



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Manuel Filipe Regalado Gomes Neto

**ANÁLISE DE ACIDENTES DE EXPLOSÃO COM
SECADORES E FORMAS DE MITIGAÇÃO**

**Dissertação de Mestrado em Dinâmicas Sociais e Riscos Naturais e Tecnológicos
orientada pelo Professor Doutor José Carlos Miranda Góis, apresentada no
Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra**

Setembro de 2022

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Análise de acidentes de explosão com secadores e formas de mitigação

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Dinâmicas
Sociais e Riscos Naturais e Tecnológicos

Analysis of explosion accidents with dryers and mitigation strategies

Autor

Manuel Filipe Regalado Gomes Neto

Orientador

Professor Doutor José Carlos Miranda Góis

Júri

Presidente **Professor Doutor José Manuel Baranda Ribeiro**
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Professor Doutor José Carlos Miranda Góis
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais

Professora Doutor Ricardo António Lopes Mendes
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, setembro 2022

“A mente que se abre a uma nova ideia, jamais voltará ao seu tamanho original ”

Albert Einstein

Agradecimentos

Preliminarmente, quero agradecer ao meu orientador Professor Doutor José Carlos Góis, por toda a ajuda prestada na realização da dissertação, pois sem ele a realização da mesma tornar-se-ia numa tarefa bastante mais difícil.

Agradeço também à empresa CIRES - Estarreja, por todo o apoio prestado e pela disponibilização de informação, imprescindível para a conclusão do trabalho.

Por fim, um agradecimento à família e aos amigos, pela paciência e pelo incentivo que sempre demonstraram.

Resumo

Este trabalho de dissertação tem como objetivo primordial, a análise das principais causas de explosão em secadores e formas de mitigação do risco.

A diminuição do risco de explosão associado a atmosferas explosivas é de enorme importância, tendo em consideração os danos significativos que este tipo de incidente normalmente causa nas pessoas, instalações e ambiente e os consequentes prejuízos económicos que daí resultam.

Tratando-se de uma questão de segurança no trabalho, as explosões deste tipo são uma problemática de enorme magnitude e, deste modo, esta abordagem tem um importante foco. Neste contexto a necessidade de prevenção para este tipo de acidentes é essencial para evitar perdas de vidas humanas e enormes prejuízos patrimoniais. De outra forma, torna-se fundamental a consciencialização e sensibilização de operadores, de técnicos e de empresários.

As origens deste tipo de acidentes estão explicadas através estudos realizados por diversos autores e, neste trabalho, são mencionadas as causas mais prováveis para a sua ocorrência.

Assim, as principais causas de explosão vão desde a fonte de ignição, a problemas de manutenção de equipamentos e à necessidade de formação e treino dos operadores.

É ainda analisada a implementação de novas tecnologias e dispositivos de segurança, por forma a mitigar este tipo de acidentes.

As hipóteses argumentadas e o estudo de caso foram coerentes com a realidade, concluindo-se que os fatores humanos, são as principais causas de acidentes desta natureza.

Destarte, os resultados apontam para a necessidade constante de formação e treino dos operadores e a operacionalização de uma manutenção preventiva dos equipamentos.

Palavras-chave: Explosão, poeiras e gases combustíveis, secadores industriais, silos, fonte de ignição, dispositivos de segurança

Abstract

This dissertation work has as its main objective, the analysis of the main causes of explosion in dryers and forms of risk mitigation.

Reducing the risk of explosion associated with explosive atmospheres is of great importance, taking into account the significant damage that this type of incident normally causes to people, facilities and the environment and the consequent economic damage that results from it.

As it is a safety issue at work, explosions of this type are a problem of enormous magnitude and, therefore, this approach has an important focus. In this context, the need to prevent this type of accident is essential to avoid loss of human life and huge property damage. Otherwise, it becomes essential to raise the awareness and sensitization of operators, technicians and entrepreneurs.

The origins of this type of accident are explained through studies carried out by several authors and, in this work, the most probable causes for their occurrence are mentioned.

So, the main causes of explosion range, from the source of ignition, to equipment maintenance problems and the need for formation and training of operators.

It is also an implementation of new technologies and safety devices, in order to mitigate this type of accident.

The hypotheses argued and the case study were consistent with reality, concluding that human factors are the main causes of accidents of this nature.

Thus, the results point to the constant need for formation and training of operators and the implementation of preventive maintenance of equipment.

Keywords: Explosion, combustibe dust and gases, industrial dryers, silos, ignition source, security devices

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	vi
Símbolos	vii
Siglas	vii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos de estudo	3
1.3. Estrutura da dissertação	4
2. Revisão dos conceitos teóricos sobre explosões	5
2.1. Explosões	5
2.2. Explosão de gases	9
2.3. Explosão de poeiras	12
2.4. Limites de explosividade	16
2.5. Causas físicas para a explosão	19
2.5.1. Granulometria da poeira	19
2.5.2. Concentração mínima de explosividade	21
2.6. Causas químicas para a explosão	26
2.6.1. Diferenças nas concentrações de explosividade entre gases e poeiras	26
2.6.2. A influência da natureza das poeiras na concentração limite de inflamabilidade	28
2.6.3. Energia de ignição e a dimensão da câmara de explosões	29
2.6.4. Efeito da concentração de oxigénio na explosão de poeiras	31
2.6.5. Influência na humidade do ar e da poeira na ignição	32
2.6.6. Temperatura mínima de ignição de poeiras	33
2.7. Classificação das poeiras: aptidão de ignição e graduação da explosividade	34
2.8. Acidentes por explosões de poeiras	37
3. Materiais e metodologia	40
4. Explosões em secadores e medidas de mitigação	42
4.1. Processo de secagem por recirculação de calor	42
Estudo de caso - CIREs (Estarreja)	42
4.1.2. Medidas de proteção contra explosões	53
4.1.2.1. Medidas Técnicas	53
4.1.2.2. Medidas Organizacionais	58
4.1.2.3. Aquisição de Equipamentos: Requisitos	61
4.1.2.4. Manutenção de Equipamentos: Requisitos	64
4.1.2.5. Procedimentos de monitorização durante e após a emergência	65
4.1.2.6. Meios Materiais	67
4.1.2.7. Meios Humanos	72
4.1.3. Formação e Treino	73
4.1.4. Comunicações com o exterior	77
4.1.5. Comunicações com estabelecimentos vizinhos	78
5. Conclusões e perspetivas de trabalhos futuros	81
Referências bibliográficas	83
Legislação, regulamentos e normas aplicáveis	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Hexágono da explosão de poeiras.....	14
Figura 2.2 - Explosividade do pó de alumínio no reator (Relação entre a velocidade máxima de aumento de pressão e a concentração)	18
Figura 2.3 - Explosividade do pó de alumínio no reator (Relação entre a razão da pressão e a concentração)	19
Figura 2.4 - Efeito do tamanho da partícula no desenvolvimento da pressão de explosão do pó de carvão (Relação entre a velocidade máxima de aumento de pressão e o diâmetro da partícula)	20
Figura 2.5 - Efeito do tamanho da partícula no desenvolvimento da pressão de explosão do pó de carvão (Relação entre a pressão máxima e o diâmetro da partícula)	21
Figura 2.6 - Influência do diâmetro da partícula na concentração mínima de explosão do pó de carvão de Pittsburgh	23
Figura 2.7 - Relação entre o inverso da concentração mínima de explosão e o teor em voláteis.....	25
Figura 2.8 - Comparação entre a pressão de explosão dos pós de carvão betuminoso do polietileno e gás metano	27
Figura 2.9 - Efeito da energia de ignição na concentração mínima de explosão.....	30
Figura 2.10 - Evolução do número de acidentes de trabalho mortais em Portugal	38
Figura 2.11 - Número de acidentes fatais (parte esquerda) e acidentes de trabalho com mais de 3 dias de baixa (parte direita), por tipo de desvio	39
Figura 4.1 - CIREs – Estarreja (vista área)	43
Figura 4.2 - CIREs – Estarreja	44
Figura 4.3 - Complexo Químico de Estarreja – CQE	45
Figura 4.4 - Diagrama esquemático de secador por recirculação de calor	47
Figura 4.5 - Ciclo do processo de secagem por recirculação de calor.....	48
Figura 4.6 - Diagrama de produção do PVC de suspensão (s-PVC).....	52
Figura 4.7 - Diagrama de produção do PVC de suspensão (e-PVC).....	52
Figura 4.8 - Sinalização de atmosfera explosiva	60
Figura 4.9 - Marcação específica de proteção contra explosões	63
Figura 4.10 - Áreas consideradas em risco na envolvente do estabelecimento	67
Figura 4.11 - Organograma em situação de emergência	73
Figura 4.12 - Formação e treino operacional – CIREs (Estarreja).....	76
Figura 4.13 - Exercício no campo de treinos – CIREs (Estarreja)	77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Efeito das Explosões nas pessoas e nas estruturas	10
Tabela 2.2 - Concentrações limite inferiores de inflamação indicativas para suspensões de várias partículas correntes	28
Tabela 2.3 - Temperaturas de auto-inflamação indicativas para suspensões de várias partículas correntes	33
Tabela 2.4 - Classificação de poeiras baseada na natureza da combustão das poeiras	35
Tabela 2.5 - Categorias do índice <i>Kst</i>	36
Tabela 4.1 - Parâmetros básicos de operação do equipamento de secagem por recirculação de calor	49

