

1 2 9 0



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Marta Filipa Machado Vilela de Oliveira

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DE
LAMAS DE ETAR NA PRESSÃO DE EXPLOÇÃO
MÁXIMA E VELOCIDADE DE CRESCIMENTO DE
PRESSÃO.**

Dissertação no âmbito do perfil de Tecnologia e Gestão do Ambiente do mestrado integrado em Engenharia Mecânica orientada pelo Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes e pelo Professor Doutor José Carlos Miranda Góis e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.

Outubro de 2020

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Estudo da influência das características de lamas de ETAR na pressão de explosão máxima e velocidade de crescimento de pressão.

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica
na Especialidade de Produção e Projeto

Study of the influence of WWTP sludge characteristics on the maximum explosion pressure and pressure growth speed.

Autor

Marta Filipa Machado Vilela de Oliveira

Orientadores

Professor Doutor José Carlos Miranda Góis

Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes

Júri

Presidente

Professor Doutor Adélio Gaspar

Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais

Professor Doutor José Manuel Baranda Ribeiro

Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador

Professor Doutor José Carlos Góis

Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, outubro, 2020

Estudo da influência das características de lamas de ETAR na pressão de explosão máxima e velocidade de crescimento de pressão.

“Let's make our future now, and let us make our dreams tomorrow's reality.”

Malala Yousafzai



Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto ‘Dry2Value Estudo e desenvolvimento de um Sistema de secagem para valorização de lamas. Projeto de consórcio com HRV e BioSmart Soluções Ambientais. POCI 01 0247 FEDER 033662. Financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) Programa Operacional Competitividade e Internacionalização.



Cofinanciado por:



Agradecimentos

Quero agradecer aos meus orientadores Ricardo Mendes e José Góis por toda a ajuda e apoio prestado na realização da dissertação. Sem essa importante ajuda ao longo do decorrer deste período todo o trabalho ter-se-ia tornado muito difícil ou mesmo impossível.

Agradeço também à Andreia Santos e ao João Pais por me fornecerem não só as lamas e o material necessário para realizar os ensaios, mas também por toda a disponibilidade e ajuda no decorrer dos ensaios experimentais.

Não poderia deixar de agradecer aos meus colegas e amigos que me acompanharam ao longo do curso.

E por fim um agradecimento muito especial aos meus pais e irmão por estarem sempre do meu lado todos estes anos.

A todos, muito obrigado.

Resumo

Este trabalho teve como objetivo a determinação experimental das características de explosividade de lamas provenientes de Estações de Tratamento de Águas Residuais em Portugal (ETAR), de forma a avaliar os riscos associados a possíveis explosões durante o armazenamento, tratamento e transporte destas.

Os ensaios experimentais foram efetuados numa câmara de explosão fechada, esférica, com capacidade de 23,9 l, tendo sido ensaiadas diferentes poeiras. A amostra de poeiras era colocada num recipiente de 0,76 l, que era pressurizado a 20 *bar* e, após a abertura rápida de uma electroválvula, as poeiras eram lançadas no interior da câmara de explosão formando uma suspensão de poeiras. De seguida, era libertada uma energia de 10 kJ no interior da câmara através da explosão de dois ignidores, por ação da descarga elétrica de um condensador, gerando assim condições para a explosão da suspensão, que se manifestava pelo rápido aumento da pressão.

O trabalho experimental consistiu na avaliação dos parâmetros de explosividade em função do tempo, ou seja, pressão máxima e velocidades de aumento de pressões máximas. Realizaram-se ensaios para diferentes concentrações de poeira em suspensão, de 125 g/m^3 , 250 g/m^3 e 750 g/m^3 , de forma a determinar a influência na pressão e velocidade máxima de aumento de pressão.

Deste estudo obtiveram-se como valores máximos de pressão e velocidade máxima de aumento de pressão, 2,1 *bar* e 0,285 *bar/ms* para uma concentração de 125 g/m^3 , 4,4 *bar* e 0,506 *bar/ms* para uma concentração de 250 g/m^3 e, por último, 5,6 *bar* e 0,412 *bar/ms* para uma concentração de 750 g/m^3 . Para as amostras ensaiadas, concluiu-se que um aumento da concentração provocará um aumento da pressão de explosão máxima. Quanto à velocidade máxima de aumento de pressão de explosão, não se verifica o mesmo, sendo que, em certos casos, foi observada uma diminuição da mesma, com o aumento dos valores de concentração.

Palavras-chave: Explosividade, Pressão máxima de explosão, Velocidade máxima de aumento de pressão de explosão, Valorização de lamas de ETAR, Concentração da suspensão de poeiras.

Abstract

This paper aims to reach the experimental determination of the explosibility of dust clouds, performed using sludge from Wastewater Treatment Plants of Portugal, to minimize characterize the risks associated with explosions during storage, treatment and transportation of this material.

The experiences were done in a closed explosion spherical vessel with 23,9 l, and different dust samples were tested. The dust sample was placed in a 0.76 l container, which was pressurized at 20 bar and, after the rapid opening of a solenoid valve, the dust was released into the explosion chamber forming a suspension of dust. Then, an energy of 10 kJ was released inside the chamber through the explosion of two ignitors, by the action of the electrical discharge of a condenser, thus generating conditions for the explosion of the suspension, which was manifested by the rapid increase in pressure.

The experimental work consisted of the evaluation of the explosiveness parameters as a function of time, that is, maximum pressure and speeds of increase in maximum pressures. Tests were done by varying the concentration of dust in suspension, using 125 g/m^3 , 250 g/m^3 and 750 g/m^3 in order to determine pressure and the explosion's maximum pressure increase rate, for different sludge concentration values.

The experimental work ended with the determination of the maximum pressure and the maximum rate of pressure increase values, $2,1 \text{ bar}$ and $0,285 \text{ bar/ms}$, for a concentration of 125 g/m^3 , $4,4 \text{ bar}$ e $0,506 \text{ bar/ms}$ for a concentration of 250 g/m^3 and, lastly, $5,6 \text{ bar}$ e $0,412 \text{ bar/ms}$ for a concentration of 750 g/m^3 . With these results, it is possible to assume that the increase of concentration will cause an increase of the maximum explosion pressure. But the same cannot be assumed with the maximum rate of explosion pressure increase, since, in some cases, here is a decrease in this parameter, with the increase of concentration.

Keywords Explosibility, Maximum explosion pressure, Maximum rate of explosion pressure increase, WWTP sludge recovery, Dust suspension concentration.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	6
Resumo	7
Abstract.....	8
ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
ÍNDICE DE TABELAS.....	13
SIMBOLOGIA E SIGLAS.....	14
1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. Enquadramento do Trabalho	17
1.2. Objetivos	21
2. ESTADO DE ARTE	23
2.1. Produção de Lamas	23
2.1.1. Situação na União Europeia	23
2.1.2. Situação em Portugal	26
2.2. Secagem Térmica	26
2.3. Generalidade sobre Explosão de Poeiras	28
2.3.1. Dimensões da Partícula	34
2.3.2. Humidade do Meio Envolvente	35
2.3.3. Concentração de Poeiras no Meio Envolvente.....	35
2.3.4. Concentração de Oxigénio	36
2.3.5. Pressão e Velocidade de Aumento de Pressão de Explosão Máximas.....	37
2.4. Outros trabalhos de explosividade de poeiras.....	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1. Caracterização das Lamas em Estudo	43
3.2. Metodologia de Ensaios	45
3.2.1. Câmara de Explosão	47
3.2.2. Fonte de Ignição	48
3.3. Procedimento Experimental	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1. Composição Elementar de Lamas de ETAR.....	51
4.2. Análise e Descrição da Curva de Pressão.....	51
4.3. Metodologia de Resultados	53

4.4. Determinação da Pressão de Explosão e Velocidade de Aumento de Pressão de Explosão Máximas	54
5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUAÇÃO DO TRABALHO	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
Anexo A	63
Apêndice A	65
Apêndice B	68
Apêndice C	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de tratamento da fase líquida e fase sólida de uma ETAR (Ramos, 2011) (apud Liz, 2017).	19
Figura 2 - Quantidade de lamas produzidas em alguns países da UE, no período 2012-2018 (EUROSTAT, 2020).	24
Figura 3 - Quantidade de lamas enviadas para valorização agrícola em alguns países da UE, no período 2012-2018 (EUROSTAT, 2020).	24
Figura 4 - Quantidade de lamas enviadas para aterro em alguns países da UE, no período 2012-2018 (EUROSTAT, 2020).	25
Figura 5 - Diagrama simplificado representativo da secagem térmica.....	27
Figura 6 - Principais fatores condicionantes da existência das características duma explosão de suspensões de poeiras (Campos, 1982) (apud Sousa, 2013).	30
Figura 7 - Organograma da formação de uma explosão de suspensões de poeiras (Campos, 1984).	30
Figura 8 - Condições necessárias para a ocorrência de explosão (Atrav, n.d.).	32
Figura 9 - Domínio de explosividade de uma mistura combustível-ar (Atrav, n.d.).	32
Figura 10 - Esquema da comparação entre detonação e deflagração.....	34
Figura 11 - Características da reação de combustão de combustíveis sólidos (Medic Pejic <i>et al.</i> , 2015).	41
Figura 12 - - Esquema geral do procedimento experimental numa câmara de explosão (EN 14034-1).	46
Figura 13 - Câmara de explosão (EN 14034-1).	47
Figura 14 - Quadro elétrico/eletrónico da Unidade de controlo (Mecânica, 2013)	49
Figura 15 - Curva típica de pressão de explosão (Mecânica, 2013).	52
Figura 16 - Descarga de ar do recipiente de pó para a câmara esférica sem ignidores pirotécnicos e sem vácuo inicial.....	53
Figura 17 - Descarga de ar do recipiente de pó para a câmara esférica com ignidores pirotécnicos.....	54
Figura 18 - Efeito da concentração de pó na evolução da pressão de explosão (lama AD5).	55
Figura 19 - Efeito da concentração de pó na evolução da velocidade de aumento de pressão de explosão (lama AD5).	55
Figura 20 - Efeito da concentração de poeiras sobre a pressão máxima de explosão.	57
Figura 21 - Efeito da concentração do pó na evolução da velocidade de aumento de pressão de explosão máxima.....	58
Figura 22 - Evolução da pressão durante a explosão da suspensão de poeiras das lamas de ETAR com concentração de 125 g/m ³	65
Figura 23 - Evolução da velocidade de aumento de pressão durante a explosão da suspensão de poeiras de lamas de ETAR com concentração de 125 g/m ³	65
Figura 24 - Evolução da pressão durante a explosão da suspensão de poeiras das lamas de ETAR com concentração de 250 g/m ³	66
Figura 25 - Evolução da velocidade de aumento de pressão durante a explosão da suspensão de poeiras de lamas de ETAR com concentração de 250 g/m ³	66

Estudo da influência das características de lamas de ETAR na pressão de explosão máxima e velocidade de crescimento de pressão.

Figura 26 - Evolução da pressão durante a explosão da suspensão de poeiras das lamas de ETAR com concentração de 750 g/m ³	67
Figura 27 - Evolução da velocidade de aumento de pressão durante a explosão da suspensão de poeiras de lamas de ETAR com concentração de 750 g/m ³	67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de lamas produzidas e de lamas utilizadas na agricultura a nível nacional, no período 2013-2015 (Adaptado de (APA, 2012).	26
Tabela 2 - Parâmetros da gravidade da explosão.	40
Tabela 3 - Análise elementar e poder calorífico superior e inferior das lamas (Dry2Value, 2020).	44
Tabela 4 - Resumo dos resultados experimentais obtidos.	68

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

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

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

P_d – Pressão de expansão do recipiente das poeiras

t_1 – Intervalo de tempo entre a ativação da ignição e o ponto em que se verifica a pressão máxima

t_d – Intervalo de tempo entre o sinal elétrico de abertura da eletroválvula e o início da subida de pressão

t_e – Intervalo de tempo entre os sinais elétricos de abertura e fecho da eletroválvula

t_i – Intervalo de tempo entre os sinais elétricos de fecho da eletroválvula e de disparo do inflamador

t_v – Intervalo de ignição

E_i – Energia de ignição

P – Pressão

PCS – Poder calorífico superior

P_{ci} – Pressão provocada pelos ignidores pirotécnicos

P_{exp} – Pressão máxima de explosão de cada ensaio

$P_{máx}$ – Pressão máxima de explosão

$P_{máx,20l}$ – Pressão máxima de explosão registada na câmara de 20 l

dP/dt – Velocidade de aumento de pressão

k – Constante de velocidade

Δt_i – Valor da razão dos calores específicos a pressão e volume constante da mistura não queimada

Siglas

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

ATEX – Atmosferas Explosivas

CE – Comissão Europeia

CLO – Concentração Limite de Oxigénio

CST – Mudança de Temperatura de Inclinação

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DRAP – Direções Regionais de Agricultura e Pesca

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

IET – Temperatura Exotérmica Inicial

LIE – Limite Inferior de Explosividade

LSE – Limite Superior de Explosividade

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCS – Poder Calorífico Superior

SST – Partículas Sólidas

UC – Universidade de Coimbra

Estudo da influência das características de lamas de ETAR na pressão de explosão máxima e velocidade de crescimento de pressão.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do Trabalho

Com o aumento da taxa de urbanização aparecem algumas obrigatoriedades na recolha e tratamento das águas residuais urbanas o que fomentou a construção de Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR), visto haver uma necessidade de preservação da água como recurso essencial à vida.

Após o tratamento das águas residuais urbanas na ETAR geram-se lamas, estas são um resultado inevitável do tratamento das águas residuais, sendo assim, um dos subprodutos das ETAR. Com a progressão da legislação ambiental e o aumento da atividade domésticas e industriais o tratamento de águas residuais aumentou, e, com ele, a produção de lamas de depuração provenientes das ETAR também aumentou, ininterruptamente, por todo o mundo tornando-se necessário lidar com este problema ambiental.

Até recentemente, pensava-se que as lamas eram um material com pouco valor sendo estas incineradas ou depositadas em aterros sanitários. Mas, as enormes quantidades de lamas produzidas a nível global tornam todas estas opções como ambientalmente inaceitáveis.

O tratamento de águas residuais, acontece em quatro etapas.

O tratamento preliminar consiste em operações fundamentalmente físicas de filtração e separação dos materiais mais grosseiros e sólidos facilmente sedimentáveis, provenientes das águas residuais de uso doméstico e industrial, protegendo assim as operações a jusante e reduzindo os custos de manutenção dos processos e equipamentos que constituem a ETAR. Este processo é normalmente constituído por grades, trituradores, desintegradores e câmaras desarenadoras (Liz, 2017).

O tratamento primário tem como objetivo a remoção da maior parte dos sólidos em suspensão presentes nas águas residuais por ação gravítica, através de um decantador/sedimentador primário. Estes ao serem removidos, vão contribuir para que exista uma redução na carência bioquímica de oxigénio na água residual, contribuindo para uma diminuição do consumo de energia e dos problemas operacionais nos tratamentos biológicos. Nesta etapa assegura-se a redução mínima de 50% das partículas sólidas (SST) e de 20% da carência biogénica de oxigénio (CBO₅), isto é, a quantidade de oxigénio consumido nos processos biológicos que ocorrem devido, maioritariamente, à decomposição da matéria orgânica presente nas águas residuais (Santos, *et al.*, 2016) (apud Lamas, *et al.*, 2019).

O tratamento secundário tem como objetivo a remoção da carência bioquímica de oxigénio presente na água residual, consiste num processo biológico, onde a matéria orgânica poluente é consumida por microrganismos. Este processo consiste em provocar a floculação das partículas orgânicas e inorgânicas presentes no bio reator, por meio de

agitação mecânica e/ou difusão do ar. É constituído por um tanque de arejamento, onde as águas residuais são misturadas com microrganismos em suspensão. Estes microrganismos, com condições próprias (temperatura, pH, oxigénio, nutrientes e tempo de residência) consomem e assimilam a matéria orgânica presente no bio reator, depurando-o e sobrevivendo à custa do oxigénio introduzido pela agitação provocada pela turbina e/ou difusor do ar. O tanque de arejamento funciona em conjunto com o decantador secundário, permitindo o depósito das lamas resultantes da ação das bactérias (Liz, 2017).

Normalmente segue-se o tratamento terciário que surge como complemento dos tratamentos anteriormente referidos, onde se dá a remoção de poluentes que ainda se encontrem na água residual e onde se dá a desinfecção das águas residuais tratadas para a remoção dos agentes patogénicos. O processo de desinfecção tem como objetivo remover ou destruir os microrganismos patogénicos através da adição de agentes químicos, como por exemplo, cloro, ozono e dióxido de cloro, ou através de agentes físicos, tendo como exemplo a desinfecção por radiação ultravioleta, filtração estéril ou filtração por areia a baixa velocidade. Existem ainda outros tipos de tratamentos para a remoção de poluentes específicos, como por exemplo a coagulação, floculação e decantação, troca iónica e osmose inversa. Obtém-se assim a água devidamente tratada e preparada para ser devolvida ao meio ambiente.

No final deste tratamento obtemos dois tipos de produtos finais, as águas tratadas e as lamas. A composição e qualidade das lamas de depuração variam de acordo com a composição das águas residuais que deram origem (teor de sólidos suspensos), da eficiência dos decantadores e do tipo de tecnologias de tratamento que é aplicado a estas.

Estas lamas podem ser primárias provenientes da decantação primária do tratamento primário, lamas secundárias provenientes da decantação secundária do tratamento secundário que podem dividir-se em digeridas ou não digeridas, as lamas não digeridas apresentam uma razão C/N mais baixa e o azoto encontra-se na forma orgânica, as lamas digeridas são digeridas por digestão anaeróbia ou aeróbia e têm uma quantidade de azoto (na forma de NH_4^+) que vai atuar rapidamente com a vegetação e lamas terciárias originárias do tratamento terciário, todas estas lamas são um subproduto das ETAR e são chamadas de lamas de depuração, sendo que algumas delas são obtidas de uma forma mista, ou seja, junção de lamas primárias e secundárias.

As lamas de depuração apresentam um elevado teor de humidade, matéria orgânica e nutrientes o que cria dificuldades na sua gestão. O tratamento da fase sólida consiste em reduzir o teor de água, o volume e em estabilizar a matéria orgânica. Os processos na fase sólida podem ser mecânicos, espessamento, filtração, centrifugação e desidratação, podem também ser químicos, biológicos ou térmicos, estabilização, condicionamento e secagem térmica. Na Figura 1 apresenta-se um esquema onde temos representadas as diversas etapas no processo de tratamento da fase líquida e da fase sólida numa ETAR.

