.2.

Substancia em maior quantidade: Chumbo (Pb); limite de tolerância média ponderada: TLV-TWA= 0,05mg/m³.

Chumbo é considerado, “A3”, cancerígeno comprovado em animais, em altas doses.

Substância de maior toxicidade: Arsênio (As); limite de tolerância média ponderada: TLV-TWA= 0,01mg/m³.

O Arsênio é considerado, “A1”, cancerígeno comprovado em seres humanos

Equipamentos de Proteção Individual (EPI): máscara semifacial com filtro “P3”; óculos de proteção, luva de látex; sobretudo descartável ou uniforme.

Obs: O sobretudo descartável deve ser acondicionado em um saco plástico e enviado para um destino correto, incineração ou depósito de rejeitos químicos, e no caso de uniforme deve ser lavado em empresas especializadas.

Procedimento de coleta:

Após vestir todos os EPI, utilizando uma pá coletou-se a amostra (vide Fig. 2.8). A amostra foi colocada em um recipiente impermeável, para evitar a umidade e impedir que o material se disperse no ar.