SÍMBOLOS

- CME - Concentração mínima de explosão [$g \cdot m^{-3}$]
 d_c - Diâmetro médio da partícula [cm]
 H_r - Humidade relativa do ar [%]
 K_G - Índice de deflagração [$bar \cdot m \cdot s^{-1}$]
 K_{st} - Índice de deflagração [$bar \cdot m \cdot s^{-1}$]
 P - Pressão [bar]
 P_0 - Pressão inicial [bar]
 P_{max} - Pressão máxima de explosão [bar]
 S_u - Velocidade de queima [$cm \cdot s^{-1}$]
 t - Tempo [s]
 T_0 - Temperatura inicial [$^{\circ}C$]
 T_b - Temperatura máxima de explosão [$^{\circ}C$]
 V - Volume [m^3]
 VOL - Conteúdo de voláteis [% v/v]

SIGLAS

- ACT - Autoridade para as Condições de Trabalho
 ATEX - Atmosferas Explosivas
 ASTM - American Society for Testing and Materials
 EN - European Norm
 EU-OSHA - Agência Europeia para Segurança e Saúde do Trabalho
 IPR - Instalações Portuárias de Receção - Porto de Aveiro
 ISO - International Organization for Standardization
 LEL - Limite inferior de explosividade
 NFPA - National Fire Protection Association
 PVC - Policloreto de Vinilo
 SMPC - Serviço Municipal de Proteção Civil
 VCM - Cloreto de Vinilo Monómero

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

A secagem por recirculação de calor é amplamente utilizada na indústria química, farmacêutica, metalúrgica, plásticos, agroalimentar, entre outras, devido à necessidade de secar ou higienizar materiais. Quando na secagem de alguns dos materiais processados nestas indústrias se formam poeiras ou gases facilmente inflamáveis, existe risco de explosão, caso a atmosfera envolvente seja oxidante e possa haver produção de faíscas, descarga de eletricidade estática ou superfícies demasiado quentes.

Por isso as indústrias que processam produtos orgânicos que, em alguma das suas fases do processo de fabrico se possam apresentar na forma de pó, com granulometria inferior a 300 µm (*PROUST, 1996*) ou gerar gases, estão sob risco de explosões e, devem por isso, ser tomadas precauções adequadas, preferencialmente na fase de projeto, pois nessa altura as soluções são mais simples e económicas, de modo a assegurar o controlo dos parâmetros de risco e operacionalizar as medidas de mitigação.

Nas unidades em funcionamento, torna-se fundamental dispor do apoio de profissionais competentes, de modo a equacionar os problemas decorrentes de alterações nos processos de fabrico e adotar medidas para mitigar os riscos inerentes. Tanto num caso como no outro, o conhecimento da periculosidade dos materiais envolvidos nos processos de fabrico é de relevante importância para a segurança ocupacional e para a redução dos acidentes graves atribuídos à explosão de gases ou de poeiras.

Para que as explosões de poeiras ou gases ocorram é necessário que a relação entre a quantidade de material combustível e de material oxidante esteja num dado intervalo, em termos de concentração volúmica e que, certas condições físico-químicas sejam satisfeitas. Nos locais onde as poeiras se foram depositando ao longo de sucessivas jornadas de trabalho, por desleixo dos

operadores ou por razões do próprio procedimento laboral, podem acontecer sucessivas explosões, quase contínuas ou uma segunda explosão de grande dimensão, por ação do levantamento das poeiras depositadas, aquando da ocorrência da primeira explosão. Deste modo deve ser evitada a deposição de material pulverulento em estruturas, tubulações e locais de difícil visualização e limpeza, que possa ser colocado em suspensão, formando uma nuvem de poeira, que poderá provocar uma explosão numa atmosfera oxidante, se existir estímulos suficientes para provocar a ignição (ECKHOFF, 2003).

As chamas e a sobrepressão causadas pela explosão não são os únicos problemas a enfrentar. Na atmosfera envolvente à explosão ocorre uma deficiência de oxigénio e a formação de gases tóxicos em virtude da combustão, particularmente de monóxido de carbono. A concentração deste gás pode ser suficientemente alta para causar a inconsciência, ainda que momentânea às pessoas presentes, podendo levar até à sua morte.

Em suma, as questões de inflamabilidade e explosividade de gases ou poeiras na indústria têm um forte impacto económico, ambiental e social, exigindo a atenção das empresas e das instituições de investigação e desenvolvimento, no estudo das variáveis que influenciam a explosão e na adoção de medidas que ajudem a evitar e mitigar o efeito da explosão accidental. Igualmente as instituições de fiscalização das condições de segurança no trabalho devem monitorizar as empresas que estejam abrangidas pela regulamentação ATEX – Atmosferas Explosivas.

Tanto nos Estados Unidos da América (EUA), quanto na Europa, as empresas devem proporcionar um posto de trabalho seguro para os trabalhadores, cumprindo com diretivas específicas e procedimentos de boas práticas para a segurança e saúde no trabalho. Na Europa, a Agência Europeia para Segurança e Saúde do Trabalho (EU-OSHA), estabeleceu o Comité Europeu de Normalização, o qual tem produzido diversas normas para caracterização dos locais onde possam existir ATEX e para a classificação dos aparelhos e sistemas a usar nesses locais. Por parte da Comissão Europeia têm sido publicadas diversas diretivas relativas à segurança dos trabalhadores em locais ATEX e de classificação dos aparelhos a serem instalados e usados nesses locais.

Assim, é fundamental que as indústrias de processamento de materiais suscetíveis de gerar poeiras e gases potencialmente explosivos, estejam conscientes dos riscos e adotem as melhores práticas da indústria, seja através da aplicação da legislação e demais procedimentos, seja através da aplicação de normas específicas.

Tendo-se nos últimos anos verificado um aumento da produção de materiais micronizados em várias indústrias, como referem *CHEN et al. (2017)*; *DHIMAN e PRABHAKAR (2021)*; *MU et al. (2022)*, sendo requerido a secagem para o processamento subsequente, haverá claramente um aumento do risco de explosão, pelo que importa perceber o tipo e modo de funcionamento dos secadores industriais, para que se possa adotar medidas que evitem explosões durante o processo de secagem, já que normalmente a atmosfera usada é o ar.

A análise e conseqüente estudo de secadores que estiveram sujeitos a explosões, bem como a modelação numérica, contribuem para a melhoria e desenvolvimento da segurança destes equipamentos. Uma forma de mitigar acidentes com explosões e de, simultaneamente, melhorar a segurança na secagem por recirculação de calor, faz-se através da eliminação ou redução da concentração de oxigénio, usando para o efeito gases inertes, sendo o mais utilizado – o azoto. Assim, nos circuitos duplos de gás de secagem, na entrada e na saída das câmaras de secagem, é mantido um gás inerte com uma baixa pressão ($\leq 0,1$ MPa). Por outro lado, segundo *SILVEIRA (2017)*, a concentração de oxigénio, não deverá exceder os 7,0 % em volume

1.2. Objetivos de estudo

O objetivo principal deste trabalho é fazer a recolha e análise de informação sobre acidentes ou possíveis acidentes com explosão de secadores industriais e perceber quais os tipos de falhas que estiveram ou possam estar na origem e quais as medidas de prevenção e de mitigação que deveriam ter sido ou podem ser adotadas. Para que se possa perceber como evoluíram as medidas de segurança nos secadores industriais, serão descritos alguns dos principais

modelos de secadores, a legislação aplicável para a sua instalação e funcionamento e normas de certificação exigidas aos secadores colocados no mercado.

De modo a tentar perceber qual a realidade em Portugal e no Estrangeiro, serão discutidos alguns casos de secadores industriais instalados em algumas indústrias e quais as medidas de segurança implementadas.

1.3. Estrutura da dissertação

Por incomplexidade de abordagem, este trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos.

Na introdução faz-se o enquadramento geral do tema da dissertação, onde é referida a importância do tema e são definidos os objetivos do mesmo.

O segundo capítulo terá como conteúdo uma reflexão teórica, baseada em pesquisa da literatura existente sobre a temática de estudo da capacitação institucional e o planeamento de emergência.

No que concerne ao terceiro capítulo é dada ênfase à investigação documental, a partir de artigos em revistas científicas da especialidade, em trabalhos académicos (teses de doutoramento e dissertações de mestrado) e em notícias divulgadas pelos meios de comunicação.