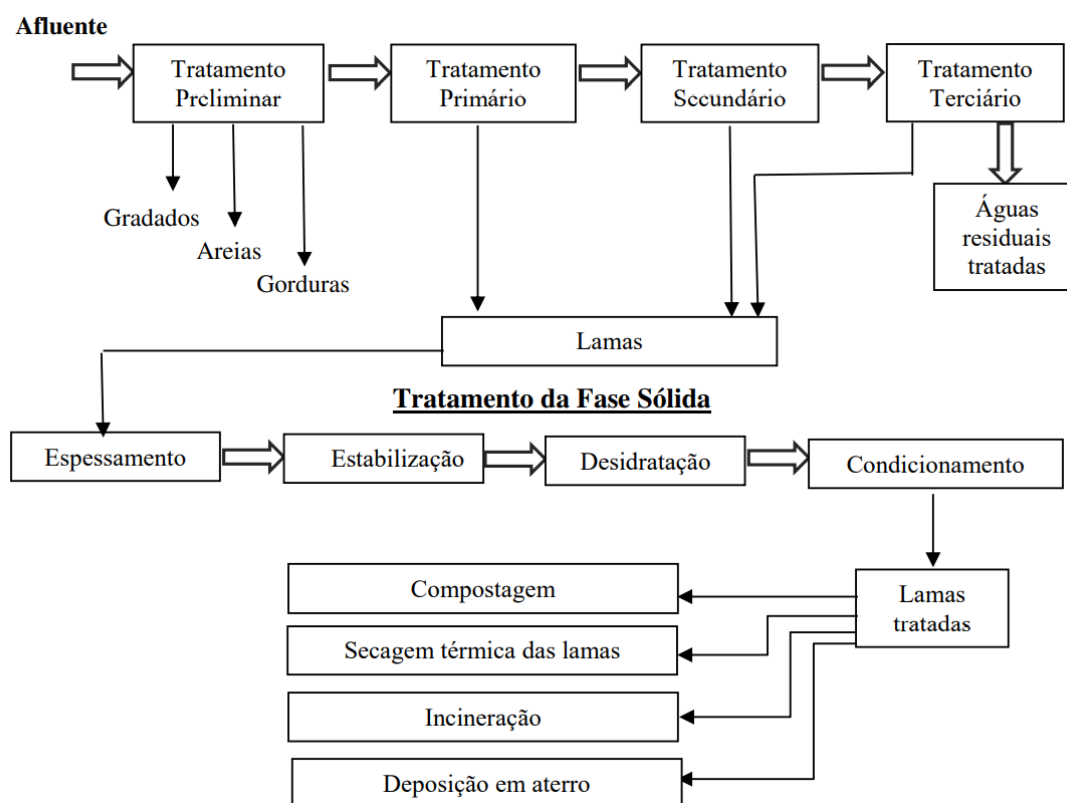


Figura 1 - Esquema de tratamento da fase líquida e fase sólida de uma ETAR (Ramos, 2011) (apud Liz, 2017).

Sendo um dos grandes desafios da humanidade dar prioridade às energias renováveis de forma a minimizar a utilização dos combustíveis fósseis, um dos grandes focos de reaproveitamento de lamas de depuração é através da valorização direta. Os principais destinos das lamas são a valorização agrícola, incineração e deposição em aterro.

Estas soluções de destino das lamas são regulamentadas a nível Nacional e Europeu, através da aplicação de decretos-lei e diretivas, que regulam as operações de tratamento e deposição das lamas (Liz, 2017).

No entanto, seja para encaminhá-las para a agricultura como corretor de solos ou para a incineração, caso a primeira alternativa não seja possível, estas devem passar por um processo de secagem térmica.

Porém, quanto mais seco o produto, maiores quantidades de finos são produzidas e os riscos de ignição associados às poeiras geradas no processo aumentam muito (Buys *et al.*, 2008) (Zerlottin *et al.*, 2013).

O armazenamento e transporte constituem etapas com importantes preocupações de segurança devido ao risco de explosão das poeiras. Para garantir a segurança nestas etapas é necessário avaliar as tendências de combustão espontânea em termos de propriedades químicas e físicas mensuráveis das lamas secas (Díaz *et al.*, 2019).

A possibilidade da explosão de uma nuvem das poeiras está condicionada à dimensão das partículas e à concentração em g/m³ de ar, às impurezas, à concentração de oxigênio e à potência da fonte de ignição (Sá, 2012).

Uma explosão é uma reação súbita de oxidação ou de decomposição que envolve um aumento de temperatura, pressão ou ambos. Na origem deste fenómeno estão atmosferas explosivas (ATEX). Estas atmosferas podem formar-se durante o processo de secagem térmica pois temos poeiras de lamas (matéria orgânica), oxigênio do ar de secagem e podemos ter situações de descargas de eletricidade estática ou faísca com energia suficiente para gerar uma ignição e conseqüente explosão e incêndio. As lamas de ETAR, visto serem ricas em voláteis, são um combustível ideal para que se dê uma explosão.

Os incêndios ocorrem com todas as poeiras combustíveis, porém, para que tal aconteça, é necessário que a quantidade de material combustível seja muito grande e que certas condições físico-químicas sejam satisfeitas (Eckhoff, 1997)(apud Atrav, n.d.).

A queima dá-se por camadas, em locais onde as poeiras se foram depositando ao longo de sucessivas jornadas de trabalho, podendo tal deposição ocorrer por várias razões ligadas ao desleixo dos operadores, deposições nos solos, em condutas, sobre estruturas inacessíveis, ou por razões do próprio procedimento laboral, criando-se diversos tipos de armazenamentos tais como, empilhamentos, armazenamentos em tulha, depósitos e outros (Eckhoff, 1997)(apud Semenova, 2005).

A ignição que ocorre em camadas, deve ser controlada com cuidado, para evitar que o material pulveroso depositado em estruturas, tubulações e locais de difícil visualização e limpeza, seja colocado em suspensão, formando uma nuvem de poeira, que evoluirá para explosão, pois existem no ambiente os fatores de deflagração da mesma, isto é, fogo e energia. O incêndio por camadas é de difícil extinção, podendo prolongar-se por várias horas até à sua inteira extinção (Eckhoff, 1997)(apud Semenova, 2005).

Para que durante o processo de secagem térmica haja medidas de prevenção e proteção adequadas é necessário criar uma metodologia que abranja todos os riscos existentes. A caracterização de novos combustíveis, principalmente biomassa, tem ganho destaque nos últimos anos. O objetivo é um conhecimento completo dos riscos associados tal como já existe noutras indústrias, como, por exemplo, a do carvão.

Liz, (2017) analisou os vários sistemas/tecnologias de secagem de lamas de forma a identificar o modelo mais eficiente do ponto de vista energético e de tempo de secagem.

On *et al.*, (2020) estudaram o processo de secagem isotérmica de lamas, coadjuvado com outros resíduos industriais, tendo em vista a valorização agronómica.

O presente trabalho contribuirá com o estudo do efeito da composição elementar e o aumento de concentração das lamas de ETAR no risco de explosão.

A determinação dos índices de explosividade da suspensão de poeiras de lamas de ETAR com ar é necessária de forma a garantir a segurança no processo de secagem térmica, transporte e armazenagem.

O perigo de uma determinada classe de poeiras está relacionado com sua facilidade de ignição e com a gravidade da explosão resultante (Sá, 2012).

Em geral, pode-se concluir que as questões de inflamabilidade e explosividade das poeiras industriais têm uma alta importância, tanto económica, como ambiental e social, atraindo, portanto, os esforços das empresas e das instituições de investigação e desenvolvimento tecnológico para o seu estudo por vários métodos: químicos, físicos, matemáticos, com o fim não só de se obter uma melhor compreensão dos mecanismos reguladores de tais processos, mas igualmente para que se possam desenvolver técnicas de segurança visando minorar ou até mesmo contrariar a ocorrência de acidentes (Semenova, 2005).

O sistema de ensaio normativo para determinar as características explosivas de suspensões de poeiras é o ensaio de explosão numa câmara de ensaio de 1 m³, pronta para suportar elevadas pressões. Porém, existe uma alternativa ao sistema de ensaio descrito, cuja conformidade foi provada para a câmara esférica de 20 dm³, que permite a realização dos ensaios de forma mais rápida e fácil.

Para além de outros indicadores, os índices de explosividade das poeiras de ETAR estudadas foram a pressão máxima da explosão e a velocidade de aumento de pressão. o estudo laboratorial foi realizado com base na informação descrita nas Normas Europeias seguintes.

- EN 14034-1:2004 – Determinação da pressão máxima de explosão $P_{m\acute{a}x}$;
- EN 14034-2:2006 – Determinação da velocidade máxima de aumento de pressão $(dP/dt)_{m\acute{a}x}$.

1.2. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação consiste no estudo da explosividade de poeiras da secagem térmica de lamas provenientes de ETAR.

De modo os objetivos são:

1. Compreender o processo de tratamentos dos efluentes provenientes de ETAR, bem como as etapas que levam à formação de lamas de depuração;
2. Analisar a quantidade produção de lamas de depuração na União Europeia (EU) e em Portugal, tal como a quantidade destas que é encaminhada para valorização direta;
3. Perceber a importância do processo de secagem térmica das lamas na gestão deste resíduo, bem como os perigos associados a este processo;
4. Perceber quais as características das lamas mais relevantes do ponto de vista da explosividade das suas poeiras;

5. Estudar a influência da composição elementar das lamas, nos limites de explosividade, na pressão máxima e velocidade de aumento de pressão de explosão;
6. Comparar os resultados obtidos com valores obtidos com outras poeiras típicas na indústria.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos.

Neste primeiro capítulo, introdução, é feito o enquadramento do problema em estudo, mostrando a motivação da comunidade científica neste âmbito. São também referidos os objetivos do trabalho que envolveram uma componente laboratorial.

No segundo capítulo, sobre o estado de arte, são referidos os conceitos gerais ligados as explosões de poeiras explicando a sua influência pressão e velocidade de aumento de pressão máximas, bem como a situação da União Europeia e de Portugal face ao problema de gestão de lamas de depuração.

A caracterização das lamas em estudo é realizada no terceiro capítulo, materiais e métodos, ainda neste capítulo são descritas todas as etapas do procedimento do sistema de ensaio.

O quarto capítulo, análise e discussão de resultados, apresenta os resultados experimentais obtidos, estes são também analisados e interpretados de forma a servirem de base de comparação para outros estudos.

Por fim, no quinto capítulo, conclusão, descreve-se a utilidade prática deste estudo.

2. ESTADO DE ARTE

2.1. Produção de Lamas

Visto a produção de lamas provenientes das estações de tratamento de águas residuais (ETAR) ter aumentado com o aumento da taxa de urbanização, começou a existir um problema de gestão destas lamas. Assim para que estas possam ser geridas de forma eficiente é imprescindível ter uma visão sobre a quantidade de lamas produzidas e a percentagem destas que são conduzidas para cada destino. Idealmente seria importante, embora complicado, prever o futuro da produção de lamas, tal como, o seu respetivo destino.

2.1.1. Situação na União Europeia

A descarga de lamas depuradas na água foi proibida em 1998 pela Comissão Europeia (CE) o que facilitou a procura por novas formas de solucionar o problema da gestão de lamas. Com isto a opção de valorização energética tem evoluído e ganho destaque e a deposição em aterro tem sido mais ao menos constante, prevendo-se que tenda a diminuir.

A Comissão Europeia baseia-se nas informações disponibilizadas pelos Estados-Membros, nas estatísticas internas e nos seus estudos adicionais para elaborar relatórios onde constam quantidades de lamas produzidas na União-Europeia (UE) ou a quantidade de lamas que são encaminhadas para valorização direta.

A última atualização no Eurostat foi executada em 2020 sobre a produção de lamas de ETAR no período de 2012-2018. Neste relatório estão presentes as quantidades de lamas de depuração produzidas pelas instalações de tratamento de águas residuais, tal como, as quantidades de lamas de depuração utilizadas na agricultura, compostagem ou enviadas para aterro (Mendes, 2014) (Graça, 2017).

Estudo da influência das características de lamas de ETAR na pressão de explosão máxima e velocidade de crescimento de pressão.

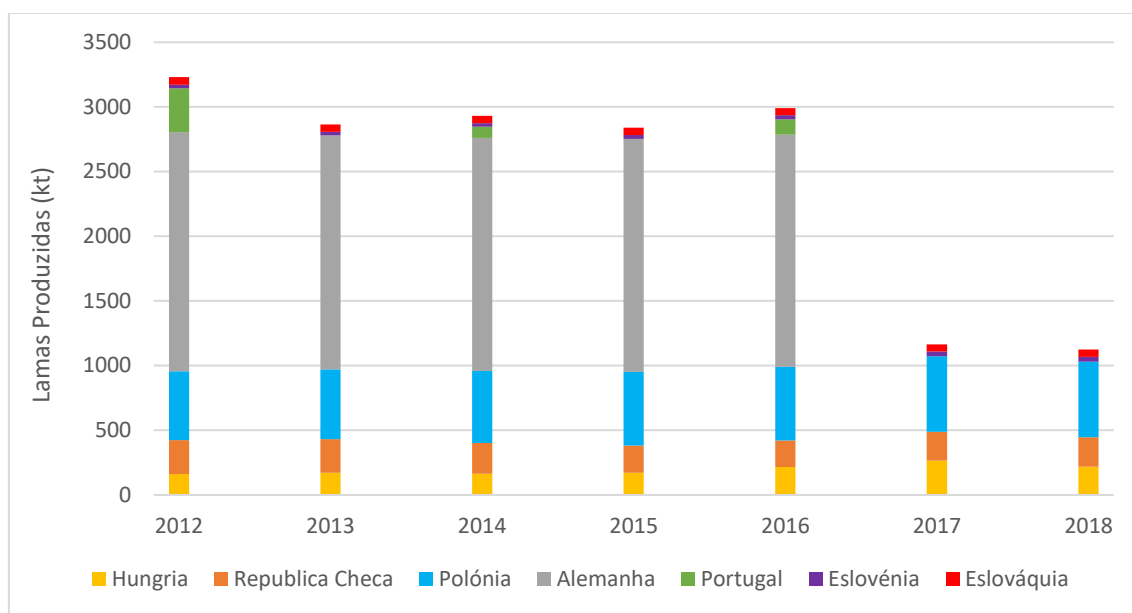


Figura 2 - Quantidade de lamas produzidas em alguns países da UE, no período 2012-2018 (EUROSTAT, 2020).

A partir deste gráfico verifica-se a Alemanha é o maior produtor de lamas, seguida pela Polónia, República Checa, Portugal, Eslováquia e por último Eslovénia.

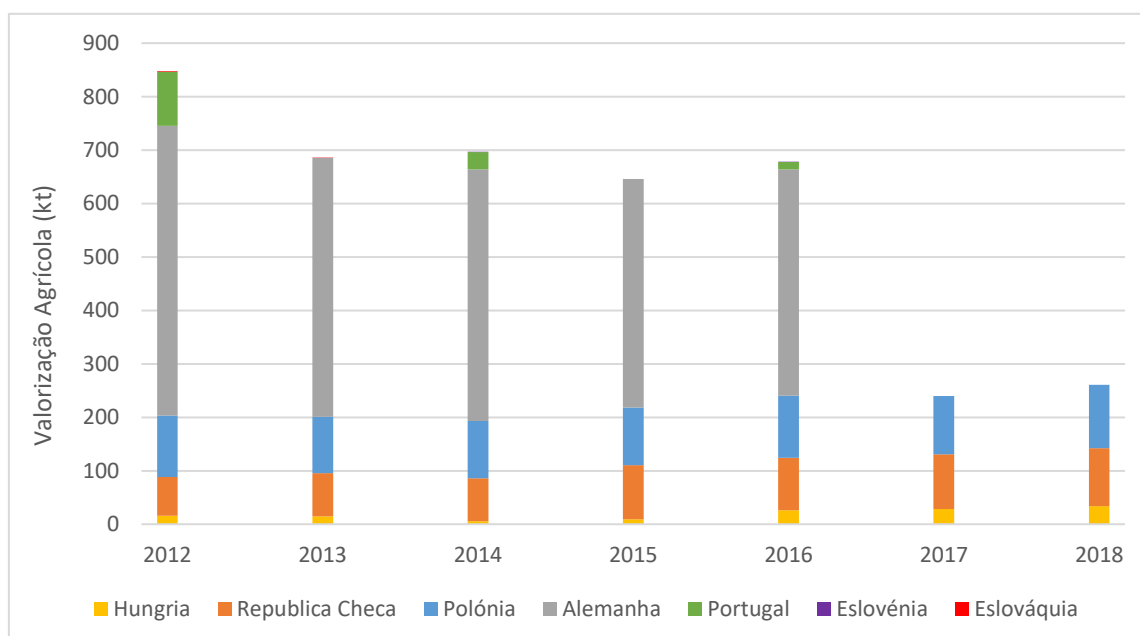


Figura 3 - Quantidade de lamas enviadas para valorização agrícola em alguns países da UE, no período 2012-2018 (EUROSTAT, 2020).

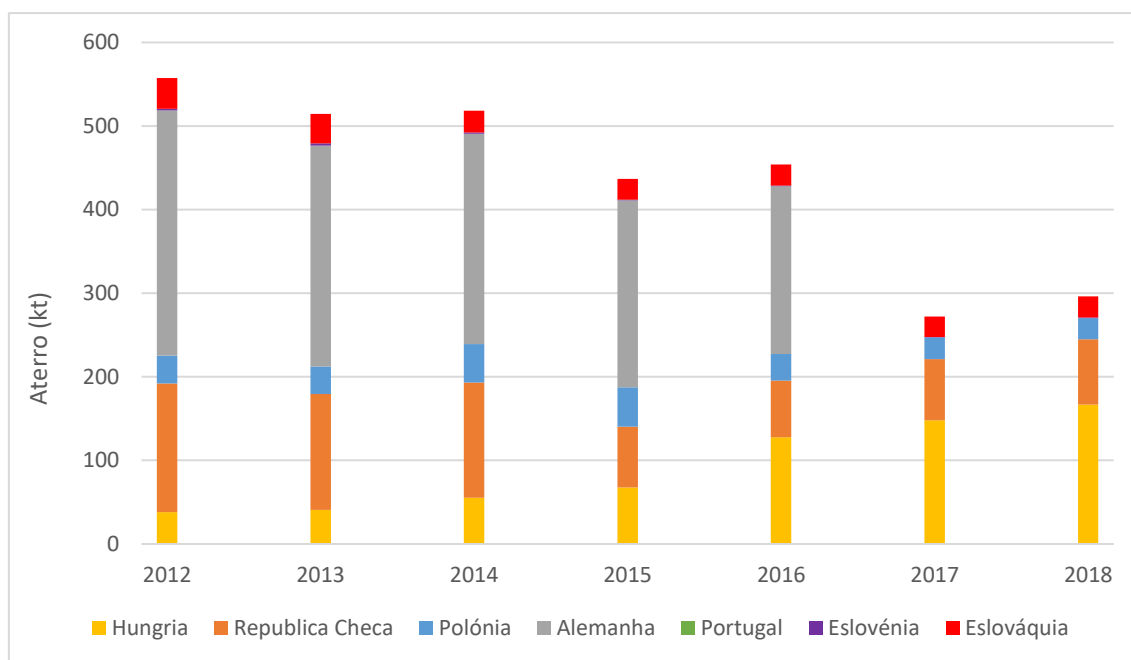


Figura 4 - Quantidade de lamas enviadas para aterro em alguns países da UE, no período 2012-2018 (EUROSTAT, 2020).