No capítulo quatro é apresentado o caso de estudo da CIRES – Estarreja, que constitui a linha orientadora desta dissertação. É também apresentada a metodologia de análise, com enumeração dos procedimentos e métodos qualitativos de recolha de informação que permitiram obter os resultados alcançados. Importa ainda mencionar que a apresentação e discussão dos aspetos mais significativos deste estudo, aborda especificamente a perceção de agentes de proteção civil e empresas sobre a capacitação institucional, em particular no âmbito do Plano de Emergência de Estarreja.

Na conclusão procede-se a uma reflexão global sobre os resultados obtidos e são também apresentadas sugestões e propostas de trabalho futuro.

2. REVISÃO DOS CONCEITOS TEÓRICOS SOBRE EXPLOSÕES

2.1. Explosões

De acordo com *SICKLER* (1992), algumas das substâncias mais respeitadas, quando mal utilizadas, são sem dúvida os materiais energéticos. De uma maneira mais ampla, não será demais dizer-se que os materiais energéticos podem abranger tudo, nomeadamente desde os combustíveis até aos explosivos.

Desse modo, a libertação de energia de forma descontrolada, pode provocar um incêndio ou uma explosão.

A principal diferença entre incêndios e explosões, encontra-se precisamente na taxa de libertação de energia. Ou seja, os incêndios libertam energia de forma lenta, mas por outro lado, as explosões libertam a energia de forma abrupta, a uma velocidade subsónica ou supersónica e, frequentemente, num curto espaço de tempo, da ordem dos microssegundos.

Importa referir também que a energia libertada em forma de incêndio pode originar uma explosão, assim como explosões podem resultar em incêndios.

A explosão é uma expansão dos gases abrupta, resultando numa pressão que se move rapidamente, sob a forma de onda de choque, isto é, durante uma explosão o que acontece é que uma grande quantidade de energia é produzida e expande-se no espaço livre envolvente, levando à criação da onda de choque que se propaga em todas as direções.

Esta expansão pode ser de origem mecânica, por meio da rutura súbita de um recipiente pressurizado, ou pode ser também o resultado de uma reação química exotérmica. Esta reação provoca conseqüentemente um súbito aumento de volume e grande libertação de energia, geralmente acompanhado por altas temperaturas, produção de gases e forte estrondo, sendo que a produção de gases origina a onda de pressão em torno do local do incidente. No caso de ondas de pressão

subsónicas, obtém-se uma deflagração e, tratando-se de ondas de pressão supersónicas - ondas de choque - ocorre uma detonação. Em explosões que atinjam o regime da detonação, a onda de choque é a grande responsável por enormes danos, materiais e humanos, causados.

A teoria da detonação descrita por *LEWIS* e *VON ELBA* (1987), pode ser utilizada para se prever as propriedades da onda de choque e a pressão de pico.

Segundo *LEES* (1986) a pressão de pico para uma detonação, num confinamento, inicialmente à pressão atmosférica, poderá atingir cerca de 20 bar, ou seja, um aumento de cerca de 20 vezes mais, acima da pressão atmosférica.

Torna-se ainda relevante referir que a amplitude de uma explosão depende muito de fatores, tais como:

- A temperatura;
- A pressão do ambiente;
- A composição da substância e as propriedades físicas;
- O tipo e a duração da energia de ativação;
- O espaço envolvente (confinado ou aberto);
- A quantidade e a escala em que a substância é libertada.

Segundo *AMYOTTE* e *ECKHOFF* (2010), uma explosão de poeiras pode ser desencadeada, quando partículas inflamáveis suspensas no ar encontram fontes de ignição com energia suficiente.

As poeiras podem ser consideradas materiais combustíveis, em formas finamente divididas. As poeiras combustíveis podem ser encontradas na forma de subproduto em várias indústrias: na indústria de mineração de carvão; na indústria da madeira; na indústria de cortiça; na indústria de produção de policloreto de vinilo ou na forma de matérias-primas ou produtos intermediários, como o açúcar em pó e os cereais em pó.

As explosões de poeiras, originam altas temperaturas e sobrepressões, podendo ainda ser produzidos gases tóxicos e reações químicas violentas. Nesse sentido, as explosões de poeiras, representam ameaças significativas para pessoas, bens e meio ambiente.

Para que se entenda a intensidade do fenómeno, uma explosão de poeira ocorrida numa mina de carvão na província de Liaoning, na China, em 1942, causou 1594 mortos e 246 feridos, sendo considerado, até ao momento, o maior acidente do tipo, conhecido na história.

De forma a mitigar acidentes com explosões de poeiras, foram realizados vários estudos sobre os efeitos da distribuição, do tamanho e da concentração de vários tipos de partículas que originaram explosões de poeiras, bem como estabelecidas várias medidas de segurança, com o objetivo de eliminar os fatores essenciais anteriores ou reduzir os danos causados.

Como exemplo, temos a alteração da composição de uma poeira quando misturada com sólidos inertes, recomendada por *AMYOTTE et al.* (2009), com o objetivo de reduzir a sua reatividade. Da mesma forma, uma limpeza eficaz dos depósitos, nomeadamente no exterior, também pode ser considerado um método bastante eficaz para diminuir a probabilidade de explosões e os seus potenciais danos, devido à eliminação da quantidade acumulada de poeira combustível em áreas de alto risco, tal como refere *KHAKZAD et al.* (2012).

Para análise de risco de explosão de poeira são propostos alguns modelos, designadamente o “gravata-borboleta” - Bow-tie, por *YUAN et al.* (2013, 2015)

Em termos de estudos experimentais todas as metodologias de ensaio passam pela identificação de perigos, o que requer um amplo conhecimento dos mecanismos de explosão de poeiras e dos locais onde possam ocorrer.

Por outro lado, o estudo e a investigação de acidentes anteriores, pode ajudar na identificação de fatores frequentemente perigosos, bem como a análise de unidades mais vulneráveis em vários setores, que depois de monitorizadas, contribuirão para se evitar explosões de poeiras.

Torna-se relevante referir que, ao longo do tempo existem dados relevantes sobre acidentes com explosões de poeiras, podendo esses registos ser encontrados em relatórios de acidentes, literatura científica, relatórios de agências profissionais e meios de comunicação social.

Uma explosão é descrita como uma reação de oxidação de uma atmosfera explosiva caracterizada por uma libertação rápida e abrupta de energia, manifestada por um aumento significativo de temperatura e pressão, resultante de uma intensa

radiação térmica e libertação de gases. Se a atmosfera explosiva não estiver confinada essa reação só produzirá um incêndio localizado. Mas, se a atmosfera explosiva estiver confinada, mesmo que parcialmente, a energia libertada pela reação pode originar um desenvolvimento rápido de pressão, que pode resultar numa explosão. Dependendo da velocidade de propagação da frente de chama resultante, a reação pode ser subsónica ou supersónica, correspondendo assim a uma deflagração ou detonação, respetivamente. Importa referir que, a maioria das explosões de poeiras resultam em deflagrações.

Neste contexto, é considerada ATEX, uma atmosfera suscetível de se tornar explosiva em consequência de condições locais e operacionais e considera-se 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 saúde dos trabalhadores.

Segundo *GLASSMAN* (1996), uma explosão é uma libertação rápida e abrupta de energia, podendo resultar numa deflagração ou numa detonação, dependendo da velocidade de reação e consoante a velocidade de propagação da frente de chama resultante, seja subsónica ou supersónica. A energia libertada durante a explosão aumenta a temperatura do sistema tão rapidamente que existe um aumento proporcional da pressão do sistema (*HERTZBERG e CASHDOLLAR*, 1987). Como nas explosões o ar é o meio oxidante e, este é constituído essencialmente por azoto, a variação do número de moles de gás durante a explosão é pequena. Desta forma, numa primeira aproximação, a reação de explosão num sistema fechado pode ser interpretada em termos da lei dos gases perfeitos. Assim, considerando o processo de explosão isocórico (a volume constante), temos

$$\frac{P_{m\acute{a}x}}{P_0} = \frac{T_b}{T_0} \quad (2.1)$$

onde, T_0 e P_0 são a temperatura e pressão iniciais do sistema e T_b e $P_{m\acute{a}x}$ a temperatura e pressão máximas de explosão. O conhecimento de alguns dos parâmetros de explosão associados à deflagração do pó, torna-se importante na

qualificação do perigo de explosão. De acordo com *BARTKNECHT* (1981); *NAGY* e *VERAKIS* (1983), os parâmetros que mais interessam conhecer, são os seguintes:

- Pressão máxima de explosão;
- Velocidade máxima de aumento de pressão;
- Concentração mínima de explosão;
- Energia mínima de ignição;
- Temperatura mínima de ignição.