As Figuras 3 e 4 representam a quantidade de lamas enviadas por cada país para a valorização agrícola e para aterro ao longo de sete anos.

Em 2012 a Alemanha encaminhou 29,3% das lamas produzidas para valorização agrícola e 15,9% para aterro, segue-se a Polónia com 21,6% de aproveitamento para valorização agrícola e 6,2% encaminhadas para aterro. Já na República Checa encaminharam-se 27,5% das lamas para valorização agrícola e 58,4% para aterro. A Eslovénia apenas encaminhou 7,3% das lamas para aterro, sem ter algum aproveitamento a nível agrícola. Segue-se Portugal com 30% de lamas encaminhadas para a agricultura. Por fim a Eslováquia reaproveitou 2,1% para valorização agrícola e 62,7% para aterro.

Em 2013 e 2014 apesar de existirem algumas variações na percentagem de lamas encaminhadas para a agricultura e aterro, estas não são muito significativas.

A partir de 2015 existem variações mais elevadas. A Alemanha aparece com 23,7% das lamas enviadas para valorização agrícola, 12,4% para aterro e a Polónia com 18,9% na agricultura e 8,3% para aterro, ou seja, verifica-se uma diminuição de lamas encaminhadas para valorização agrícola e um aumento de lamas enviadas para aterro. A República Checa aumentou as lamas encaminhadas para valorização agrícola para 48,3% e diminuiu as lamas enviadas para aterro para 34,7%. A Eslovénia continuou sem ter alguma valorização agrícola, no entanto diminuiu o encaminhamento de lamas para aterro para 2,1%. Portugal não tem qualquer registo desse ano. Por fim, a Eslováquia encaminhou 44,2% das lamas para aterro sem ter qualquer contribuição na valorização agrícola.

Nos anos seguintes á uma diminuição geral de lamas enviadas para valorização agrícola e um ligeiro aumento de lamas encaminhadas para aterros.

2.1.2. Situação em Portugal

A nível nacional fica a cargo da Agência Portuguesa do Ambiente (APA) recolher e analisar dados relativos a produção e valorização de lamas de depuração. Estes são conseguidos com base nas informações reportadas pelos produtores e operadores de gestão de resíduos, tal como nas informações fornecidas pelas Direções Regionais de Agricultura e Pesca (DRAP) relativas as quantidades de lamas aplicada no solo.

Tabela 1 - Quantidade de lamas produzidas e de lamas utilizadas na agricultura a nível nacional, no período 2013-2015 (Adaptado de (APA, 2012).

	2013	2014	2015
Lamas produzidas (toneladas)	643,7	673,2	768,1
Lamas de ETAR (toneladas)	393,0	429,5	482

Em Portugal têm sido realizados investimentos de modo a melhorar e otimizar a recolha e o tratamento de águas residuais, o que se traduz no aumento da produção de lamas de depuração. Todavia, a melhoria das ETAR, com o incremento de mais fases de tratamento e o melhoramento dos mesmos, vai permitir uma melhor monitorização das lamas fazendo com que estas cumpram os requisitos indicados na legislação para que possam ser valorizadas (Mendes, 2014) (Graça, 2017).

2.2. Secagem Térmica

A secagem térmica é uma operação associada à remoção de líquido por evaporação da matéria-prima ou materiais processados (Domínguez, 2011)(apud On *et al.*, 2020). É uma operação complexa que envolve transferência de massa e calor sob a influência de vários fatores, como físicos (por exemplo, encolhimento) e químicos (odor, cor) transformações, que podem promover mudanças na qualidade do material. Essa complexidade cria dificuldades na modelagem matemática para descrever todos os fenómenos envolvidos com o calor e transferência de massa (On *et al.*, 2020).

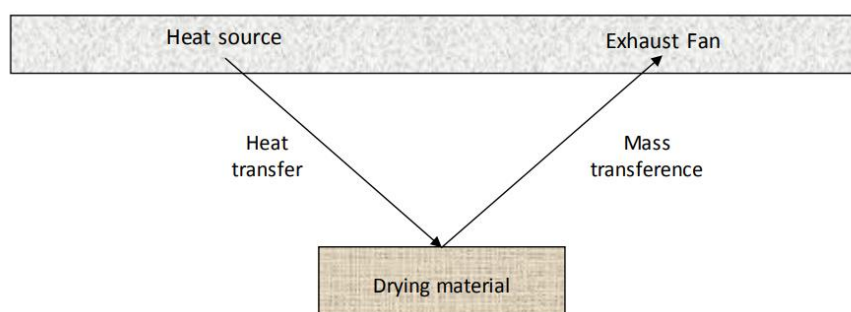


Figura 5 - Diagrama simplificado representativo da secagem térmica.

Conforme mostrado na Figura 5, a vaporização do líquido contido no material requer um fornecimento de calor para que o processo de secagem ocorra. Em seguida, a água é removida por meio de mecanismos de transferência de massa para o sistema de exaustão. Assim, a secagem pode ser considerada um processo de separação térmica. No entanto, a secagem também pode ser alcançada por liofilização (ou secagem por congelamento), em que a remoção de água ocorre por sublimação de a água congelada (gelo). Neste processo, o material é congelado e então exposto a alto vácuo, por meio do qual a água sublimada (ou seja, evapora diretamente sem derreter) (Berk, 2013a)(apud On, *et al.*, 2020).

Os processos de secagem podem ser classificados como naturais ou artificiais. O calor do sol ou do vento representa o mecanismo de secagem natural, enquanto os demais representam a secagem artificial. Ar, gás inerte ou os vapores superaquecidos são os principais gases utilizados para transportar e para promover a secagem do material. Este calor pode ser fornecido por convecção, condução ou radiação (por exemplo, micro-ondas). Tradicionalmente, a maioria dos secadores industriais são convectivos, usando ar quente ou gases de combustão direta (Ivanov, *et al.*, 1972). No entanto, o desenvolvimento sustentável procura reduzir o uso de energia, evitar recursos de combustíveis fósseis para reduzir a pegada de carbono e prevenir as mudanças climáticas (On, *et al.*, 2020).

Os estudos na área de secagem têm evoluído nos últimos anos, o que diversificou os métodos de secagem. Cada tecnologia pode ser baseada num ou mais mecanismos de transferência de calor: convecção, condução e radiação.

O processo de secagem por convecção normalmente usa ar seco para a remoção da água do material sólido. A taxa de secagem depende principalmente de duas variáveis (Mujumdar, 2014; Vaxelaire e Cézac, 2004)(On *et al.*, 2020): condições do ar (temperatura, umidade relativa, velocidade de fluxo) e tamanho e textura do material.

O conteúdo de água presente nas lammas geradas a partir das ETAR é de cerca de 70 a 90%, valor esse que deve ser reduzido a menos de 20% após o processo de secagem térmica, o qual requer grandes quantidades de energia para que esse objetivo seja atingido

(Ohm *et al*, 2009a)(Liz, 2017). As tecnologias de secagem térmica de lamas amplamente usadas atualmente, incluem o método de transferência de calor por convecção, no qual o gás é aquecido entre 400 e 600 °C para secar as lamas, e o método de transferência de calor por condução - um método de transferência de calor indireto, em que vapor de água a alta temperatura ou gases quentes circulam por uma “camisa” do equipamento, separada das lamas húmidas por uma parede metálica. Este processo é mais demorado, sendo em média necessário mais 40 a 60 minutos para diminuir o teor de água para cerca de 40% (Ohm *et al*, 2009b). Além disso, como a superfície das lamas endurece, a velocidade de difusão da água torna-se extremamente lenta, manifestando esse efeito na diminuição da taxa de secagem. Apesar de existirem várias soluções industriais e estudos laboratoriais de secagem de lamas provenientes de ETAR, os equipamentos usados atualmente para a secagem térmica de lamas são ineficientes no que diz respeito ao tempo de secagem necessário e aos custos da energia requerida para secar parcialmente as lamas (Ohm *et al*, 2009c)(Liz, 2017).

É por isso necessário compreender o desempenho dos sistemas de secagem de lamas, de modo a que se possa determinar qual a melhor solução para baixar os seus impactos ambientais e os custos de operação. A escolha do sistema de secagem de lamas deve ter em conta as características iniciais das lamas, deixando em aberto soluções alternativas que permitam abrir caminho à valorização das lamas (Liz, 2017).

Na análise das lamas são parâmetros importantes a humidade, teor de sólidos totais e teor de sólidos voláteis que enriquecem a mistura em carbono (C) (Gonçalves, 2017).

Como referido anteriormente, quanto mais seco é o produto, maior a quantidade de finos logo maior será o risco de ignição associado às poeiras geradas durante o processo de secagem térmica que associado ao alto teor em voláteis das lamas pode levar à ocorrência de explosões.

2.3. Generalidade sobre Explosão de Poeiras

A ocorrência de explosões em diversas indústrias que processam produtos na forma das poeiras com propriedades combustíveis é, infelizmente, uma realidade. Para que a explosão aconteça é necessário que as partículas das poeiras apresentem uma dimensão inferior a 500 µm e sejam colocadas em suspensão no ar, com uma concentração adequada e em contacto com uma fonte de ignição.

O termo “poeiras” não possui qualquer significado científico exato, mas é normalmente definido como um sólido que foi reduzido a pó ou partículas finas. A dimensão das partículas é tão importante como a natureza das poeiras para estabelecer se a substância é considerada perigosa. Em geral, os mais perigosos tipos de poeiras são aqueles com partículas muito pequenas, invisíveis para o olho humano, como é o caso dos pós finos (Lima, 2016).

Uma explosão de poeiras é iniciada pela rápida combustão de partículas inflamáveis suspensas no ar. Qualquer material sólido que se pode queimar no ar fará com uma violência e velocidade que aumenta com o grau de subdivisão do material. Quanto maior o grau de subdivisão (noutras palavras, menor o tamanho da partícula) mais rápida e explosiva é a queima, até que um estágio limite seja alcançado quando as partículas muito finas tendem a agrupar-se. Se a nuvem de poeira inflamada não for confinada, isso causará apenas um incêndio repentino. Mas caso a nuvem de poeira inflamada esteja confinada, mesmo que parcialmente, o calor da combustão pode resultar num rápido desenvolvimento de pressão, com propagação da chama através da nuvem de poeiras e a evolução de grandes quantidades de calor e produtos de reação. A elevada velocidade desses eventos resulta numa explosão. Além do tamanho da partícula, a violência da explosão depende da taxa de libertação de energia, a qual está relacionada com o grau de confinamento e as perdas de calor (Abbasi e Abbasi, 2007).

No nosso caso em que as poeiras são compostas de substâncias voláteis, a explosão dar-se-á em três etapas:

- Pirólise (onde os voláteis são liberados pela partícula ou as partículas são vaporizadas);
- Mistura de combustível em fase gasosa (liberada por poeiras) e oxidante (geralmente ar);
- Combustão em fase gasosa.

Assim durante e após o processo de secagem térmica a maior preocupação passa pelo carácter explosivo da possível formação das poeiras (Sousa, 2013). As causas de uma explosão e as propriedades da suspensão de poeiras que influenciam a ignição e violência de explosão, encontram-se representadas na Figura 6.

Estudo da influência das características de lammas de ETAR na pressão de explosão máxima e velocidade de crescimento de pressão.

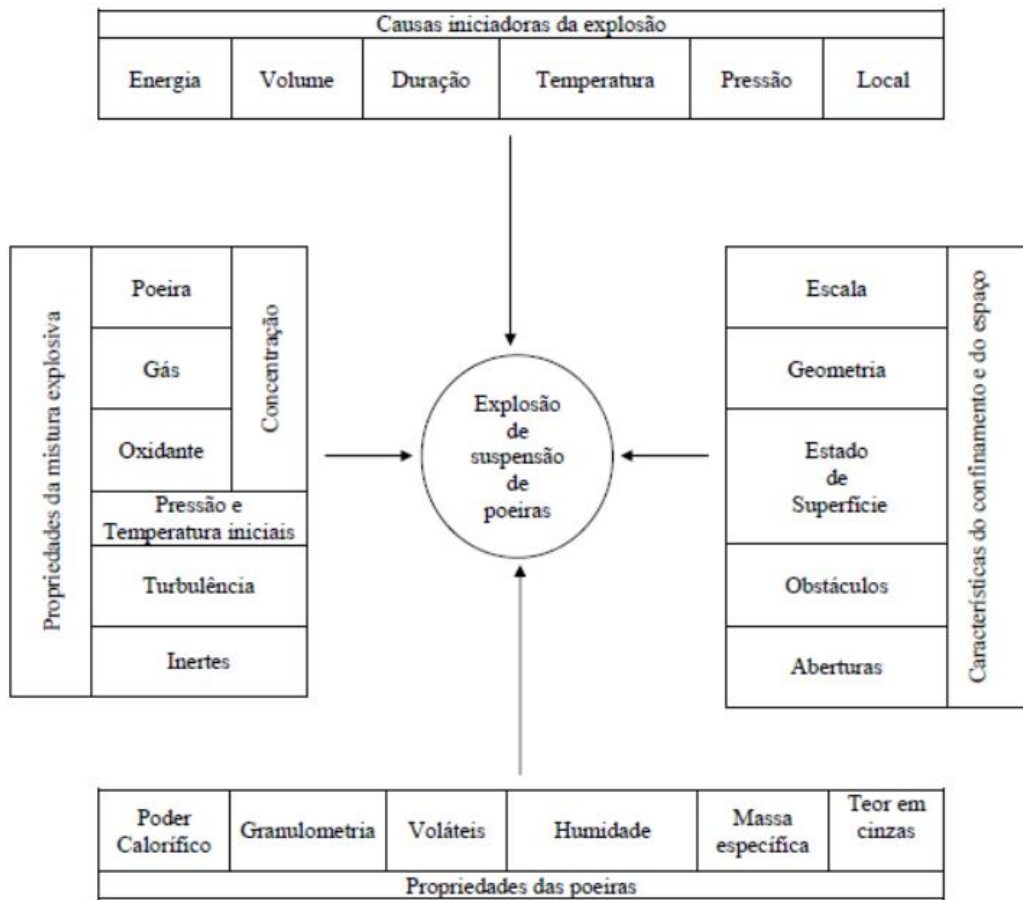


Figura 6 - Principais fatores condicionantes da existência das características duma explosão de suspensões de poeiras (Campos, 1982) (apud Sousa, 2013).

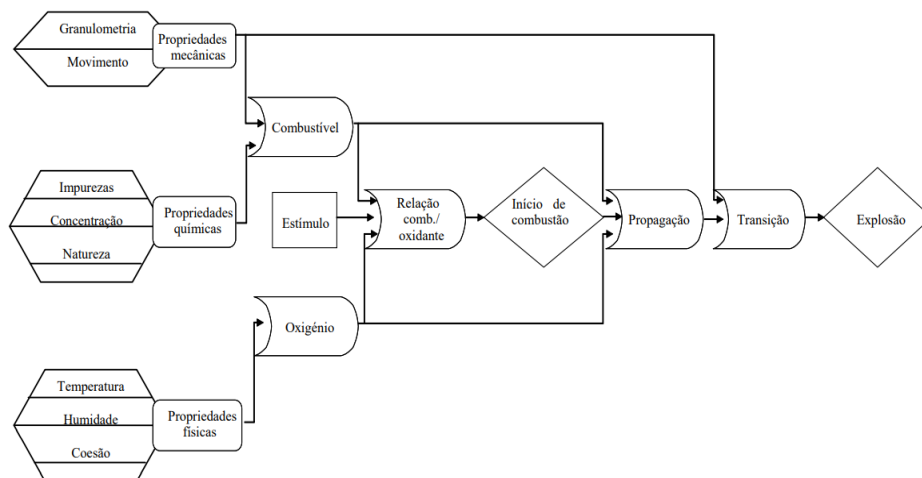


Figura 7 - Organograma da formação de uma explosão de suspensões de poeiras (Campos, 1984).

Analisando a Figura 7, verifica-se que para que ocorra uma dada explosão as partículas devem conter determinadas propriedades a nível mecânico, químico e físico.

Como referido anteriormente, os parâmetros de composição que afetam principalmente a explosividade das poeiras são a composição química (voláteis e cinzas) e o tamanho das partículas. Essas influências eram esperadas, uma vez que foram observadas para muitos materiais diferentes noutros estudos, como o carvão e biomassa. Essas relações mostraram que em estações de águas residuais com secagem térmica é possível diminuir os riscos de explosão ou os seus efeitos, aplicando ações semelhantes às das estações de tratamento de carvão e biomassa. Mostra-se que o teor de cinzas torna a amostra menos perigosa em termos de ignição, por comparação ao teor de materiais voláteis, sendo possível diminuir o risco aumentando a parte inerte da mistura de poeiras (Fernandez-Anez *et al.*, 2014).