Segundo as investigações de autores consagrados, *HERTZBERG, et al*, (1986); *CASHDOLLAR* e *CHATRATHI* (1992) e *DAHOE et al.* (2001) e as recomendações das normas ASTM 1226:2019, ISO 6184-1:1985, EN 14034-1:2004+A1:2011 e EN 13094:2020, os valores reais dos parâmetros de explosão são obtidos mediante ensaios realizados num reator de explosão cilíndrico com um volume de 1 m³. No entanto, os ensaios podem ser efetuados de uma forma mais fácil e rápida num reator com o volume de 20 L, esférico ou aproximadamente esférico, obtendo-se valores úteis dos parâmetros de explosão.

2.2. Explosão de gases

De acordo com *BROWN* (2011), as propriedades observáveis comuns a todos os gases são: a expansão dos gases, que preenche todo o volume de um recipiente; a densidade, que é inferior à dos sólidos ou dos líquidos e varia dependendo das condições; e a miscibilidade, em que os gases se misturam espontaneamente uns com os outros e alteram o seu volume drasticamente, com a mudança de temperatura.

A oxidação inicia-se quando uma fonte de energia ativa está presente numa atmosfera explosiva, levando à quebra das ligações das moléculas afetadas, provocando a sua decomposição e a conseqüente libertação de energia, propagando o efeito às moléculas adjacentes, instigando o efeito de “reação em

cadeia”, originando também uma sobrepressão, provocada pelo aumento brusco da quantidade de gases, causando assim a “onda de choque”, com propagação radial e centrífuga, decrescendo a sua velocidade a partir do ponto de ignição. Estas explosões são classificadas em ondas subsónicas (deflagração), e ondas supersónicas (detonação).

Devido às altas pressões desenvolvidas, as detonações são muito mais destrutivas que as deflagrações e os seus efeitos dividem-se em: fisiológicos (ao nível de olhos, tímpanos, pulmões, coração, etc.), térmicos (aumento de temperatura provocado pela libertação de energia) e mecânicos (projeções de materiais, por arrastamento ou por destruição). Podemos ainda observar os efeitos das explosões nas pessoas e nas estruturas, de acordo com a Tabela 2.1

Tabela 2.1 - Efeito das Explosões nas pessoas e nas estruturas

(Adaptado de Zipf JR. et al., NIOSH-125)

Efeito das Explosões nas pessoas e nas estruturas	
Pessoas	
Sobrepressão (bar)	Efeitos
0,35	Limite - rotura dos tímpanos
0,70 - 0,85	Limite - danos nos pulmões
1,05 - 1,40	Rotura dos tímpanos - 50% dos casos
2,11 - 2,95	Limite - mortal
2,95 - 4,00	Morte - 50% dos casos
4,00 - 5,00	Morte - 100% dos casos
Estruturas	
Sobrepressão (bar)	Efeitos
< 0,07	Quebra de vidros
0,07 - 0,15	Destruição de cobertura - naves industriais
0,17 - 0,25	Remoção de batentes
0,20 - 0,30	Esmagamento de tanques
0,35 - 0,50	Rotura de estruturas de madeira
0,60 - 0,90	Destruição de edificações
0,70 - 2,00	Rotura de estruturas de betão

As frentes de pressão, produzidas por detonações e deflagrações são tipicamente diferentes.

Se por um lado, a detonação produz uma frente de choque, com um aumento abrupto de pressão máxima superior a 10 bar e uma duração total menor do que 1 milissegundo a uma velocidade de 2 000 m/s, já a deflagração tem uma frente de pressão mais longa (vários milissegundos de duração), plana (sem uma frente de choque brusca), a velocidade da chama propaga-se a 1 m/s, chegando a atingir de 500 - 1 000 m/s, dependendo da pressão máxima, na ordem de 1 ou 2 bar (CROWL e LOUVAR, 2001).

Uma explosão origina habitualmente uma bola de fogo, cerca de 8 vezes maior do que o volume que a originou.

Para se prever o efeito das deflagrações de uma determinada matéria - gás ou poeira - realizam-se habitualmente ensaios em laboratório de ambiente controlado (volume característico de aproximadamente 0,020 m³), evitando assim a realização em grande escala. A taxa máxima do aumento de pressão encontrada, designa-se por K_G ou K_{ST} e pode ser determinado pela seguinte equação:

$$\left(\frac{dP}{dt}\right)_{max} \left(V^{\frac{1}{3}}\right) = K \quad (2.2)$$

onde,

P – pressão [bar];
 t – tempo [s];
 V – volume [m³].

K = índice K_{ST} (st deriva do alemão *staub* – poeira – ou K_G) [bar.m.s⁻¹]

Um valor de K_G para um gás inflamável pode ser estimado, através de um outro gás, dado pela seguinte fórmula:

$$(K_G)_2 = (K_G)_1 \cdot \frac{(S_u)_2}{(S_u)_1} \quad (2.3)$$

onde,

K_G – índice de deflagração [bar.m.s⁻¹];
 S_u – velocidade da queima [cm.s⁻¹].

2.3. Explosão de poeiras

Os parâmetros essenciais que caracterizam as poeiras são:

- A composição química das partículas e do ambiente em que se encontram;
- A concentração das partículas e o seu tamanho médio;
- A forma geométrica das partículas;
- A razão entre a sua superfície e volume.

O fenómeno “explosões de poeiras” é descrito por *ECKHOFF* (2003), como sendo bastante simples e de fácil compreensão. Assim, qualquer material sólido inflamável no ar, arderá com uma violência e velocidade que se incrementará com o aumento do grau de subdivisão de material.

As indústrias onde, em que no seu processo produtivo, o manuseamento de produtos, pode provocar nuvens de poeira combustíveis capazes de causar uma explosão, tais como as indústrias químicas, alimentar, têxteis, papel, pesticidas, etc., devem ter especial atenção quando uma massa de material inflamável sólida é aquecida e arde lentamente, devido à área limitada da superfície do material exposto ao oxigénio, contido no ar.

A energia produzida é libertada gradualmente e de forma inofensiva, porque é dissipada tão rapidamente quanto se produz.

No entanto, o resultado é bastante diferente quando a mesma massa de material se encontra moída num pó muito fino (partículas $<500 \mu\text{m}$) e misturada intimamente com o ar, sob a forma de nuvem de pó.

Nestas condições, a área da superfície exposta ao ar é muito maior e ao ocorrer a ativação efetiva, a totalidade do material oxidar-se-á rapidamente e a energia da massa, que no caso anterior se libertará gradualmente e de forma inofensiva, é agora libertada abruptamente e com o desenvolvimento de grandes quantidades de calor.

Apesar de uma mistura de pó inflamável com o ar poder oxidar com uma violência explosiva, só algumas das misturas o originarão, isto porque existe uma gama de concentrações de pó e de ar dentro da qual a mistura pode explodir. Nesse

sentido, as misturas que se encontrem entre os 30 - 60 [g/m³] (nível inferior) e os 2 - 6 [kg/m³] (nível superior), terão a capacidade para explodir (*ECKHOFF*, 2003).

A menor concentração de pó suscetível de explodir é referida como sendo o limite inferior de explosividade e a concentração acima da qual uma explosão não terá lugar, é mencionada como sendo o limite superior de explosividade.

Os limites inferiores de explosividade de muitos materiais têm sido medidos e variam entre os 10 g/m³ e os 500 g/m³. Contudo, maioritariamente com base em algumas experiências práticas, pode assumir-se que, 30 g/m³ é o limite inferior de explosividade para a maioria das poeiras inflamáveis (*ECKHOFF*, 2003).

Embora aparente ser uma concentração muito baixa, uma nuvem de poeira com tal concentração, tem a visibilidade de um dia de nevoeiro muito denso.

Por outro lado, os limites superiores de explosividade não estão bem definidos e têm fraca reprodutibilidade sob condições de ensaio laboratorial, uma vez que o limite de explosividade superior é, na realidade, de pouca importância prática. Por conseguinte, os dados para este parâmetro encontram-se muito raramente.

Imorta referir que, a humidade contida nas partículas de pó, torna-se outro dos fatores que obriga à necessidade do aumento da temperatura de ignição (absorção de energia para a vaporização da água). Existe uma relação direta entre o teor de humidade e a energia mínima necessária para a ignição.

Em termos de humidade relativa do ar (Hr), ambientes com teores abaixo de 70 %, representam um aumento do risco na ocorrência de explosões e, para valores inferiores a 30 %, verifica-se uma situação consideravelmente ainda mais crítica.

Nas atmosferas explosivas de poeiras combustíveis, as explosões mais violentas são as produzidas quando a proporção de oxigénio presente se aproxima daquela que seria necessário para uma combustão completa.

A amplitude de concentração de uma nuvem de pó, não depende da composição química do pó e os seus limites variam de acordo com o tamanho e a forma das partículas existentes na nuvem de pó.