O Decreto-lei n.º 236/2003 de 30 de setembro de 2003 transpõe para a ordem jurídica interna a Diretiva 1999/92/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de dezembro que estabelece as prescrições mínimas destinadas a promover a melhoria de proteção de segurança e saúde dos trabalhadores suscetíveis de serem expostos a riscos derivados de atmosferas explosivas. De acordo com este diploma, caracteriza-se por:

- Atmosfera explosiva: uma mistura com o ar, em condições atmosféricas, de substâncias inflamáveis, sob a forma de gases, vapores, névoas ou poeiras, na qual, após a ignição, a combustão se propague a toda a mistura;
- Área perigosa: uma área na qual se pode formar uma atmosfera explosiva em concentrações que exijam a adoção de medidas de prevenção especiais a fim de garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores abrangidos;
- Área não perigosa: uma área em que não é provável a formação de atmosferas explosivas em concentrações que exijam a adoção de medidas preventivas especiais;

A explosão é um tipo particular de combustão sendo, portanto, necessária a presença simultânea dos elementos constituintes do triângulo do fogo. No caso específico das explosões envolvendo poeiras combustíveis, além desses elementos é necessária a presença de mais outros três, constituindo-se o hexágono da explosão, conforme se ilustra de seguida (Semenova, 2005).

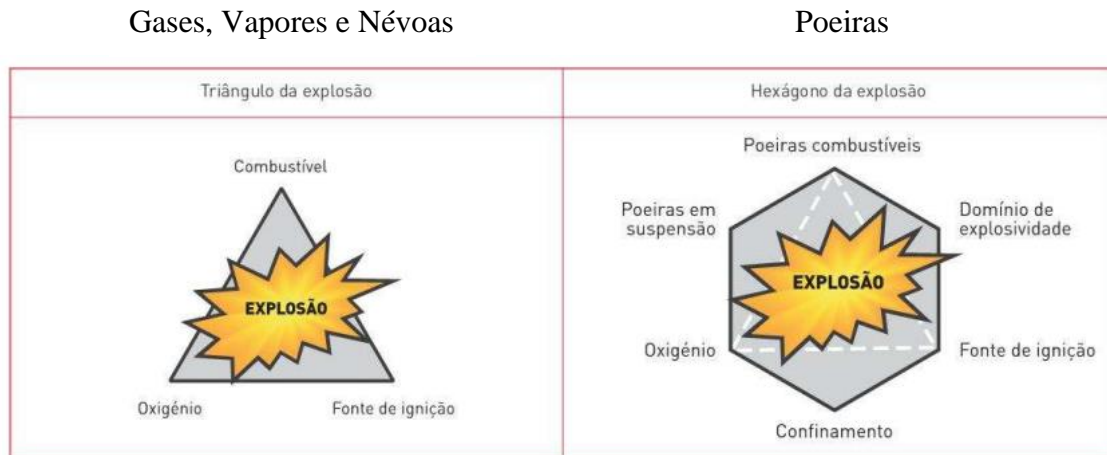


Figura 8 - Condições necessárias para a ocorrência de explosão (Semenova, 2005).

Para que ocorra uma explosão é necessária que a concentração de combustível no ar esteja no domínio de explosividade. O domínio de explosividade encontra-se representado na Figura 9.



Figura 9 - Domínio de explosividade de uma mistura combustível-ar (Semenova, 2005).

O domínio da explosividade é limitado inferiormente por uma concentração mínima de combustível no ar, abaixo da qual não ocorre explosão; e que é designada por Limite Inferior de Explosividade (LIE).

A concentração máxima de uma mistura combustível-ar que pode estar na origem de uma explosão é designada por Limite Superior de Explosividade (LSE).

Para as poeiras os LIE e LSE encontram-se definidos, porém registam-se algumas irregularidades para o LSE. De acordo com a norma europeia EN 1127-1:1997, as fontes de energia que podem estar na origem da ignição de uma atmosfera explosiva são classificadas do seguinte modo:

- Superfícies, chama e gases quentes (incluindo partículas incandescentes); – Faíscas produzidas mecanicamente;
- Instalações elétricas;
- Correntes elétricas de fuga, proteção catódica contra a corrosão (em ânodos em alumínio ou magnésio);
- Eletricidade estática;
- Raios (resultantes de fenómenos atmosféricos);
- Ondas eletromagnéticas de radiofrequência entre 100 kHz e 3×10^{12} Hz;
- Ondas eletromagnéticas entre 300 GHz e 3×10^{15} Hz;
- Radiação ionizante;
- Ultrassons;
- Compressão adiabática e ondas de choque;
- Reações exotérmicas.

A ignição de uma mistura só se consegue realizar se a proporção combustível/ar estiver dentro destes valores que se designam por limites de explosividade, isto é, só no intervalo entre estes dois valores é que a mistura é inflamável. Tais valores limite variam consoante o tipo de combustível. Quanto mais alargado for o intervalo de explosividade, mais perigoso é o combustível em causa. Em função da velocidade de combustão e do aumento de pressão gerado por uma explosão distinguem-se os fenómenos de explosão em deflagração e em detonação (Figura 10). Numa deflagração a velocidade de propagação da onda explosiva é menor que a velocidade do som nesse material. A velocidade da chama é de várias dezenas ou centenas de m/s e a pressão máxima atinge valores de cerca de 10 bar. Já numa detonação a velocidade da reação é da ordem de km/s e a pressão máxima é de algumas centenas de kbar. Ocorre então, uma propagação supersónica da reação caracterizada por uma onda de choque. A explosão é muito mais violenta, com danos bastante mais significativos dos que são associados à deflagração (Semenova, 2005).

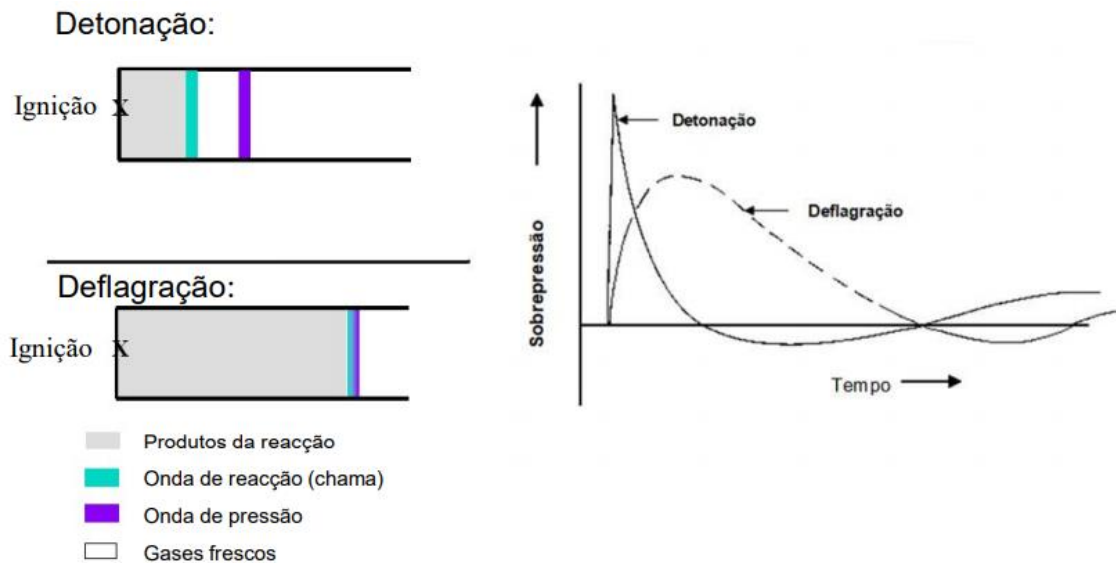


Figura 10 - Esquema da comparação entre detonação e deflagração.

Os parâmetros mais significantes no estudo da pressão de explosão e no aumento da velocidade de aumento de pressão de explosão são a dimensão da partícula, a humidade e concentração do meio envolvente e a concentração de oxigénio.

2.3.1. Dimensões da Partícula

Uma menor dimensão das partículas das poeiras facilitará a ignição da nuvem de poeiras visto ser maior a superfície exposta por unidade de peso da matéria (superfície específica).

As dimensões da partícula também têm influência sobre a velocidade de crescimento da pressão, isto é, para uma dada concentração das poeiras partículas mais grossas mostram uma velocidade de aumento de pressão mais baixa que o mesmo pó fino (de Sá, 2012).

Os parâmetros de explosividade têm uma dependência perceptível do tamanho das partículas das poeiras, sendo os pós mais finos mais explosivos. Porém, a explosividade dos pós não aumenta indefinidamente à medida que diminui o tamanho das partículas.

O tamanho das partículas influencia, essencialmente, a taxa de pirólise. Portanto, se a combustão, em fase gasosa, for o processo mais lento dos três considerados, o aumento da taxa de pirólise devido à diminuição do tamanho das partículas não vai aumentar a taxa de combustão final (Eckhoff, 1997).

Caso as partículas num pó/poeira orgânico sejam tão pequenas que a pirólise não controle mais a taxa de explosão, uma redução adicional do tamanho de partícula não aumentará ainda mais a taxa de combustão geral (Eckhoff, 2009).

2.3.2. Humidade do Meio Envolvente

O processo de ignição de poeiras e a violência de explosão são prejudicados pela presença de humidade na suspensão de poeiras, visto que, quanto maior for a humidade do material bem como a do ar, mais difícil se torna a deflagração pois a água residual ao evaporar, empobrece o ambiente, diminuindo a concentração de oxigénio existente, além disso a evaporação e o aquecimento da água provocam dissipação de calor. Depois o vapor de água mistura-se com os gases de pirólise na zona de pré-aquecimento da onda de combustão, fazendo com que a mistura seja menos reativa. Por último, a humidade aumenta a coesão entre partículas das poeiras, o que dificulta a dispersão destas. Mesmo que o processo de ignição seja iniciado, pode inibir-se devido à modificação de atmosfera sofrida pelos vapores emitidos na combustão do material húmido.

2.3.3. Concentração de Poeiras no Meio Envolvente

A nuvem de poeiras, mistura das poeiras e ar, é caracterizada pela quantidade de material em suspensão dentro da faixa de explosividade (faixa de concentração de poeiras que é comparativamente limitada), pelas suas características e pelas condições ambientais.

À quantidade de material em suspensão em g/m^3 dentro de uma faixa que é possível explodir chama-se grau de concentração. Conseguem-se definir limites de explosividade superior e inferior conforme o valor se encontre acima ou abaixo dos valores para o qual ocorre explosão.

Dentro da faixa de concentração de poeira explosiva, a taxa máxima de explosão (taxa de produção de calor por combustão), bem como a sensibilidade de ignição, variam com a concentração de poeira (Eckhoff, 2009).

A concentração limite inferior de inflamação entende-se o valor da concentração abaixo da qual não poderá existir inflamação, ou tendo esta existido localmente não se verificou a propagação da chama. O seu valor é bastante difícil de obter com precisão devido principalmente à presença das forças de gravidade, as quais conjuntamente com as diferenças de tamanho e forma das partículas, fazem com que a suspensão se estratifique e com que as partículas se aglomerem entre si, acabando por depositar. Daí que na literatura se encontrem múltiplos valores para as mesmas condições (Campos, 1984) (Semenova, 2005).

2.3.4. Concentração de Oxigénio

A concentração de oxigénio é definida como a concentração mínima para a combustão total de massa das poeiras. Quanto maior for a concentração de oxigénio, maior será a probabilidade de ocorrer explosão, e, caso esta aconteça maior será a sua violência.

A redução da concentração de oxigénio para níveis inferiores ao atmosférico, dificulta o início de uma explosão. Reduções elevadas, resultam na inibição completa da propagação de chama. A concentração mínima de oxigénio é a concentração abaixo da qual uma explosão não ocorre (Cashdollar *et al*, 1998) (Semenova, 2005).

A CLO é a máxima concentração limite de oxigénio para a qual não pode ocorrer explosão numa mistura pó/ar/gás inerte. O valor da concentração limite de oxigénio é a base para a prevenção de explosões através de inertização (Kuracina *et al.*, 2019).

A criação de uma atmosfera inerte faz com que a quantidade de oxigénio seja insuficiente para que se haja propagação da chama. Um dos gases regularmente utilizados neste processo é o azoto, que é o principal constituinte do ar.

Wiemann (1984) (apud Eckhoff, 1997) investigaram a influência do conteúdo de oxigénio do gás no valor da pressão máxima e da velocidade máxima de aumento de pressão, obtidos durante a explosão das poeiras de carvão num reator fechado de 1 m³. Os resultados mostram que ambos os parâmetros diminuem com a descida do conteúdo de oxigénio e que a zona da concentração das poeiras explosiva é estrangulada, em particular, no lado rico da mistura. Mostram ainda que a redução da pressão máxima é aproximadamente proporcional à redução do conteúdo de oxigénio, como era esperado dos conceitos termodinâmicos, e que a velocidade de aumento de pressão é fortemente afetada pela variação da concentração de oxigénio da atmosfera oxidante, o que reflete a forte influência do teor deste comburente na cinética do processo de combustão (Andr *et al.*, 2014).

A influência do conteúdo de oxigénio do gás oxidante no valor da concentração mínima de explosão das poeiras de carvão, com alto teor em voláteis, foi estudada por Hertzberg e Cashdollar (1987). Estes autores concluíram que, para partículas com dimensões inferiores a 10 µm, a redução do teor de oxigénio provocava apenas um aumento moderado da concentração mínima de explosão, enquanto que, quando o tamanho da partícula aumentava, a influência da redução do conteúdo de oxigénio provocava um rápido incremento do valor da concentração mínima de explosão (Andr *et al.*, 2014).

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

A medição da pressão máxima de explosão constitui a base para a proteção contra explosões através da projeção e construção de equipamento que permita reduzir os seus efeitos.

O valor da pressão máxima de explosão, $P_{m\acute{a}x}$, é o maior valor registado em cada um dos ensaios realizados numa dada concentração das poeiras. Já o valor de pressão registada em função do tempo, representado por P_{exp} , corresponde a diferença entre a pressão máxima registada e a pressão no momento de ignição. Para que haja ignição das poeiras é necessário que aconteça um aumento de pressão de 0,5 bar em relação a pressão ambiente, ou seja, só se dá a ignição das poeiras se $P_{exp} \geq 0,5$ bar (EN14034-1:2004).

Assim para que os valores sejam coerentes nos dois sistemas de ensaio aplicam-se estas correções através das equações 1 e 2 (EN14034-1:2004).

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

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

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

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{5,5 \times (P_{m\acute{a}x,20l} - P_{ci})}{(5,5 - P_{ci})} \text{ [bar]} \quad eq. 2$$

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

Sendo:

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

A velocidade máxima de aumento de pressão denomina-se $(dP/dt)_{exp}$ (EN14034-2:2006).

A velocidade máxima de aumento de pressão de explosão, $(dP/dt)_{max}$ é o valor mais elevado dos máximos registados para cada ensaio realizado numa dada série de concentrações das poeiras.

Visto o valor de $(dP/dt)_{max}$ depender do volume em que ocorre a explosão calcula-se um fator K_{st} , constante característica, que permite interpretar esta grandeza de modo independente de forma a que se consiga comparar valores de velocidade máxima de aumento de pressão obtidos em diferentes explosivos. Ou seja, o K_{st} será o parâmetro utilizado para avaliar a severidade da explosão. Este é calculado através de:

$$K_{m\acute{a}x} = K_{st} = 0,271 \times \left(\frac{dP}{dt}\right)_{m\acute{a}x,20l} \quad [bar \cdot m \cdot s^{-1}] \quad eq. 3$$

Onde:

Classe de explosão	Consequências	$K_{m\acute{a}x}[(bar \cdot m)/s]$
St 0	Não há registo de explosão	0
St 1	Explosão fraca	1 – 200
St 2	Explosão moderada	201 – 300
St 3	Explosão forte	>300

A maioria dos produtos sólidos pertence à classe St 1. A classe St 2 corresponde a produtos de elevada severidade de explosão, que requerem com frequência sistemas especiais de proteção. A classe St 3 inclui produtos metálicos que implicam dificuldades na implementação se sistemas de proteção únicos devido à rapidez com que se dá a explosão.

2.4. Outros trabalhos de explosividade de poeiras

(Eckhoff, 2009) estudou a influência da distribuição primária do tamanho das partículas de poeiras de diversos materiais, o grau de desaglomeração, a distribuição da concentração e a turbulência destas na nuvem e a influência destes fatores na sensibilidade de ignição e na violência de explosão. Em segundo lugar estuda o conceito de projeto de processo inerentemente mais seguro para evitar explosões acidentais de poeira, usando o projeto de funis e silos como exemplo. Termina com algumas consequências dos fatores mencionados no projeto de medidas mitigatórias, como isolamento de explosão, ventilação de explosão e supressão automática de explosão. Mesmo não se referindo a poeiras de lamas de ETAR, o seu estudo é de elevada importância pois este conclui que a ciência e tecnologia das poeiras são essenciais para a compreensão das explosões das poeiras rematando que este conhecimento é essencial tanto no projeto de plantas de processo inerentemente mais seguras no que diz respeito à prevenção de explosões de

poeira, quanto no projeto e seleção de medidas para prevenir e mitigar tais explosões em plantas existentes. Em particular, fala dos modelos numéricos, baseados na ciência e tecnologia das poeiras, das estruturas de nuvem de poeira geradas em plantas industriais reais que são cruciais para a modelagem numérica adequada dos processos de combustão de nuvem de poeira em tais plantas.

(Fernandez-Anez *et al.*, 2014) estudaram as propriedades de inflamabilidade de lamas de ETAR, incluindo sensibilidade à ignição, severidade da explosão, sensibilidade térmica e estabilidade térmica. Além disso, analisaram as relações entre essas propriedades e parâmetros de composição, além do estudo da sua variação dependendo da sua origem ou estação do ano. Determinaram as propriedades relacionadas com combustão espontânea. Para estudar essas relações e características, foram selecionadas amostras de lamas em diferentes locais na Espanha e coletadas durante diferentes estações do ano, tendo em vista analisar a variabilidade devido a parâmetros sazonais e geográficos. Por último, estudaram o autoaquecimento das lamas de depuração visto este ser um produto que pode ser armazenado por longos períodos fazendo com que a temperatura de autoignição seja um parâmetro importante.

Os autores concluíram que os parâmetros de composição que afetam principalmente a explosividade das poeiras são a composição química (voláteis e cinzas) e o tamanho das partículas. Essas influências eram esperadas, uma vez que foram observadas para muitos materiais diferentes noutros estudos, como carvão e biomassa. Essas relações mostraram que em unidades de tratamento de lamas de ETAR com secagem térmica é possível diminuir os riscos de explosão ou seus efeitos, aplicando ações semelhantes às das unidades de tratamento de carvão e biomassa. Por exemplo, mostra-se que o teor de cinzas torna a amostra menos perigosa em termos de ignição, enquanto o contrário ocorre com o teor de voláteis, portanto é possível diminuir o risco aumentando a parte inerte da poeira.

As relações entre as diferentes temperaturas medidas mostraram que a ignição, autoignição e reatividade das amostras estão relacionadas. Observou-se também que as temperaturas relacionadas a essas ações variam juntas apresentando a mesma tendência. Essas relações mostram que ao diminuir o risco de um dos parâmetros é possível diminuir também outros.

Na tabela seguinte apresenta-se os resultados experimentais obtidos.

Tabela 2 - Parâmetros da severidade da explosão.

Amostra	P_{max}	K_{st}
LRET-101	7,0	124
LRET-102	5,0	77
LRET-103	6,1	125
LRET-104	5,5	108
LRET-105	5,7	98
LRET-107	6,3	178
LRET-110	6,4	145
LRET-112	6,4	157
LRET-117	6,1	161
LRET-121	6,1	161

(Kacprzak *et al.*, 2017) realizaram um estudo onde o principal objetivo é comparar as soluções existentes de gestão de lamas de ETAR em termos de sustentabilidade ambiental. Fala-se das estratégias mais utilizadas, considerando a legislação existente (a nível europeu e nacional), que incluem o tratamento e a eliminação considerando a legislação, ecotoxicologia, gestão de resíduos e vias atuais utilizadas atualmente em determinados países europeus. Apresentam-se ferramentas de tomada de decisão selecionadas, nomeadamente critérios de fim de desperdício e avaliação do ciclo de vida foram propostos com o intuito de avaliar adequadamente a possível avaliação ambiental, económica e técnica de diferentes sistemas. Portanto, alguns critérios básicos para a seleção da opção mais adequada são descritos, no sentido da economia circular “dos resíduos aos recursos”. A importância das lamas de esgoto como uma fonte valiosa de matéria e energia foi avaliada, bem como um risco potencial relacionado à aplicação dessas estratégias.

Os autores concluem que a “recuperação de material” envolve o processamento de subprodutos no mercado altamente valorizado: grânulos, fertilizantes e composto. Nesses termos, lamas de ETAR devem ser consideradas como reservatórios de energia e compostos preciosos que devem ser obrigatoriamente reciclados, ou seja, matéria orgânica, carbono, fósforo, nitrogênio, ácidos voláteis ou mesmo proteínas.

Assim propõem outro cenário a fim de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, diminuir o uso de recursos naturais não renováveis, diminuir a poluição do solo e diminuir a migração de contaminantes na cadeia alimentar. Toda a estratégia visa a melhoria da codigestão de lamas, compostagem de lamas com subprodutos e biomassa vegetal, bem como cultivo de plantas energéticas. Por um lado, esta forma de gestão das lamas permite evitar riscos ambientais não controlados. Por outro lado, pode ser incluída na economia circular em cada etapa do processamento. Principalmente no que diz respeito à reciclagem de fósforo, que é um recurso escasso.

(Medic Pejic *et al.*, 2015) tomaram como objetivo geral desta pesquisa a determinação da tendência de autoignição de lamas de esgoto secas termicamente. Oito fábricas espanholas localizadas em Madrid, Barcelona e Málaga foram selecionadas para

desenvolver este estudo e dez amostras foram coletadas. Foram realizadas três metodologias de teste diferentes para estudar a autoignição das poeiras. Técnicas termogravimétricas, análises de temperatura de autoignição e testes UN Divisão 4.2 foram desenvolvidos. Os resultados dessas análises mostraram o risco de autoignição durante o armazenamento e transporte dessas substâncias.

Este estudo concluiu que as lamaz secas são um produto inflamável que apresenta risco de autoignição e que as amostras com reação exotérmica inicial mais curta, ou seja, caracterizadas por uma menor diferença entre os valores de Temperatura Exotérmica Inicial (IET) e Mudança de Temperatura de Inclinação (CST) apresentam uma tendência de autoignição maior. Também é observado que o conteúdo de hidrogénio (H) está positivamente correlacionado a esse comportamento.

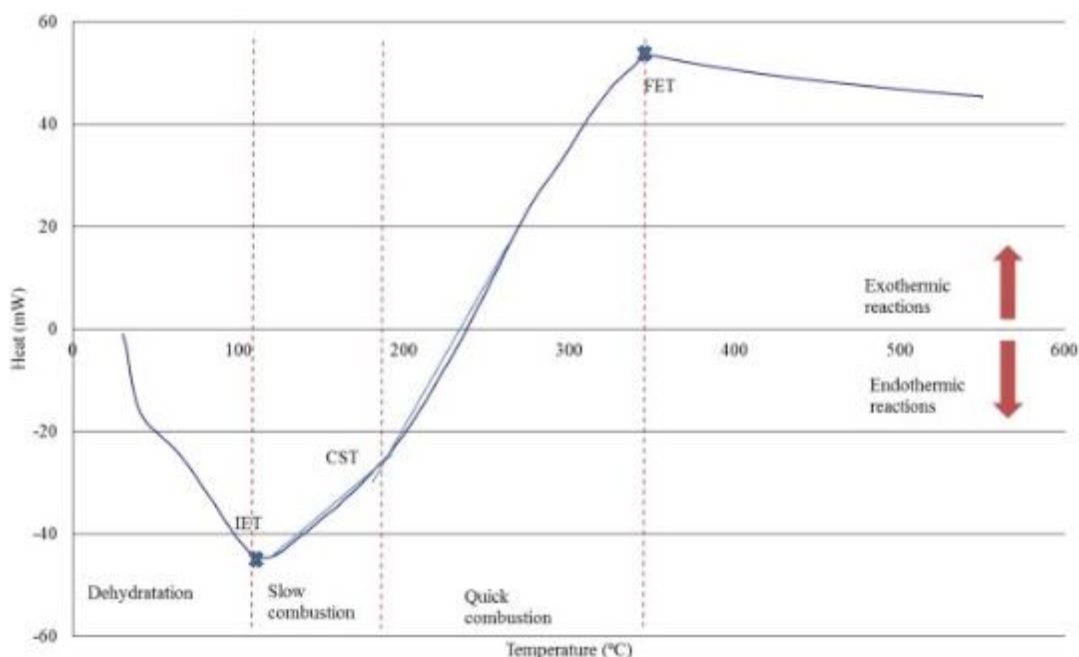


Figura 11 - Características da reação de combustão de combustíveis sólidos (Medic Pejic *et al.*, 2015).

Estudo da influência das características de lamas de ETAR na pressão de explosão máxima e velocidade de crescimento de pressão.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Caracterização das Lamas em Estudo

As propriedades de combustão de poeiras dependem das características químicas e físicas das partículas.

Para este estudo foram seleccionadas seis amostras de lamas provenientes de diferentes ETAR de Portugal. Estas serão divididas em duas categorias, lamas recolhidas após a digestão anaeróbica, designadas por AD, e lamas mistas (junção de lamas primárias e secundárias após tratamento biológico), recolhidas antes de serem encaminhadas para a digestão, designadas por UM. De forma a abranger todo o território nacional foram recolhidas amostras em diferentes pontos do país.

A Tabela 3 apresenta o resumo das características gerais das Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR), mostra de onde foram obtidas as amostras, apresentam-se os resultados da análise elementar e do poder calorífico das lamas em estudo, também é referido o mecanismo de desidratação utilizado. Como se pode verificar, existe alguma variabilidade na composição das lamas de digestão (AD), ao invés do que acontece nas lamas mistas (UM). Os valores do poder calorífico indicam que a lama seca pode ser uma fonte de energia.

Tabela 3 - Análise elementar e poder calorífico superior e inferior das lamas (Dry2Value, 2020).

Amostra	Região	C (%wt)	H (%wt)	N (%wt)	S (%wt)	O (%wt)	Cinzas (%wt)	PCS (MJ/kg db)	PCI (MJ/kg db)	Mecanismo de desidratação
AD5	Centro	29,91	4,76	3,30	1,70	28,42	36,30	-	-	Leito de secagem
AD6	Centro	34,63	5,72	3,83	1,11	19,19	35,52	-	-	Filtros de bandas
AD7	Centro	26,12	4,64	3,11	3,10	13,41	49,62	15,17	14,20	Leitos de secagem
UM4	Lisboa	34,74	6,08	5,54	0,75	29,10	23,79	15,55	14,27	Leitos de secagem
UM8	Alentejo	31,05	5,59	5,80	0,78	33,36	23,42	15,34	14,17	Filtros de bandas
UM12	Norte	38,01	6,68	6,25	0,61	23,73	24,72	16,65	15,24	Centrifuga

PCS – poder calorífico superior; PCI – poder calorífico inferior; db – *dry basis* (base seca)

De acordo com o Decreto-Lei nº 276/2009 de 2 de outubro, as lamas de depuração só podem ser usadas nos solos agrícolas se forem devidamente tratadas. No entanto a legislação em vigor não especifica a necessidade de higienizar as lamas, limitando a sua aplicação em culturas que apresentem riscos de contaminação para o ser humano (Liz, 2017).

3.2. Metodologia de Ensaios

Com vista à realização dos ensaios necessários para a avaliação dos parâmetros intervenientes no estudo, apresenta-se hierarquicamente os três principais problemas:

- Gerar a suspensão das poeiras;
- Inflamá-las;
- Observar a evolução da chama e medir a sobrepressão formada, a qual será tanto maior quanto mais confinada for a câmara de explosões.

Neste trabalho, o estudo experimental da explosividade das lamas provenientes de ETAR foi realizado na câmara esférica, instalada no Laboratório de Termodinâmica do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), da Universidade de Coimbra (UC).

O sistema de ensaio normativo para determinar as características explosivas de suspensão de poeiras é, como referido anteriormente, realizado numa câmara de ensaio de 1m³, preparada para suportar elevadas pressões, Todavia existe uma alternativa a esse sistema de ensaio, cuja conformidade já foi provada, e, é realizado numa câmara esférica de 20l, que permite a realização dos ensaios de forma mais rápida e fácil (EN 14034-1:2004). Este sistema de ensaio encontra-se representado na Figura 12.

A câmara esférica é constituída por duas esferas ocas concêntricas. A explosão acontece na esfera interior, visto esta ser feita em aço inox e resistente à explosão. A esfera exterior tem uma passagem de água à volta da sua parede exterior de forma a dissipar o calor proveniente da explosão.

A amostra deve ser colocada no respetivo recipiente para poeiras. Quando este é pressurizado, e é aberta a electroválvula que liga à câmara de explosões, a poeira é dispersa no interior da câmara de explosão. A electroválvula é acionada pneumáticamente.

A fonte de ignição localiza-se no centro da esfera e a ignição é desencadeada pela descarga de uma corrente elétrica de uma bateria de 12 V sobre duas pequenas cargas pirotécnicas com energia de ignição de 10 kJ, localizadas em posições opostas no centro da esfera.

Para que depois da injeção de poeiras a pressão no interior da esfera seja igual a pressão atmosférica (1,01325 bar) antes da dispersão de poeiras deve ser feito vácuo (-0,6 bar).

Estudo da influência das características de lamas de ETAR na pressão de explosão máxima e velocidade de crescimento de pressão.

Para proceder à medição da pressão existe um sensor de pressão, um condicionador de sinal e um equipamento de recolha de dados.

Em conclusão, este sistema de ensaio é composto por:

- Câmara de explosão
- Sistema de dispersão de poeiras
- Fonte de ignição
- Sistema de medição de pressão
- Unidade de controlo das electroválvulas e descarga eléctrica.

De seguida apresenta-se o esquema geral do sistema de testes de explosão, onde é visível a ligação ao ar comprimido, circuito de água, bomba de vácuo, sistema de ignição a partir da bateria, sistema de disparo e a aquisição de sinal (Guo *et al.*, 2019).

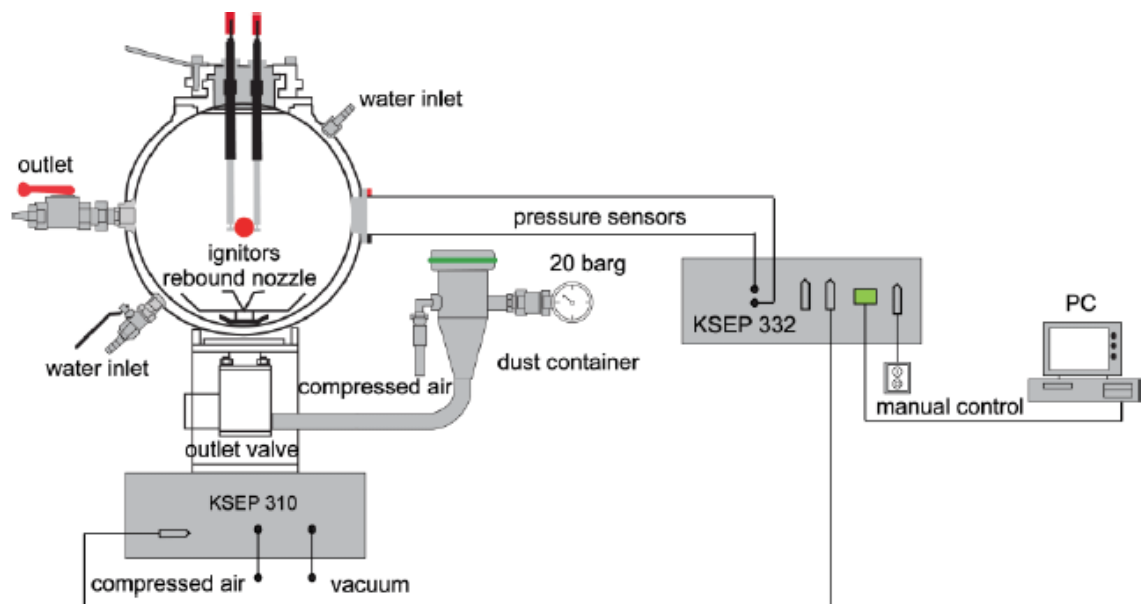


Figura 12 - - Esquema geral do procedimento experimental numa câmara de explosão (EN 14034-1:2004).

3.2.1. Câmara de Explosão

A câmara de explosão utilizada na realização dos ensaios tem um volume de 23,9 l, encontra-se representada na Figura 13.

Como referido anteriormente, a câmara é constituída por duas esferas concêntricas, tendo a esfera interior e exterior paredes com espessura de 5 e 2 mm, respetivamente. A esfera exterior tem duas aberturas para entrada e saída de água de refrigeração, garantindo assim que todos os ensaios realizados se iniciam nas mesmas condições de temperatura. Existem ainda três janelas laterais, com ligação à esfera interior, que possibilitam a colocação de sensores de pressão, uma saída onde é colocada uma mangueira de jardim com ligação ao exterior do edifício para evacuar os gases da câmara de explosão depois de cada ensaio. Existe ainda uma ligação da câmara de explosões à bomba de vácuo. Pelo fundo da câmara de explosões entra a tubagem que transporta a poeira para o interior da câmara de explosão. No topo existe uma abertura na qual é enroscado o sistema de ignição. Depois de cada ensaio a esfera é aberta para efetuar a limpeza (Sousa, 2013).

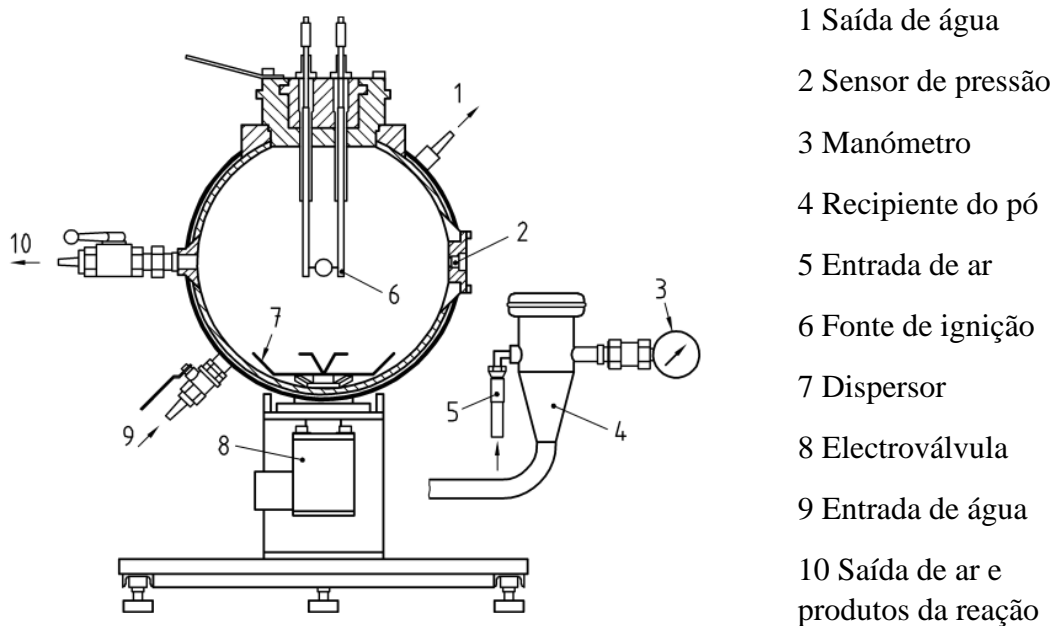


Figura 13 - Câmara de explosão (EN 14034-1:2004).

3.2.2. Fonte de Ignição

As nuvens de poeiras podem incendiar-se pela ação de chamas abertas, arcos elétricos, filamentos incandescentes, faíscas resultantes de fricção, condutas de vapor de alta pressão, e outras superfícies quentes, faíscas eletrostáticas ou soldadura.

Segundo a norma EN 14034-1:2004 os ensaios de determinação da pressão e velocidade de aumento de pressão de explosão máximas devem ser efetuados com fontes de ignição com energia de ignição de 10 kJ.

Cada ignidor pirotécnico é composto por 1,2 g da mistura explosiva que contém em massa 40% de zircónio (Zr), 30% de nitrato de bário (Ba) e 30% de peróxido de bário (BaO_2). A mistura é introduzida num cilindro plástico e selada com cola. Em cada ensaios são colocadas as cargas pirotécnicas em posição oposta no centro da câmara de explosões.

As cargas pirotécnicas são ativadas através de uma corrente de 0,6 A de intensidade durante 10 ms. A escolha deste tipo de fonte de ignição tem a ver com o facto de estas cargas libertarem a sua energia em apenas 10 ms, garantindo assim a formação de uma potencial onda de combustão de elevada energia capaz de iniciar a explosão de uma suspensão das poeiras em ar que é criada e mantida em condições de estado transiente (Hertzberg *et al*, 1986).