Uma nuvem de mistura do pó e ar, que esteja dentro da gama de inflamabilidade, adquire capacidade para explodir. No entanto, esta só explodirá quando inflamada através de uma fonte de ignição ativa. A forma de ignição de uma

nuvem de poeira, é tipicamente uma superfície quente - faísca elétrica ou de atrito gerada mecanicamente - neste caso a chama irá propagar-se ao longo de toda a nuvem.

A Figura 2.1 mostra o hexágono das variáveis relacionadas com a explosão de poeiras, composto por poeiras combustíveis, oxigénio, a mistura antes da explosão, os limites de explosividade, o confinamento e a energia de ativação.



Figura 2.1 – Hexágono da explosão de poeiras

(Adaptado de Semenova, 2005)

Importa referir que as poeiras explosivas além de carecerem dos três atributos respeitantes ao já conhecido triângulo do fogo representado pelo combustível, oxigénio e fonte de ignição, requerem também do confinamento, da nuvem de poeiras e de se enquadrarem nos limites de explosividade para se tornarem explosivas, formando o mencionado hexágono de explosão.

Alguns dos ambientes comuns desse tipo de risco são encontrados em depósitos, silos, minas, processamento de têxteis, processos químicos, fundição, para além de outros ambientes também geradores de poeiras explosivas.

Muito embora o fenómeno de explosão de poeiras utilize alguns dos parâmetros usados para estudar as explosões de gases, existem, em termos de conceção de padrões de segurança, duas diferenças básicas entre as poeiras e os gases.

A primeira está relacionada com a geração e manutenção de nuvens de poeiras e nuvens pré-misturadas de gás/vapor, que são substancialmente diferentes. Em situações onde as nuvens acidentais de gás explosivo podem ocorrer, será altamente improvável a geração de nuvens de poeiras explosivas.

A segunda diferença está no facto de, ao contrário da propagação de chama com gás pré-misturado, a propagação de chama nas misturas poeira/ar não se limitam apenas à faixa de concentração de poeiras inflamáveis. O estado de depósitos estagnados de poeiras oferece uma possibilidade discreta e adicional de propagação de chamas.

Quando se pretende avaliar o risco de explosão de poeiras é necessário quantificar vários parâmetros considerados relevantes, tais como:

- O tamanho das partículas;
- A concentração de poeiras;
- A concentração de oxidante;
- A temperatura mínima de ignição;
- A turbulência da nuvem de poeiras;
- A taxa máxima de aumento de pressão;
- A concentração de poeiras inerte misturada;
- A presença de gases inflamáveis;
- A energia mínima de ignição;
- A velocidade de propagação de chama;
- A pressão máxima de explosão;
- A humidade das poeiras e do ar.

Para a caracterização da explosão de poeiras, existem ensaios padronizados que procuram dar respostas permitindo estimar os riscos nas operações onde as poeiras são geradas ou manipuladas, nomeadamente operações de redução de tamanho, transporte pneumático, ciclones, filtros, precipitadores eletrostáticos, secadores e armazenamento de materiais finos.

De entre as indústrias mais propensas à ocorrência de explosão de poeiras destacam-se as de processamento e armazenamento de madeira; processamento e

armazenamento de cereais em silos; produção de rações e farinhas; produção e armazenamento de metais, como alumínio e magnésio; produção química; produção de plástico; produção de amido ou doce; produção e armazenamento de açúcar e cacau em especiarias; processamento de carvão e produção de produtos farmacêuticos.

Das fontes de ignição mais comuns como causadoras dos acidentes com poeiras salientam-se, o aquecimento por lâmpadas, a eletricidade estática, as operações de soldadura, a fricção em ações de mistura ou de limpeza e a presença de veículos.

Nos locais próximos das zonas de processamento, a existência de cantos recônditos no interior dos equipamentos e tetos falsos, são zonas propensas a explosão de poeiras.

2.4. Limites de explosividade

A explosividade de um pó é normalmente caracterizada pela sua pressão máxima de explosão P_{max} , pela velocidade máxima de aumento de pressão $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{max}$ e pela concentração mínima de explosão C_{min} . Estes parâmetros de explosão são obtidos a partir de ensaios de explosão realizados em reatores fechados sob uma vasta gama de concentrações, com a fonte de ignição colocada no centro do reator. A utilidade prática do conhecimento do valor da pressão máxima de explosão de um dado pó, prende-se com a conceção de sistemas onde se manuseiam pós explosivos ou de bombas de ensaio de pressão ou explosão, enquanto que o valor da velocidade máxima de aumento de pressão, tem a ver com o projecto e a construção de sistemas, bem como aberturas para alívio de sobrepresão (AMYOTTE *et al.*, 1989).

Uma das relações mais utilizadas para descrever a velocidade máxima de aumento de pressão é a chamada “Lei Cúbica” que deriva da equação (2.1) onde K_{St}

é o índice de deflagração introduzido por *BARTKNECHT* (1981) e citado por *ECKHOFF* (2003),

$$\left(\frac{dP}{dt}\right)_{max} V_0^{1/3} = 4,84 \left(\frac{P_{max}}{P_0} - 1\right) P_{max} S_u = K_{st} \quad (2.4)$$

que sustenta o comportamento experimental de uma variedade de pós em reservatórios de volume desde os 0,04 m³. O índice de deflagração (*bar.m.s⁻¹*), sendo numericamente identificado como $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{max}$ no reservatório de 1 m³ de capacidade, é denotado como sendo a constante específica do pó.

A “Lei Cúbica” só é válida para reatores geometricamente similares, se a espessura de chama for desprezável, quando comparada com o raio do reator e se a velocidade de queima, como função da pressão e temperatura, for idêntica em todos os reatores (*ECKHOFF*, 2003).

O valor do índice de deflagração *Kst*, tem sido empregue para correlacionar resultados entre vários reatores e também para estender os resultados laboratoriais a situações industriais (*PU et al.*, 1988). Assim, o termo “Lei” é questionável, na medida que implica considerar este fator como uma propriedade do pó, o que não é verdade, uma vez que o seu valor depende das características do ensaio associado ao equipamento com que é obtido, nomeadamente no que diz respeito ao nível de turbulência inicial da nuvem de pó. Quando se pretende usar valores de *Kst* para projetar sistemas de alívio de sobrepressão, segundo *ECKHOFF* (2003), torna-se fundamental usar apenas valores de *Kst* obtidos por ensaios conduzidos com o nível de turbulência padrão definido pelos métodos *standard*, ASTM 1226:2019, ISO 6184-1:1985, EN 14034-1:2004+A1:2011 e EN 13094:2020.

Várias investigações sistemáticas realizadas com numerosos pós combustíveis, em reatores de explosão cilíndricos, permitem concluir que o aumento do volume do reator conduz a valores de *Kst* próximos dos valores reais que se conseguem medir com um reator esférico, de 1 m³ de capacidade. De acordo com *BARTKNECHT* (1981) existirá um valor mínimo de volume para que um pó combustível desenvolva a sua velocidade de reação total e indica o valor de 16 L, como o volume mínimo necessário para assegurar valores dos parâmetros de explosão correlacionáveis com os medidos nos reatores esféricos de 1 m³.

A Figura 2.2 espelha a velocidade de aumento de pressão normalizada em relação ao volume do reator $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{max} V_0^{1/3}$, com a concentração e a Figura 2.3 reflete um exemplo típico da evolução da razão de pressão, definida como a pressão absoluta de explosão normalizada em relação à pressão inicial do reator. Não se observa desenvolvimento de pressão, e, portanto, explosão, para concentrações de pó abaixo de um dado valor. Esta concentração é a concentração mínima de explosão, que neste caso é de cerca de 30 g/m³. A pressão máxima de explosão e a velocidade máxima de aumento de pressão correspondem aos picos das curvas correspondentes e são os parâmetros normalmente usados como indicadores de violência ou gravidade de uma explosão (AMYOTTE *et al.*, 1989). Como mostra a equação (2.3) a força impulsionadora da velocidade máxima de aumento de pressão é a velocidade fundamental de queima S_u . Qualquer variação na velocidade de queima afecta o desenvolvimento da pressão e, portanto, o valor de $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{max}$ durante uma deflagração confinada.