3.3. Procedimento Experimental

Os testes de explosão com misturas de poeira/ar definidas devem ser realizados de acordo com o seguinte procedimento.

Antes de iniciar o procedimento de teste, a temperatura dentro da câmara deve ser medida e registada.

A quantidade necessária das poeiras é colocada no recipiente para pó. O recipiente é então pressurizado a uma sobrepressão de 20 bar.

No início da dispersão de poeira, a pressão na câmara deve ser a pressão atmosférica. A pressão real no momento da ignição (pressão inicial p_i) deve ser medida e gravada.

O volume a pó da poeira não deve exceder $\frac{3}{4}$ do recipiente, permitindo uma pressurização adequada. Se este não poder ser alcançado devem ser usados em paralelo dois sistemas de dispersão com $5,4 \text{ dm}^3$.

A pressão é registada em função do tempo. A partir da curva de pressão/tempo, o P_{exp} , pressão de explosão, é determinado tomando a média aritmética dos valores medidos pela pressão nos sensores.

Se a diferença nas pressões medidas pelos sensores de pressão for superior a 10%, a precisão dos sensores deve ser verificada e as medições repetidas.

Uma ignição da poeira (explosão de poeira) deve ser considerada como tendo ocorrido, quando a medição a sobrepressão em relação à pressão inicial p_i é $\geq 0,3$ bar.

Após cada teste, a câmara de explosão deve ser limpa.

Este procedimento deve ser repetido para uma faixa de concentrações de poeira. Começando com uma concentração de 250 g/m^3 , a concentração deve ser aumentada em etapas de 250 g/m^3 ou diminuída em 50% da concentração anterior de acordo com a série mostrada abaixo:

...; 60; 125; 250; 500; 750; 1000; 1250; 1500; ... g/m^3

Por fim determina-se o P_{exp} , pressão de explosão, para cada concentração (EN 14034-1:2004).

De forma a controlar as etapas do ensaio experimental existe uma unidade de controlo que consiste num quadro elétrico/eletrónico de comando que tem como principal função sequenciar a pressurização do recipiente das poeiras, dar início á dispersão das poeiras para a câmara de explosão e ativar a fonte de ignição. Para que se realize o ensaio, após preparar o procedimento experimental, o utilizador deve premir dois botões que estão colocados na parte exterior do quadro elétrico/eletrónico, representado na figura seguinte.

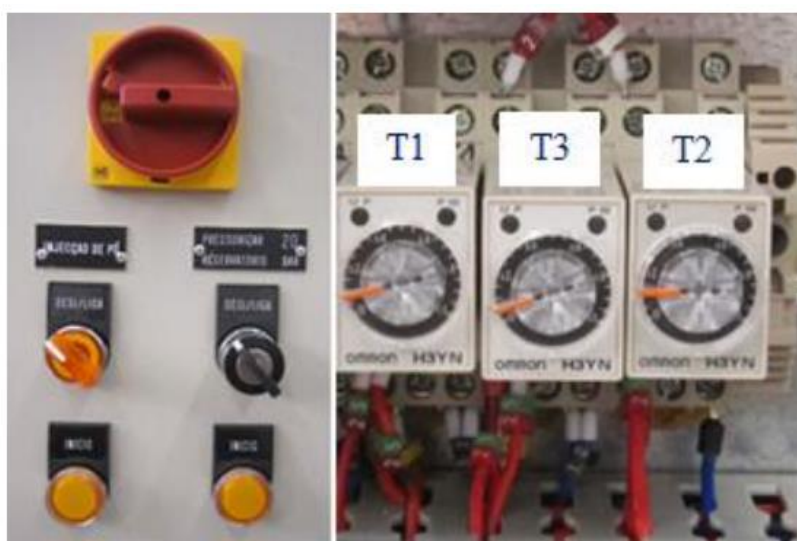


Figura 14 - Quadro elétrico/eletrónico da Unidade de controlo (Sousa, 2013)

Ao premir o botão identificado como “PRESSURIZAR RESERVATÓRIO INÍCIO”, representado do lado direito da Figura 14, o recipiente das poeiras é pressurizado a 20 bar com a entrada de ar proveniente de uma garrafa de ar comprimido. Depois prime -se o botão colocado do lado esquerdo da mesma figura, identificado como “INJEÇÃO DAS POEIRAS- INÍCIO”, que inicia um conjunto de ações até provocar a explosão. Inicialmente é dado sinal de abertura da eletroválvula, depois existem três

temporizadores, representados do lado direito da Figura 14, que iniciam uma contagem de tempo e após intervalos programados pelo utilizador, os temporizadores transmitem três sinais elétricos que sequenciam todo o processo. O temporizador 1 (T1) provoca o fecho da eletroválvula, o temporizador 3 (T3) a ordem para a descarga elétrica sobre a fonte de ignição, que inicia a explosão, e o temporizador 2 (T2) desativa o sistema elétrico/eletrónico. O intervalo de contagem de tempo de cada temporizador até ser transmitido o sinal elétrico, pela ordem em que foram referidos, é obviamente crescente, para que a explosão ocorra com a eletroválvula fechada e que o circuito apenas seja desativado com todo o processo de explosão concluído (Sousa, 2013).

O sinal de pressão é construído com base nos dados recolhidos pelo sensor de pressão e o software utilizado cria ficheiros de pressão em função do tempo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Composição Elementar de Lamas de ETAR

A composição elementar das lamas de ETAR está apresentada na Tabela 3, no Capítulo 3. Pelos dados apresentados podemos constatar que a lama com maior percentagem de carbono é a lama UM12 com 38,01%, seguem-se as lamas UM4 e AD6 com uma percentagem de 34,74% e 34,63% respetivamente. As lamas UM8, AD5 e AD7 aparecem, respetivamente, com 31,05%, 29,91% e 26,12% de percentagem de carbono. As lamas digeridas AD5 e AD6 apresentam uma concentração de carbono inferior às não digeridas UM4, UM8, UM12. Este padrão acontece também para a concentração dos restantes elementos, à exceção da lama AD6 que apesar de ser uma lama digerida, apresenta uma concentração de cada elemento superior a lama não digerida UM8, o que evidencia as diferenças de tratamento entre ETAR.

Quanto ao teor de cinzas as lamas digeridas (AD) apresentam maiores percentagens em relação às lamas mistas (UM). A lama com maior percentagem de cinzas é a lama AD7, com 49,62%, seguida da lama AD5 e AD6, com 36,30% e 35,52%, respetivamente.

Ainda na Tabela 3 do Capítulo 3, no que concerne ao PCI, o maior valor obtido foi de 15,24 (MJ/kg_{ab}) para a lama UM12 que é a que apresenta maior concentração de carbono (C). Observa-se assim uma relação entre a concentração de carbono e o poder calorífico das lamas. Quanto maior é concentração de carbono presente nas lamas, maior é poder calorífico que estas apresentam.

4.2. Análise e Descrição da Curva de Pressão

A curva de pressão representada na Figura 15 inicia-se com um valor de aproximadamente -0,6 bar, relativamente à pressão ambiente. Tal é devido ao vácuo para compensar o aumento de pressão na câmara de explosão, causado pela abertura da válvula que liga o recipiente onde está a poeira à câmara de explosão. Nesse momento a pressão na câmara de explosão será igual à pressão atmosférica.

As siglas indicadas na figura têm o seguinte significado:

- t_1 é o intervalo de tempo entre a ativação da ignição e o ponto em que se verifica a pressão máxima.
- t_e é o intervalo de tempo entre os sinais elétricos de abertura e fecho da electroválvula que promove a entrada da poeira na câmara de explosão.
- t_i é o intervalo de tempo entre os sinais elétricos de fecho da eletroválvula e de disparo do inflamador.

- Δt_i é o intervalo de tempo entre o sinal elétrico de disparo do inflamador e o instante de início da subida de pressão.
- P_d é a pressão de expansão do recipiente das poeiras. Diferença entre a pressão de vácuo e a pressão inicial. O seu valor deve ser de -0,6 bar, no entanto são aceitáveis valores de 0,55 a 0,7 bar. (Manual 7.0 kuhner AG, 2011)
- t_d é o tempo entre o sinal elétrico de abertura da eletroválvula e o início do aumento de pressão.
- t_v é o intervalo de ignição. Influencia o nível de turbulência. Deve ser igual a $60 \pm (0,5)$ ms (Manual 7.0 kuhner AG, 2011)

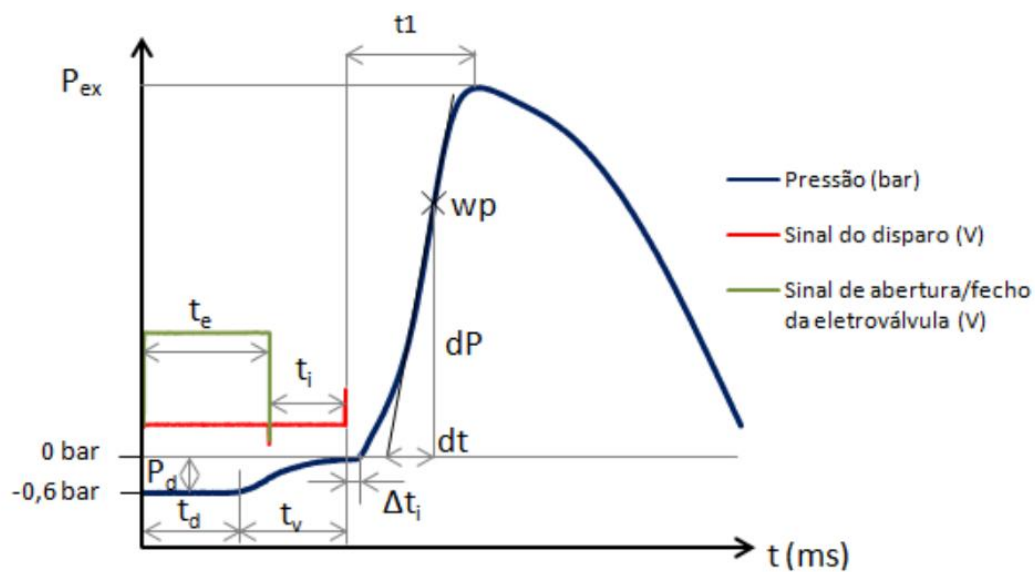


Figura 15 - Curva típica de pressão de explosão (Sousa, 2013).

No final do primeiro intervalo de tempo, representado por t_d , abre-se a electroválvula e dá-se uma subida de pressão até à pressão ambiente (0 bar). Seguidamente aciona-se o sinal elétrico para a ativação do ignidor que provoca o início da explosão. A partir deste instante observa-se uma subida bruta de pressão, sendo que a fase inicial desta subida é causada pela ativação dos ignidores pirotécnicos.

Atingem-se valores máximos de pressão e velocidade de aumento de pressão máximos, representados por P_{exp} e $(dP/dt)_{exp}$, respetivamente. Terminado o processo de combustão, a pressão baixa rapidamente (Sousa, 2013).

4.3. Metodologia de Resultados

Para obter os valores das pressões máximas de explosão das diversas lammas com diferentes concentrações realizaram-se alguns ensaios iniciais.

Na Figura 16 apresenta-se a curva de pressão realizada sem vácuo, ou seja, a câmara de ensaios estava à pressão atmosférica e apenas injetou-se ar.

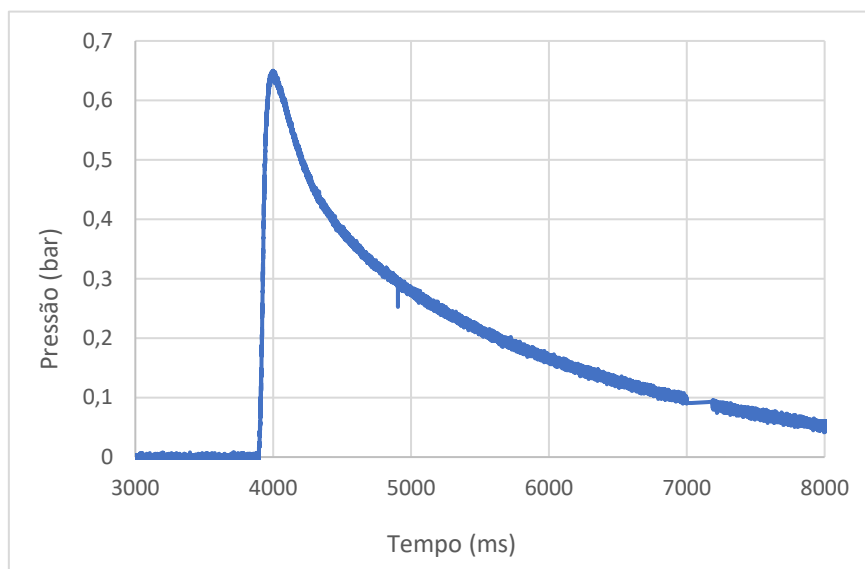


Figura 16 - Descarga de ar do recipiente de pó para a câmara esférica sem ignidores pirotécnicos e sem vácuo inicial.

Os resultados elucidam perfeitamente a necessidade do vácuo inicial de forma a que quando se dá a descarga do recipiente das poeiras para a câmara esférica a pressão a que se realizam os ensaios seja a pressão atmosférica.

Sabe-se também que existe um aumento de pressão causado pela explosão dos ignidores pirotécnicos. Para obter esse valor de pressão realiza-se um ensaio apenas com ar e ignidores, representado na seguinte figura.

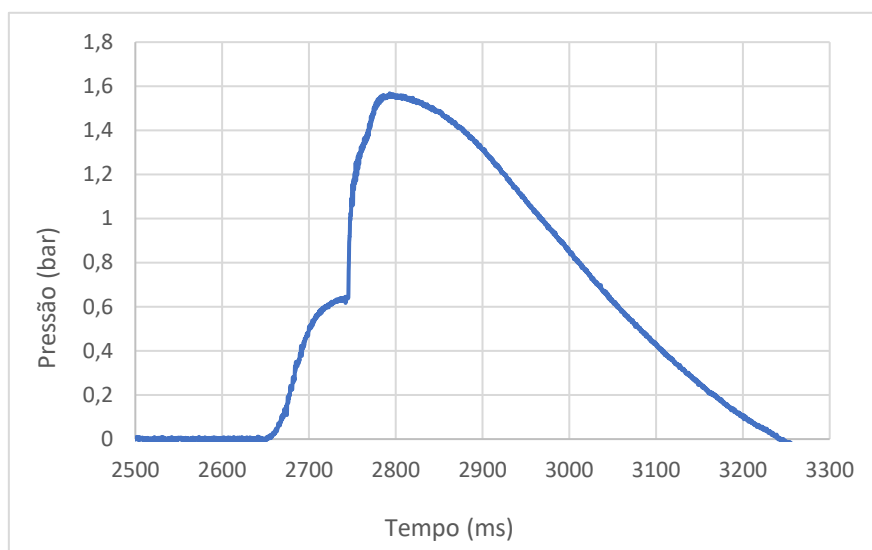


Figura 17 - Descarga de ar do recipiente de pó para a câmara esférica com ignidores pirotécnicos.

Desta forma obtém-se o valor máximo de pressão de explosão causada pelos ignidores, valor esse que deve ser retirado dos valores finais de pressão máxima de explosão obtidos de forma a chegar aos resultados reais do aumento de pressão causado pela explosão da suspensão de poeiras de lamas de ETAR.

O passo seguinte passa pela realização dos ensaios das seis amostras de lamas de ETAR utilizadas neste estudo de forma a adquirir os respectivos gráficos pressão/tempo.

O sinal de pressão apresentado é construído com base nos dados recolhidos pelo sensor de pressão e que o software instalado no computador permite recolher num ficheiro de pressão em função do tempo com recolha de 10 pontos/ms. O sinal dP/dt apresentado é construído através da derivada centrada de 10 pontos do sinal de pressão. Ao utilizar este método consegue-se eliminar o ruído de forma a facilitar a análise dos resultados e evita-se a apresentação de resultados erróneos. Deste modo existe um alisamento do sinal e um menor valor máximo resultante, em relação à derivada de três pontos.

4.4. Determinação da Pressão de Explosão e Velocidade de Aumento de Pressão de Explosão Máximas

Para determinar experimentalmente a pressão de explosão e velocidade de aumento de pressão máximas foram realizados catorze ensaios, referentes a seis amostras de lamas de ETAR, em que se variou a concentração de poeiras em suspensão entre 125 g/m^3 , 250 g/m^3 e 750 g/m^3 .

As Figuras 18 e 19 representam as três curvas de evolução da pressão de explosão e velocidade de aumento de pressão de explosão em função do tempo (lama AD5),

correspondentes às três diferentes concentrações de poeira, com foco de elucidar a subida e descida de pressão em função da concentração.

Aquando do início da combustão de poeiras a velocidade aumenta e verifica-se uma rápida progressão de chama traduzida pelo rápido aumento de pressão no interior da câmara de explosão.

Observa-se o aumento de pressão máxima de explosão, tal como, o aumento da velocidade de aumento de pressão com o aumento da concentração.

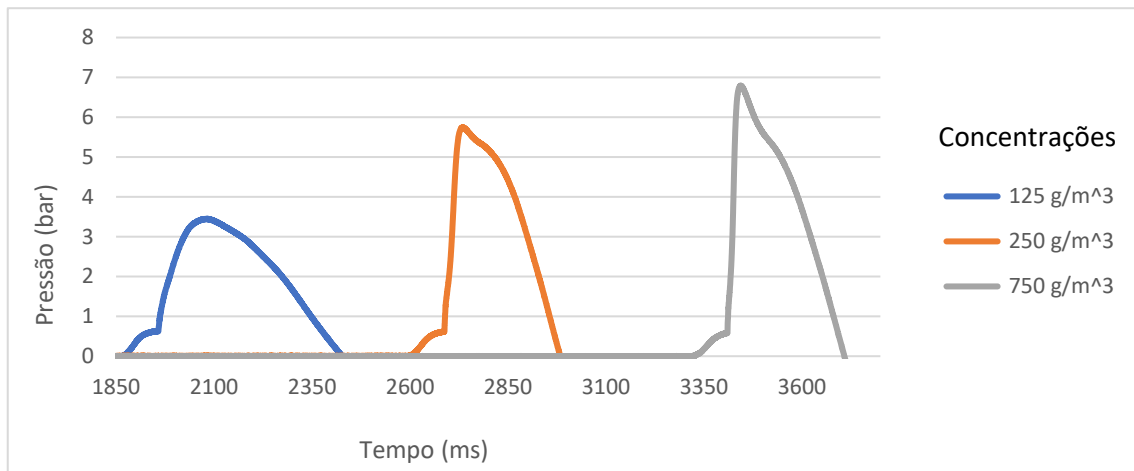


Figura 18 - Efeito da concentração de pó na evolução da pressão de explosão (lama AD5).