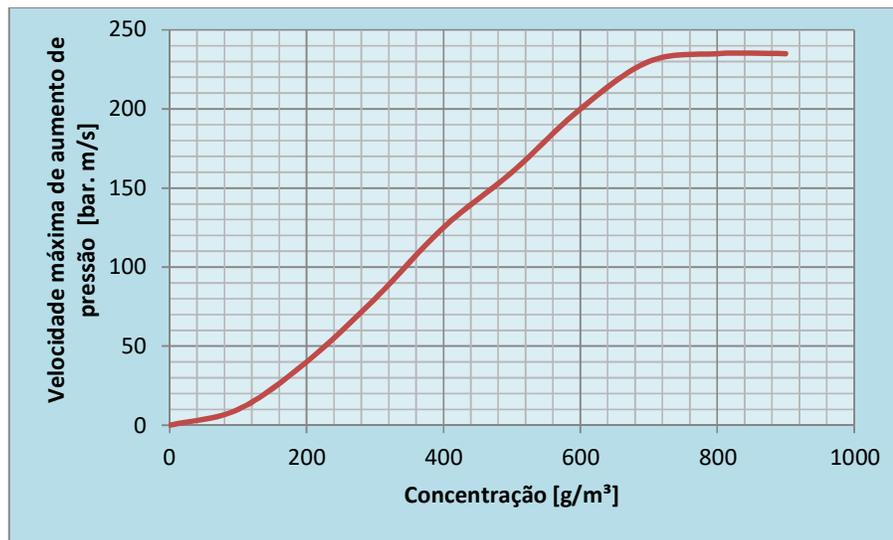


Figura 2.2 - Explosividade do pó de alumínio no reator
 (Relação entre a velocidade máxima de aumento de pressão $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{max} V_0^{1/3}$ e a concentração)

(Adaptado de Cashdollar, 1994)

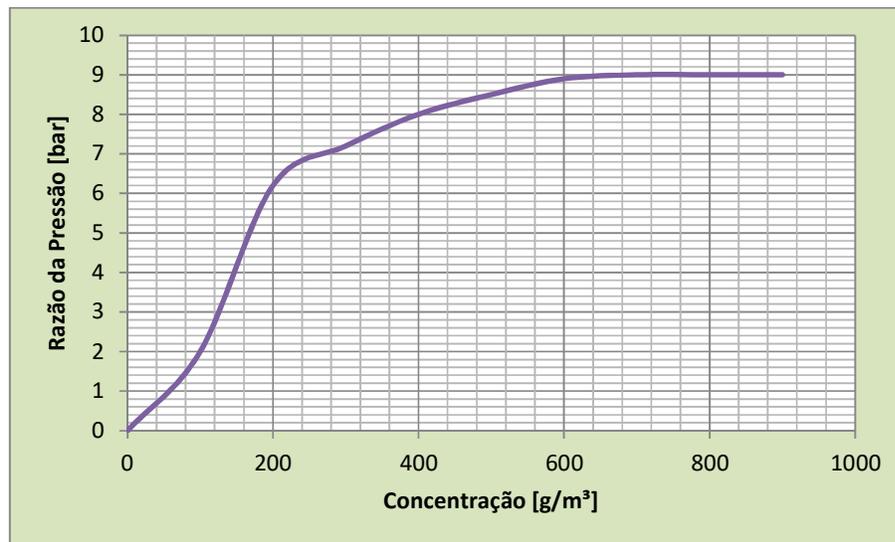


Figura 2.3 - Explosividade do pó de alumínio no reator (Relação entre a razão da pressão e a concentração)

(Adaptado de Cashdollar, 1994)

2.5. Causas físicas para a explosão

No que concerne às propriedades físicas, que influenciam o processo da explosão de suspensões de partículas, com importante expressividade, distingue-se a granulometria e a concentração mínima de explosividade.

2.5.1. Granulometria da poeira

Uma das características do pó que afeta o desenvolvimento da pressão de explosão é o tamanho da partícula. Normalmente, os pós mais finos são mais explosivos que os mais grossos (*BARTKNECHT*, 1981). Sendo assim, quando o comportamento explosivo de pós está a ser estudado é importante realizar os ensaios com partículas de dimensões inferiores a 40 μm , a fim de se obterem os valores máximos dos dados de explosão. Em certas circunstâncias, as limitações práticas poderão condicionar a disponibilidade de baixas granulometrias.

Como se pode observar nas Figuras 2.4 e 2.5, o tamanho da partícula tem uma influência marcante na violência da explosão (detetável pelo comportamento da velocidade máxima de aumento de pressão) e uma influência menos pronunciada na pressão de explosão. Este comportamento deve-se ao facto de o processo de combustão dos combustíveis sólidos, tais como resíduos lenhosos, carvões e plásticos, ser precedido pela desvolatilização das partículas.

O grau de desvolatilização e a velocidade de desvolatilização das partículas diminuem com o aumento do seu diâmetro. Para partículas de grandes dimensões a frente de chama é alimentada apenas pelas suas arestas agudas e regiões superficiais, sendo a menor contribuição de voláteis provenientes de cada partícula, em parte, compensada pelo aumento da área superficial. Como resultado, a alteração da concentração em fase gasosa é pequena, o que se traduz numa lenta e progressiva diminuição da pressão máxima de explosão, com o aumento do tamanho das partículas.

A pressão de explosão cai drasticamente quando o tamanho da partícula atinge valores “elevados” (Figura 2.5) para os quais não é possível gerar, em fase gasosa, a concentração mínima de explosão no intervalo de tempo disponível para a passagem da frente de chama (CASHDOLLAR, 1994; CASHDOLLAR, 1998).

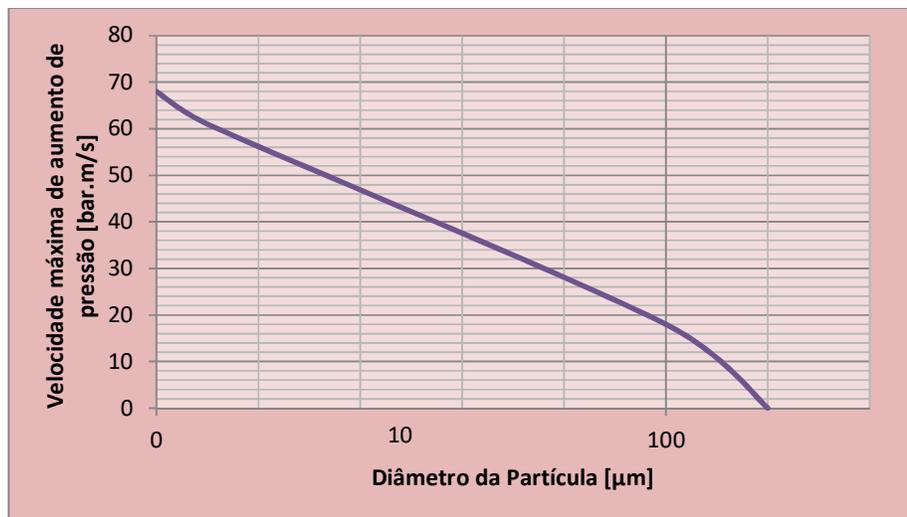


Figura 2.4 - Efeito do tamanho da partícula no desenvolvimento da pressão de explosão do pó de carvão (Relação entre a velocidade máxima de aumento de pressão $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{max} V_0^{1/3}$ e o diâmetro da partícula)

(Adaptado de Cashdollar, 1996)

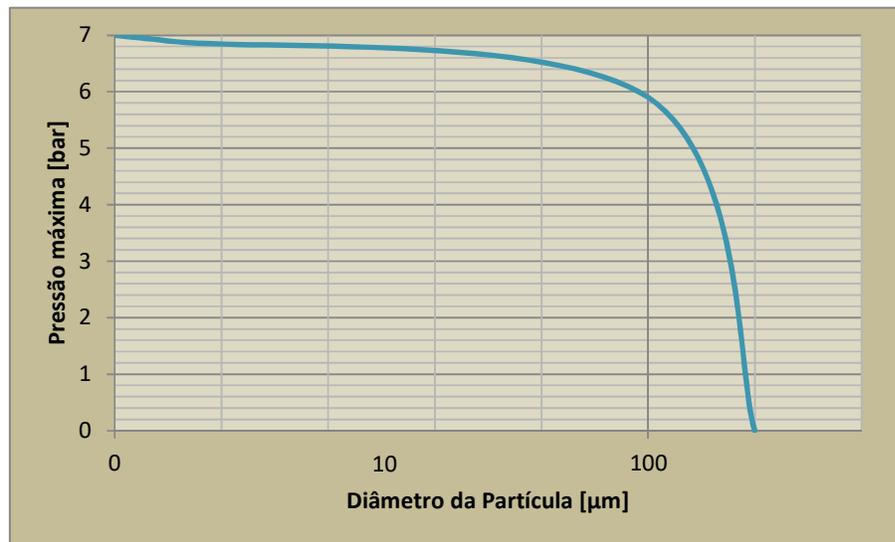


Figura 2.5 - Efeito do tamanho da partícula no desenvolvimento da pressão de explosão do pó de carvão (Relação entre a pressão máxima e o diâmetro da partícula)

(Adaptado de Cashdollar, 1996)

A diminuição da velocidade de desvolatilização é responsável pela acentuada diminuição da velocidade de aumento de pressão, com o aumento do tamanho da partícula. A fração de matéria não desvolatilizada aumenta com o aumento do tamanho das partículas e esta funciona como um absorvedor de parte da energia proveniente da frente de chama, o que reduz o fluxo efetivo de energia que alimenta a onda de desvolatilização. Esta redução provoca uma acentuada diminuição da velocidade fundamental de queima de que depende a violência da explosão.