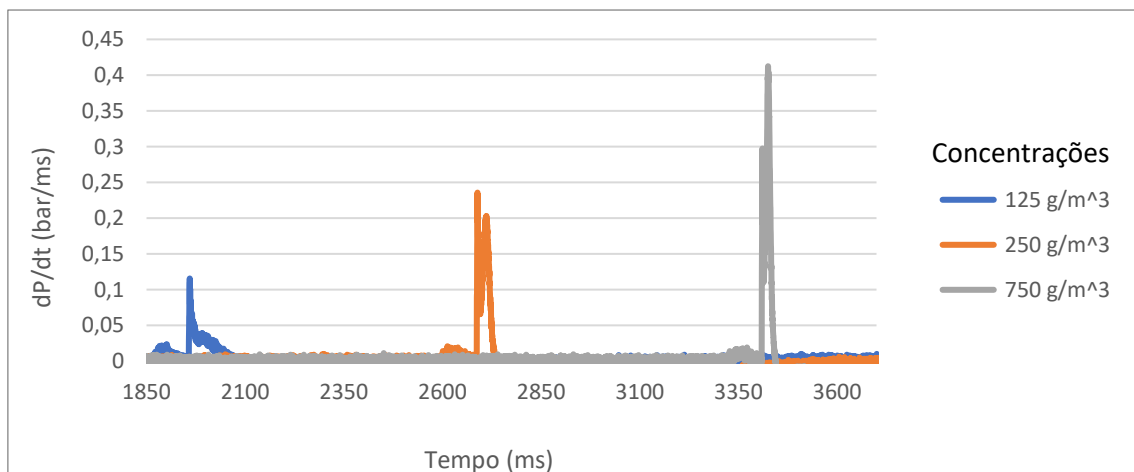


Figura 19 - Efeito da concentração de pó na evolução da velocidade de aumento de pressão de explosão (lama AD5).

Na Figura 20 apresentam-se os resultados experimentais obtidos para a pressão máxima de explosão das diversas amostras de lamas de ETAR, com variadas concentrações.

Ao comparar os valores obtidos de P_{exp} de todos os ensaios, verifica-se um aumento significativo da pressão máxima de explosão com o aumento da concentração.

Quando comparadas com as lamas mistas (UM) às lamas digeridas (AD), estas últimas apresentam maioritariamente valores mais elevados de pressão máxima de explosão.

Para uma concentração de 125 g/m^3 a lama AD6 com 34,63% de C, 5,72% H e 35,52% de cinzas, é a lama que apresenta o maior valor de pressão máxima de explosão, seguida da lama UM4 com 34,74% de C, 6,08% de H e 23,79% cinzas. A lama AD5 e AD7 apresentam resultados de pressão máxima de explosão idênticos com 29,91% de C, 4,76% de H e 36,30% de cinzas e 26,61% de C, 4,64% de H e 49,62% de cinzas, respetivamente.

O mesmo é visível para as restantes lamas e concentrações, o elevado teor de carbono, hidrogénio e/ou cinzas influenciará o valor da pressão máxima de explosão.

Verifica-se que existe uma relação entre a percentagem de carbono, hidrogénio e cinzas e a pressão máxima de explosão. Porém como não foram feitos ensaios de todas as amostras em todas as concentrações dificulta a análise de qual terá maior impacto no aumento da pressão máxima de explosão.

Os valores máximos de pressão de explosão obtidos para cada concentração são:

- 2,1 bar para a concentração 125 g/m^3 (lama AD6);
- 4,4 bar para a concentração 250 g/m^3 (lama AD6);
- 5,6 bar para a concentração 750 g/m^3 (lama AD5).

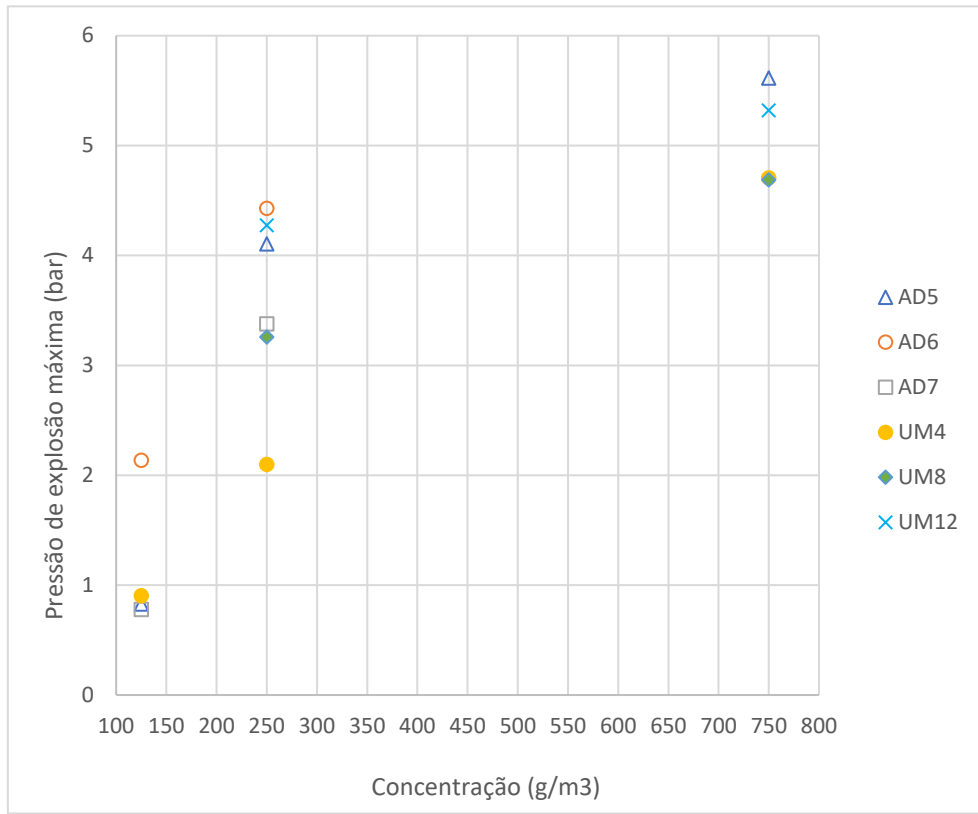


Figura 20 - Efeito da concentração de poeiras sobre a pressão máxima de explosão.

A velocidade de aumento de pressão de explosão máxima registada foi obtida para a lama UM4, para uma concentração de 125 g/m^3 . Todavia este ensaio apresenta um comportamento bastante dispare quando comparado com os restantes.

Na generalidade quando se aumentou a concentração de 125 g/m^3 para 250 g/m^3 deu-se um aumento significativo da velocidade de aumento de pressão de explosão. Porém quando se aumenta a concentração de 250 g/m^3 para 750 g/m^3 dá-se uma ligeira diminuição na velocidade de aumento de pressão de explosão, continuando estes valores a ser superiores quando comparados com os obtidos com 125 g/m^3 de concentração.

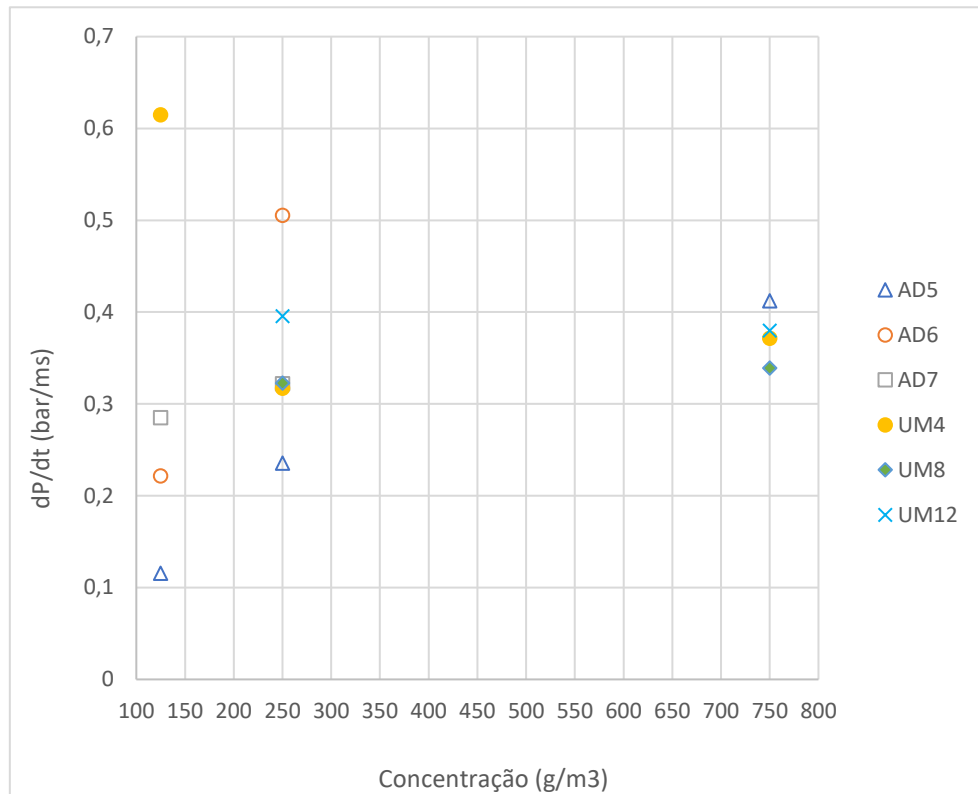


Figura 21 - Efeito da concentração do pó na evolução da velocidade de aumento de pressão de explosão máxima.

O parâmetro, K_{st} , é um indicador da severidade da explosão de uma dada amostra de poeiras, e está relacionada com o valor da velocidade de aumento de pressão máxima obtida no varrimento de todas as concentrações em que ocorreu explosão. Neste trabalho, por falta de material em quantidade suficiente, não foi possível varrer suficientes concentrações de modo a obter esse valor máximo do $(dP/dt)_{exp}$, e conseqüente não foi estimado o valor de K_{st} .

5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUAÇÃO DO TRABALHO

Neste trabalho foi estudado a explosividade de poeiras na secagem térmica de lamas provenientes das Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR), tendo por finalidade avaliar as concentrações em que existe explosão e a severidade dessa explosão.

Como variáveis analisou-se o efeito da concentração e da composição elementar das poeiras na variação da pressão de explosão e da velocidade de aumento de pressão da explosão.

No que concerne à composição elementar observou-se uma relação entre a concentração de carbono (C) e o poder calorífico das lamas. As lamas digeridas (AD) apresentam uma menor concentração de C do que as não digeridas (UM), e consequentemente um menor poder calorífico inferior (PCI).

Verifica-se também, que comparativamente às lamas mistas (UM), as lamas digeridas (AD) apresentam, geralmente, valores mais elevados de pressão máxima de explosão. O valor da pressão máxima de explosão das poeiras de lamas é mais elevado quanto maior for a percentagem de carbono (C), hidrogénio (H) e/ou cinzas.

Os ensaios de explosividade, realizados com várias amostras, mostraram que o aumento da concentração de poeiras origina explosões mais violentas, com maiores valores de pressão máxima de explosão e, geralmente, uma velocidade de aumento de pressão de explosão mais elevada.

Excluindo as poeiras da lama UM4, obtiveram-se como valores máximos de pressão e velocidade máxima de aumento de pressão:

- 2,1 bar e 0,285 bar/ms para uma concentração de 125 g/m³;
- 4,4 bar e 0,506 bar/ms para uma concentração de 250 g/m³;
- 5,6 bar e 0,412 bar/ms para uma concentração de 750 g/m³.

Conclui-se que um aumento da concentração provocará sempre um aumento da pressão de explosão máxima, todavia no que toca ao aumento da velocidade máxima de aumento de pressão de explosão, este não aumenta, ininterruptamente à medida que aumentamos a concentração. Verificou-se que quando aumentamos a concentração de poeiras de 125 g/m³ para 250 g/m³ existiu um aumento da velocidade de aumento de pressão máxima de explosão, porém, quando aumentamos a concentração para 750 g/m³, deu-se um ligeiro decréscimo na velocidade de aumento de pressão, continuando esse valor a seu maior que o registado a 125 g/m³.

Para apurar com maior rigor as conclusões avançadas, torna-se necessário realizar ensaios com todas as amostras para as mesmas concentrações e fazer um varrimento para mais concentrações de forma a determinar o valor máximo do aumento da velocidade de

aumento de pressão máxima de explosão para que se consiga calcular o índice de deflagração, K_{st} , para cada tipo de lama.

De modo a avaliar a influência da granulometria na explosividade de lamas de ETAR, deverão ser preparadas amostras com diferentes granulometrias e realizados ensaios semelhantes de modo a avaliar a influência da granulometria na pressão máxima de explosão e na velocidade de aumento de pressão de explosão máxima.

Deixa-se em nota que para que isto seja possível varrer maior número de concentrações é necessário dispor no mínimo de cerca de 50 g por tipo de poeira. Se admitirmos 3 ensaios por cada concentração, de modo a garantir reprodutibilidade de resultados será necessário pelo menos 150 g. Se se fizer diferentes granulometria será preciso multiplicar este valor pelo número de classes granulométricas a estudar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasi, T., Abbasi, S. A. (2007). *Dust explosions-Cases, causes, consequences, and control*. *Journal of Hazardous Materials*, 140(1–2), 7–44.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.11.007>
- Andr, A., Tavares, T., Orientadores, C., Jos, D., Miranda, C., Jos, D., Moreira, M. B., & Ribeiro, S. (2014). Dissertação de Mestrado Implementação da Diretiva ATEX no Sector Industrial, Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Segurança aos Incêndios Urbanos.
- Semenova (2005). Estudo da explosão o pó de casca do pinheiro bravo. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- BS EN 14034-1. (2004). Determination of explosion characteristics of dust clouds Part 1: Determination of maximum pressure Pmax of dust clouds. 3.
- BS EN 14034-2. (2006). Determination of explosion characteristics of dust clouds. Part 1: Determination of the maximum rate of explosion pressure rise (dp/dt)max of dust clouds
- Buys, B. R., Klapwijk, A., Elissen, H., & Rulkens, W. H. (2008). Development of a test method to assess the sludge reduction potential of aquatic organisms in activated sludge. *Bioresource Technology*, 99(17), 8360–8366.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.041>
- de Sá, A. (2012). Prevenção e Controle dos Riscos com Poeiras Explosivas. Associação Sul-Rio-Grandense de Engenharia de Segurança, 051, 103.
http://www.ares.org.br/uploads/pdf/explosoes_com_poeiras.pdf
- Díaz, E., Pintado, L., Faba, L., Ordóñez, S., & González-LaFuente, J. M. (2019). Effect of sewage sludge composition on the susceptibility to spontaneous combustion. *Journal of Hazardous Materials*, 361(August 2018), 267–272.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.094>
- Eckhoff, R. K. (2009). Understanding dust explosions. The role of powder science and technology. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(1), 105–116.
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2008.07.006>
- Fernandez-Anez, N., Garcia-Torrent, J., & Medic-Pejic, L. (2014). Flammability properties of thermally dried sewage sludge. *Fuel*, 134, 636–643.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.006>
- Gonçalves, J. C. (2017). Dissertação de Mestrado Análise das Tecnologias Correntes para o Tratamento e Secagem de Lamas de ETAR, Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologias e Gestão do Ambiente na Universidade de Coimbra, 72.
- Guo, L., Xiao, Q., Zhu, N., Wang, Y., Chen, X., & Xu, C. (2019). Comparative Studies

on the Explosion Severity of Different Wood Dust from Fiberboard Production. *Bioresources*, 14, 3182–3199.

- Kacprzak, M., Neczaj, E., Fijałkowski, K., Grobelak, A., Grosser, A., Worwag, M., Rorat, A., Brattebo, H., Almås, Å., & Singh, B. R. (2017). Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research*, 156(August 2016), 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.010>
- Kuracina, R., Szabová, Z., & Menčík, M. (2019). Determination of Explosion Characteristics of Sugar Dust Clouds. *TRANSACTIONS of the VŠB – Technical University of Ostrava, Safety Engineering Series*, 13(1), 15–20. <https://doi.org/10.2478/tvsbses-2018-0003>
- Lamas, R. D. E., Por, D. E. E., & Energ, D. O. P. (2019). João Paulo de Almeida Pais. Dissertação de Mestrado Estudo da Decomposição Térmica de Lamas de ETAR por Pirólise e Avaliação do Poder Energético, Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente na Universidade de Coimbra.
- Lima, R. H. (2016). Dissertação de Mestrado Medidas Preventivas Para As Poeiras Produzidas na Reabilitação, Dissertação para obtenção de grau Mestre em Engenharia Civil e do Ambiente no Instituto Politécnico de Viana do Castelo. 141.
- Liz, J. V. (2017). Dissertação de Mestrado Contribuição para o estudo de sistemas de secagem de lamas de ETAR, Dissertação apresentada para obtenção do grau Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente na Universidade de Coimbra. 79
- Sousa, P.M.B. Por, Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro. (2013). Dissertação de Mestrado Determinação dos Parâmetros de Explosividade de Misturas C-ar e/ou C-O2, Dissertação apresentada para obtenção do grau de Meste de Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente na Universidade de Coimbra.
- Medic Pejic, L., Fernandez Anez, N., García Torrent, J., & Ramírez-Gómez, Á. (2015). Determination of spontaneous combustion of thermally dried sewage sludge. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 36, 352–357. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.01.013>
- On, T., Sewage, U., Drying, S., Aided, P., Adjuvants, B. Y., Producing, F. O. R., & Amendments, S. (2020). Luciano de Andrade Gomes S TUDIES ON URBAN SEWAGE SLUDGE DRYING PROCESS AIDED BY ADJUVANTS FOR PRODUCING.
- Zerlottin, M., Refosco, D., Della Zassa, M., Biasin, A., & Canu, P. (2013). Self-heating of dried wastewater sludge. *Waste Management*, 33(1), 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.08.014>
- Graça, Nuno Alexandre de Jesus (2017) Vias de valorização das lamas de depuração de uma destilaria. <https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/21361>

Anexo A

A Portaria n.º 209/2004, de 3 de março, que aprova a lista europeia de resíduos estabelece os seguintes tipos de lamas passíveis de aplicação na agricultura:

1. Lamas de depuração:

- Lamas provenientes de ETAR domésticas, urbanas e de outras ETAR de composição similar às águas residuais domésticas e urbanas segundo a classificação da Lista Europeia de Resíduos (LER) (**LER 190805**);
- Lamas de fossas sépticas e de outras instalações similares para o tratamento de águas residuais (**LER 200304**);
- Lamas provenientes de ETAR de atividades agropecuárias (**LER 020199**).

2. Lamas de composição similar:

- As lamas provenientes do tratamento de efluentes de preparação e processamento de frutos, legumes, cereais, óleos alimentares, cacau, café, chá e tabaco, da produção de conservas, da produção de levedura e extracto de levedura e da preparação e fermentação de melaços, segundo a classificação da LER 020305;
- As lamas provenientes do tratamento de efluentes do processamento do açúcar, de acordo com a classificação da **LER 020403**;
- As lamas provenientes do tratamento de efluentes da indústria de lacticínios, nos termos da classificação da **LER 020502**;
- As lamas provenientes do tratamento de efluentes da indústria de panificação, pastelaria e confeitaria, segundo a classificação da **LER 020603**;
- As lamas provenientes do tratamento de efluentes da produção de bebidas alcoólicas e não alcoólicas, excluindo café, chá e cacau, de acordo com a classificação da **LER 020705**;

Estudo da influência das características de lamas de ETAR na pressão de explosão máxima e velocidade de crescimento de pressão.

- As lamas provenientes do tratamento de efluentes da produção e transformação da pasta para papel, papel e cartão, nos termos da classificação da **LER 030311**;

Caso seja efetuada mistura de lamas constituída exclusivamente a partir dos resíduos acima referidos, deve ser utilizado o código **LER 190899** (Outros resíduos não anteriormente especificados).

Apêndice A

Neste anexo mostra-se o registo dos ensaios para os quais se obtiveram os parâmetros de explosão em estudo: P_{max} , $(dP/dt)_{max}$, tal como os restantes ensaios realizados.

Nas seguintes figuras apresenta-se a evolução da pressão e da velocidade de aumento de pressão durante a explosão em cada ensaio.

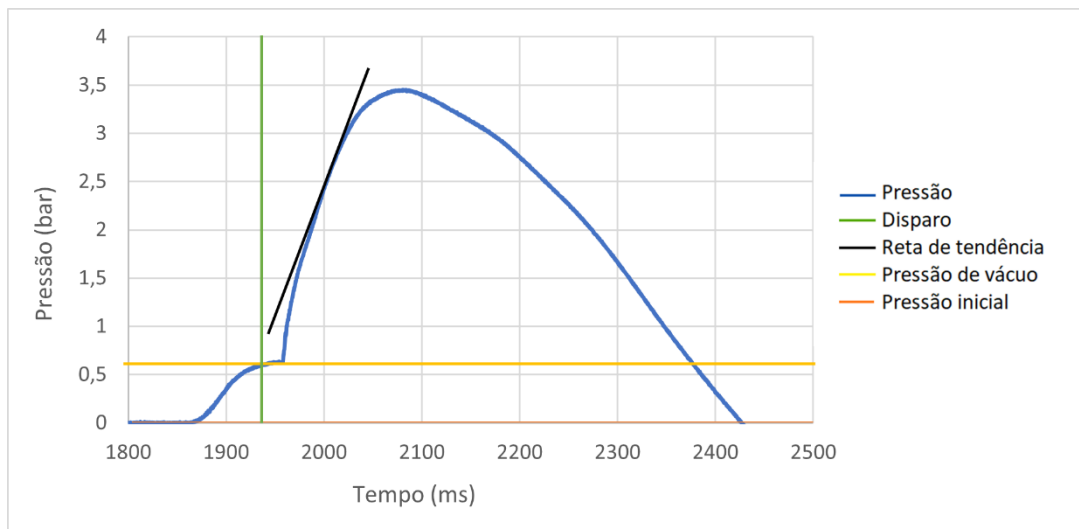


Figura 22 - Evolução da pressão durante a explosão da suspensão de poeiras das lamas de ETAR com concentração de 125 g/m³.

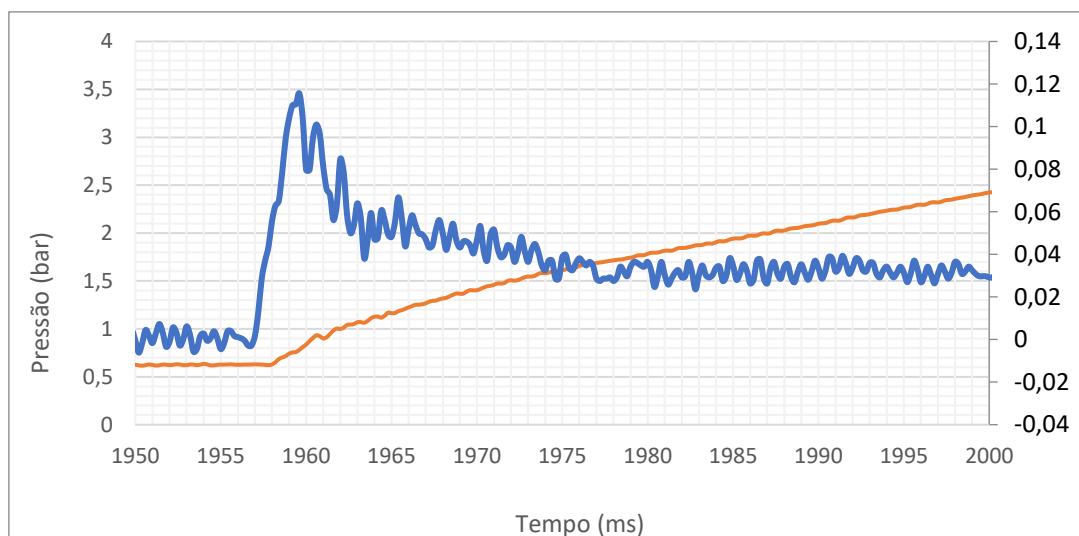


Figura 23 - Evolução da velocidade de aumento de pressão durante a explosão da suspensão de poeiras de lamas de ETAR com concentração de 125 g/m³.

Estudo da influência das características de lamas de ETAR na pressão de explosão máxima e velocidade de crescimento de pressão.

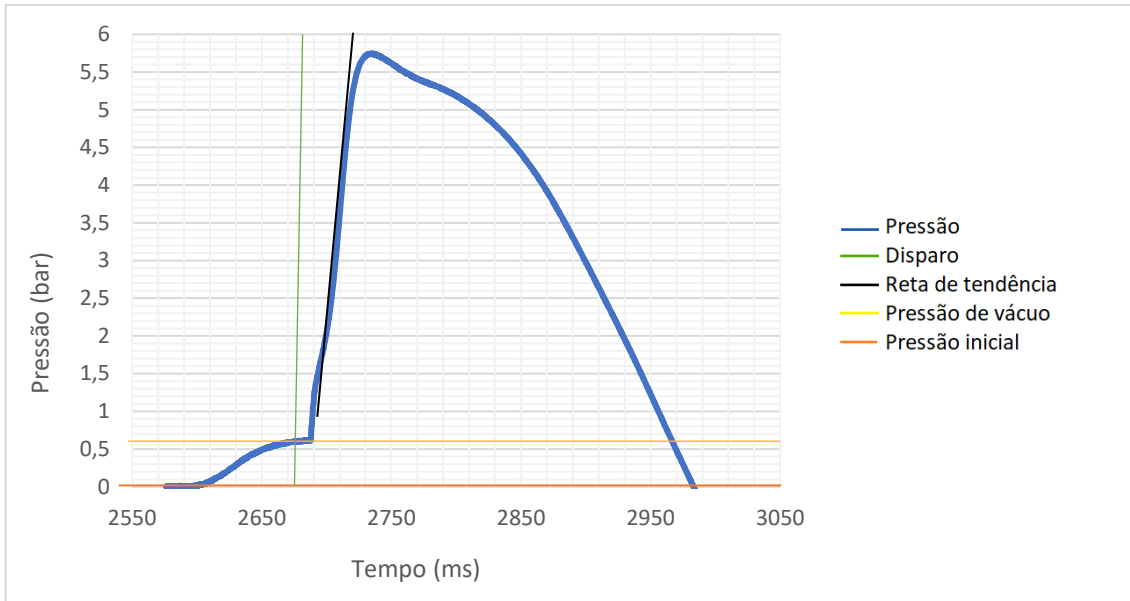


Figura 24 - Evolução da pressão durante a explosão da suspensão de poeiras das lamas de ETAR com concentração de 250 g/m³.

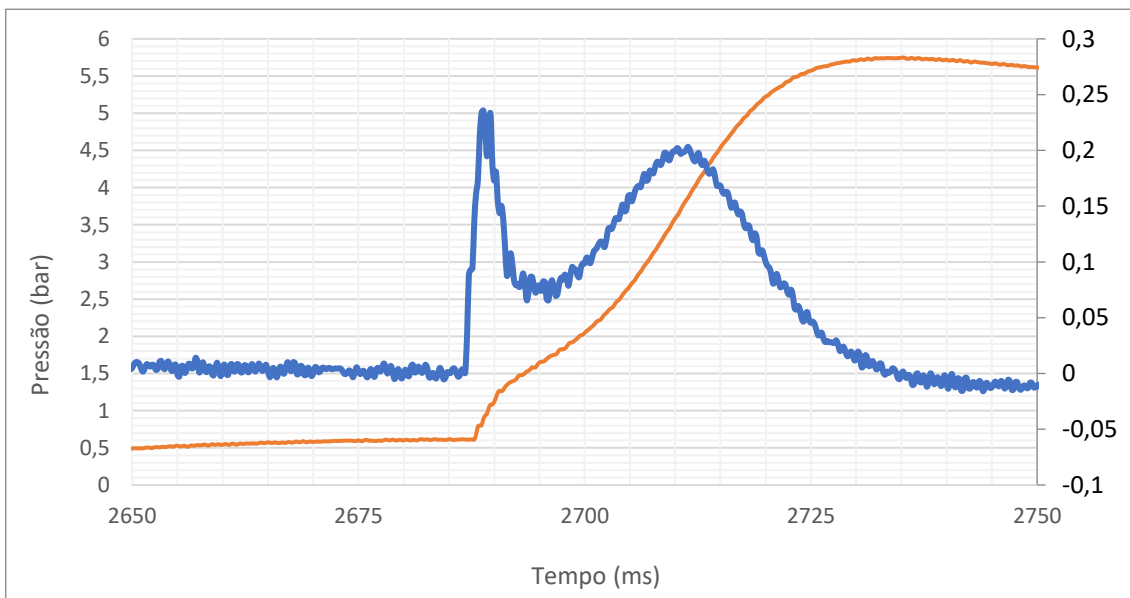


Figura 25 - Evolução da velocidade de aumento de pressão durante a explosão da suspensão de poeiras de lamas de ETAR com concentração de 250 g/m³.

Estudo da influência das características de lamas de ETAR na pressão de explosão máxima e velocidade de crescimento de pressão.

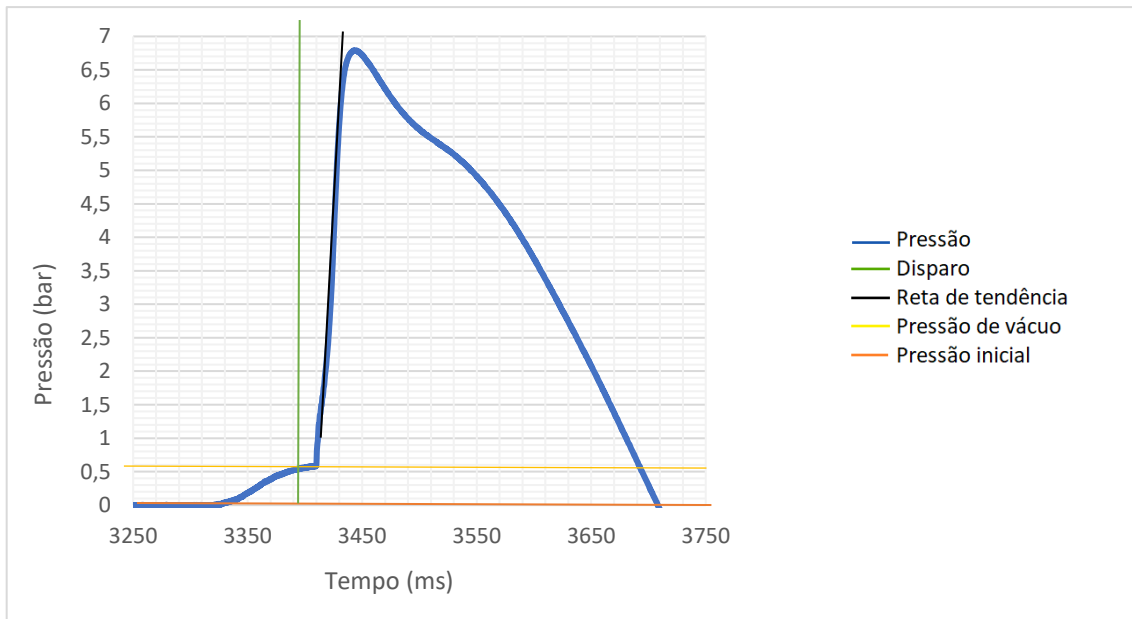


Figura 26 - Evolução da pressão durante a explosão da suspensão de poeiras das lamas de ETAR com concentração de 750 g/m³.

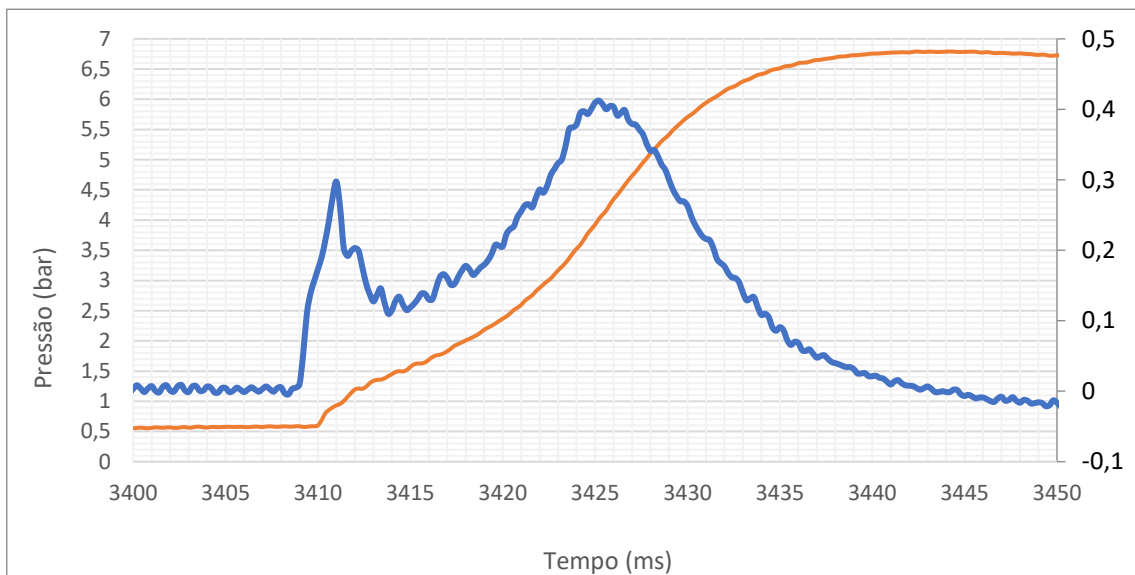


Figura 27 - Evolução da velocidade de aumento de pressão durante a explosão da suspensão de poeiras de lamas de ETAR com concentração de 750 g/m³.

Apêndice B

Na seguinte tabela apresenta-se um resumo dos resultados dos ensaios realizados com as diferentes lamas de ETAR, para as concentrações de 125 g/m³, 250 g/m³ e 750 g/m³.

Tabela 4 - Resumo dos resultados experimentais obtidos.

AMOSTRA	CONCENTRAÇÃO (g/m ³)	Pexp Corrigido (bar)	(dP/dt)max (bar/ms)
AD5	125	0,8	0,116
AD5	250	4,1	0,236
AD5	750	5,6	0,412
AD6	125	2,1	0,222
AD6	250	4,4	0,506
AD7	125	0,8	0,285
AD7	250	3,4	0,322
UM4	125	0,9	0,615
UM4	250	2,1	0,317
UM4	750	4,7	0,371
UM8	250	3,3	0,323
UM8	750	4,7	0,339
UM12	250	4,3	0,396
UM12	750	5,3	0,380

Apêndice C

Procedimento Experimental

1. Abrir a torneira para passagem de água de refrigeração;
2. Abrir a válvula principal da garrafa de ar comprimido. De seguida ligar a válvula reguladora, cuidadosamente, até 20 bar no máximo;
3. Abrir a válvula de alimentação de ar comprimido e a válvula de seccionamento;
4. Fazer vácuo de -0,6 bar, em relação à pressão ambiente. Ligar o compressor e abrir a válvula de ligação entre a câmara de explosão e a bomba de vácuo. Fechar esta válvula depois de atingir o valor de vácuo pretendido. Garantir que está fechada a válvula de ligação entre a câmara de explosão e o exterior, durante este processo;
5. Fazer um ensaio de controlo apenas com o ar retido na câmara onde se coloca a amostra de poeira, ie, sem colocar poeira no recipiente, verificando assim que o sistema se encontra a funcionar corretamente;
6. Abrir válvula de ligação ao exterior, de modo evacuar a câmara de explosão, libertando para o exterior o excesso de pressão gerado;
7. Colocar a amostra de poeira pretendida no recipiente previsto;
8. Colocar dois ignidores pirotécnicos com ligação no exterior para o sistema de ignição (dois eléctrodos);
9. Ligar o sistema de ignição da bateria à bateria através dos dois eléctrodos;
10. Repetir o processo descrito no passo 4;
11. Premir por ordem sequencial os dois botões da unidade de controlo, primeiro o de pressurização do recipiente das poeiras e depois o de ignição da mistura;
12. Repetir o processo descrito no ponto 6;
13. Fechar a válvula principal da garrafa de ar comprimido e depois a válvula reguladora;
14. Fechar a válvula de ar comprimido e a válvula de seccionamento, retirando a pressão da linha;
15. Retirar o sistema de ignição e proceder à limpeza da câmara de explosão, por aspiração de poeiras das paredes e resíduos das cargas pirotécnicas usadas para ignição da mistura.