2.5.2. Concentração mínima de explosividade

Uma nuvem de pó explode, quando a concentração se encontra entre os seguintes limites:

- 50-100 g/m³, correspondendo a uma baixa concentração;
- 2-3 kg/m³, equipolente a uma concentração máxima.

Na maioria dos pós, contrariamente aos gases, não é possível determinar um valor para o limite superior

Segundo, *HERTZBERG et al.*, (1987), em fase gasosa, a concentração estequiométrica de voláteis, oriundos de uma fase sólida de combustíveis, para a propagação de chama pela mistura, deve ser gerada de modo rápido, antes que mais voláteis sejam produzidos. Assim, tal circunstância indica que o limite inferior de concentração é determinado pela quantidade mínima de partículas combustíveis que existem de forma a gerar, em fase gasosa, uma mistura capaz de manter a combustão.

Por outro lado, o limite superior de concentração é sentenciado pela quantidade mínima de oxigénio, necessário para que ocorra a explosão.

De acordo com a citação de *ENOMOTO e MATSUDA (1986)*, *ISHIHAMA*, com o objetivo de estimar a concentração mínima para a ocorrência da explosão de carvões, desenvolveu a seguinte equação:

$$CME = 2 \times 10^6 d_c^{2,5} + 4,4 \times 10^6 VOL^{-3,5} + 15 \quad (2.5)$$

onde,

CME – concentração mínima de explosão [$g \cdot m^{-3}$];

d_c – diâmetro médio da partícula [cm];

VOL – conteúdo de voláteis [% v/v];

Como podemos observar através da equação acima, enquanto o diâmetro da partícula diminui, a relevância do primeiro termo também diminui. Assim, a concentração mínima de explosão revela-se independente do diâmetro da partícula para valores inferiores a 50 μm .

Importa ainda mencionar que, a influência do diâmetro da partícula no valor da concentração mínima de explosão assume, usualmente, um comportamento como o refletido no gráfico da Figura 2.6.

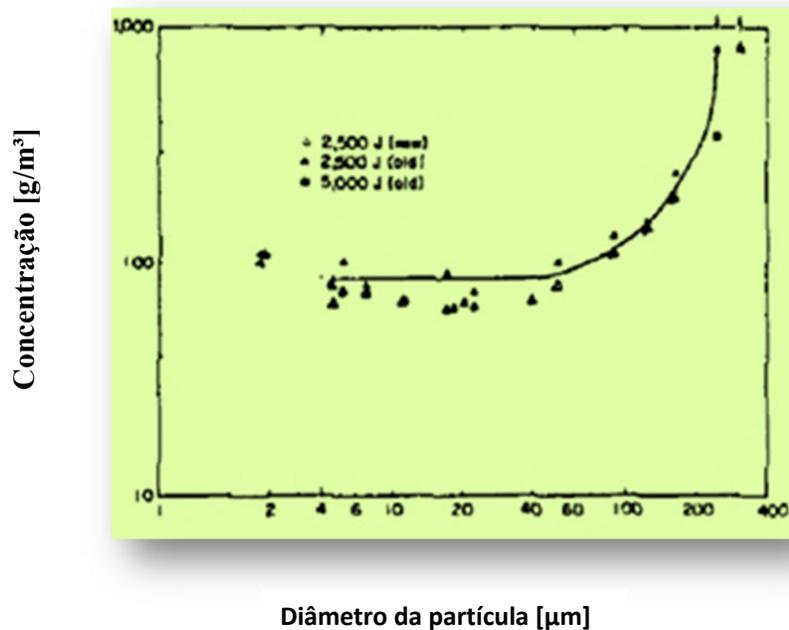


Figura 2.6 - Influência do diâmetro da partícula na concentração mínima de explosão do pó de carvão de Pittsburgh.

(Hertzberg, e Zlochower, 1990)

Observando o mencionado gráfico, podemos facilmente concluir que, para partículas de pó de carvão com um diâmetro até cerca de 50 μm, a concentração mínima de explosão para as partículas finas, não depende do diâmetro da partícula. Ao passo que as partículas vão aumentando de tamanho, verifica-se, acima desse diâmetro - diâmetro característico - uma dependência da concentração mínima de explosão relativamente ao valor do diâmetro. Desta forma, o valor da concentração mínima de explosão eleva-se rapidamente com o aumento do diâmetro da partícula, até se atingir um diâmetro crítico, acima do qual o pó torna-se, basicamente não explosivo.

Importa assim evidenciar estes dois diâmetros de partículas: o diâmetro característico, acima do qual passa a haver uma dependência da concentração mínima de explosão com o tamanho das partículas e o diâmetro crítico, que é a dimensão de partículas acima da qual, deixa de ocorrer explosão, qualquer que seja a concentração de pó utilizada. De acordo com o estudo desenvolvido por *HERTZBERG* e *ZLOCHOWER* (1990), os pós de polimetilmetacrilato e de carvão betuminoso de Pittsburgh, atingiram valores de diâmetros característicos de 100 μm

e 50 μm , respetivamente. Por outro lado, *CASHDOLLAR* (1994), refere diâmetros característicos na ordem dos 20 μm e 15 μm , para os pós de alumínio e ferro, de modo respetivo.

O comportamento constatado, tem a ver com o mecanismo de propagação de chama que, para muitos pós se deve à combustão, em fase gasosa, dos voláteis emitidos pelas partículas aquecidas até ao ponto de desvolatilização ou de pirólise, sendo a queima do resíduo carbonoso de somenos importância para os intervalos de tempo característicos das explosões de pós (*CASHDOLLAR et al.*, 1988); (*HERTZBERG e ZLOCHOWER*, 1990).

Contudo, existem alguns pós em que a propagação de chama se processa através da oxidação direta na superfície das partículas, como é o caso dos metais (*HERTZBERG et al.*, 1992).

Ainda na observação da Figura 2.6, a reta que antecede a curva e que culmina com o valor do diâmetro característico, deve-se à completa desvolatilização das partículas finas. Portanto, são os voláteis combustíveis totais, provenientes das partículas finas e a reação dos hidrocarbonetos desvolatilizados, queimando homogeneamente na fase gasosa, que determinam a concentração mínima de explosão. O aumento exponencial da curva, que ocorre a partir do diâmetro característico, verifica-se devido ao facto de as partículas se tornarem demasiado grandes para que o processo de desvolatilização se complete na zona da frente de chama, passando o processo a ser controlado pela velocidade de desvolatilização. Dado que para as partículas maiores, apenas a superfície das partículas sofre desvolatilização com a passagem da frente de chama, torna-se essencial fornecer uma maior massa de pó, com a finalidade de gerar a concentração mínima de voláteis combustíveis na fase gasosa.

Nos ensaios realizados por *HERTZBERG e ZLOCHOWER* (1990), foi medida a perda de massa de partículas de carvão durante a sua exposição, a um fluxo de laser de 200 W/cm^2 e verificou-se que a perda de massa aumenta em função do tempo de exposição, até se atingir o conteúdo máximo de voláteis. As micrografias tiradas às partículas, para diferentes tempos de exposição, confirmam que o processo de pirólise, prossegue na forma de uma onda de desvolatilização, que

começa no topo da superfície exposta e que se propaga através da partícula, até se obter um resíduo de carvão totalmente desvolatilizado.

De outra forma, *CASHDOLLAR et al.*, (1988), através de ensaios realizados no reator semi-esférico de 20 L, usando energias de ignição de 2500 J, mediram a concentração mínima de explosão de vários carvões - gilsonite - e várias misturas de polietileno e grafite, em ar. Realizaram ainda medições quanto ao conteúdo de voláteis destes materiais, usando o método da pirólise por laser e concluíram que, quanto maior era o teor em voláteis, menor era o valor da concentração mínima de explosão do pó. Curiosamente, *HERTZBERG et al.*, (1992), num outro trabalho, onde estudaram a explosividade de pós explosivos habitualmente empregues no fabrico de munições militares, chegaram precisamente à mesma conclusão.

Com a obtenção destes resultados, confirmou-se que o mecanismo de propagação de chama assumido para a explosão de pós combustíveis, ficou a dever-se à combustão homogénea dos voláteis em fase gasosa. Assim, como se pode observar na Figura 2.7, constata-se que existe uma relação linear entre o inverso da concentração mínima de explosão e o teor em voláteis

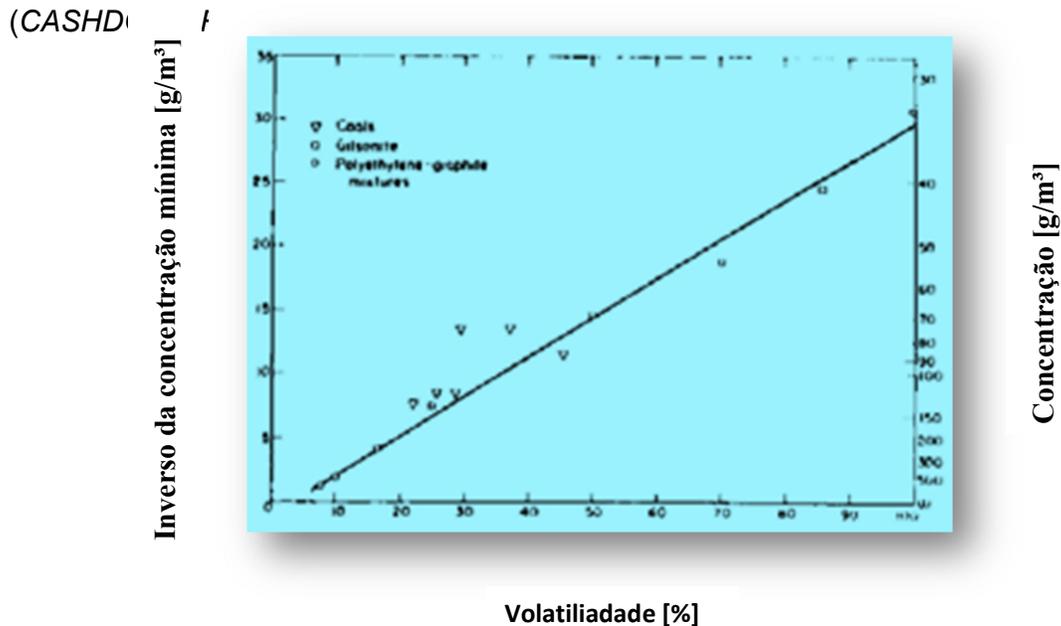


Figura 2.7 - Relação entre o inverso da concentração mínima de explosão e o teor em voláteis

(Cashdollar et al., 1988)

2.6. Causas químicas para a explosão

2.6.1. Diferenças nas concentrações de explosividade entre gases e poeiras

A mistura de pó/ar, sob forma de nuvem, é determinada pela quantidade de material em suspensão dentro da faixa de explosividade, pelas suas características e pelas condições ambientais. O grau de concentração é a quantidade de material em suspensão em g/m^3 , dentro de uma faixa possível de explodir.

Definem-se limites de explosividade superior e inferior, abaixo ou acima dos quais não ocorre explosão. A concentração limite inferior de inflamabilidade, caracteriza-se pelo 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 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 se depositarem.

Importa referir que, as misturas de pó e ar são explosivas, apenas acima de uma determinada concentração de pó. Torna-se interessante notar que, para um considerável número de pós, o limite inferior de explosividade, de particular importância para as aplicações industriais, situa-se entre 20 e 100 g/m^3 , enquanto que o limite superior é da ordem de grandeza de vários kg/m^3 . Do estudo efetuado por *CASHDOLLAR* (1996) utilizando um reator semi-esférico de 20 L, a explosão do polietileno e do carvão betuminoso de Pittsburgh a concentrações elevadas, concluiu-se que estes pós explodem até concentrações da ordem dos 4000 g/m^3 .

O estudo de *CASHDOLLAR* (1998), com a síntese da evolução da pressão com a concentração para os pós de carvão betuminoso, polietileno e para o gás metano, conforme mostra a Figura 2.8, revela comportamentos diferentes para a pressão de explosão de gases e de poeiras. Ao invés do metano, que evidencia um limite superior de explosividade, os dois pós não evidenciam qualquer limite superior

de explosividade, continuando a verificar-se o desenvolvimento de pressão com o aumento da concentração de pó.

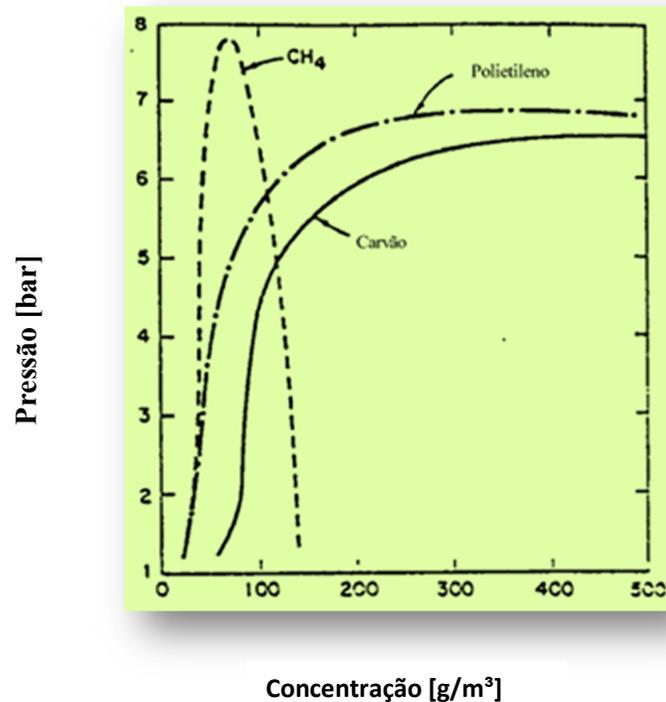


Figura 2.8 – Comparação entre a pressão de explosão dos pós de carvão betuminoso, do polietileno e do gás metano (Resultados obtidos com um reator semi-esférico de 20L, usando energias de ignição de 2500 J)

(Cashdollar, 1998)

A análise termodinâmica da evolução da temperatura e pressão adiabáticas durante a explosão, prevê uma diminuição destas duas grandezas para elevadas concentrações de pó. Esta diminuição deve-se ao facto de a mistura se tornar não explosiva quando o combustível se encontra em grande quantidade, na fase gasosa (HERTZBERG *et al.*, 1986).

O gás metano apresenta um comportamento para o desenvolvimento da pressão de explosão, com o aumento da concentração que segue as previsões termodinâmicas, enquanto que o mesmo não se verifica com os dois pós.

Os resultados experimentais mostram que a pressão e temperatura de explosão, no caso da explosão de pós, tendem a manter os seus picos à medida que a concentração de pó aumenta, ao invés de diminuírem, como prevê a teoria da explosão de misturas gasosas.

As desigualdades encontradas entre as previsões termodinâmicas e os resultados experimentais, são atribuídas a limitações na velocidade de desvolatilização das partículas sólidas que não foram quantificadas na teoria de explosão de misturas gasosas. A teoria termodinâmica assume uma desvolatilização completa do pó durante a combustão, no entanto, na prática não é possível desvolatilizar completamente o pó, no tempo disponível até à passagem da frente de chama, de forma a originar, em fase gasosa, uma mistura com um excesso de combustível tão elevada, que a torne não explosiva. Este comportamento é característico de todas as chamas de sistemas heterogêneos e distinto do comportamento das chamas, em sistemas homogêneos como é o caso das misturas (HERTZBERG *et al.*, 1986).

2.6.2. A influência da natureza das poeiras na concentração limite de inflamabilidade

A Tabela 2.2 expõe vários tipos de poeira e as respetivas concentrações limite de inflamabilidade. Nesta tabela verifica-se que as poeiras provenientes de substâncias tais como de Polietileno, Polyvinyl Butyral e derivados de resinas epóxicas, apresentam uma concentração e limite de inflamabilidade muito baixo - 20 g/m³, o que traduz um acréscimo de perigosidade. Observa-se ainda que as poeiras derivadas de serraduras, apresentam uma concentração limite que merecem atenção.

Tabela 2.2 – Concentrações limite inferior de inflamação, indicativas para suspensões de várias partículas correntes

(Adaptado de Campos, 1984; Dobashi, 2008; Zhao, 2020; Kausar, 2014; Eckhoff, 1988; Kuracina *et al.*, 2019; Guo *et al.*, 2019)

Natureza das poeiras	Diâmetro médio da partícula [µm]	Concentração limite inferior de inflamabilidade [g/m ³]
Carvão	50	40 a 60
Cereal	80	40 a 80
Polietileno	80	20
Polyvinyl Butyral	20	20
Resinas epóxicas	70	20
Farinha	85	50
Serradura	63	35

2.6.3. Energia de ignição e a dimensão da câmara de explosões

A energia de ignição ou ativação, define-se como sendo qualquer elemento do sistema que possam causar uma centelha que se situe dentro dos padrões de inflamabilidade.

Segundo *ABBASI et al. (2007)*, as fontes de energia de ativação que podem ocorrer nas indústrias, são de extrema importância, tais como fontes devidas a materiais incandescentes, superfícies quentes, faíscas e eletricidade estática.

Devido a cargas electrostáticas variadas, podem, entretanto, surgir outras fontes de ativação, designadamente fontes de ativação inerentes ao processo de produção, onde existe a libertação de pós. Podem ainda resultar do sistema de movimentação de materiais ou do sistema de ventilação.

Nestes sistemas podem aparecer faíscas originadas pelos elementos eléctricos de acionamento e de comando, mal isolados. Por fim, as faíscas podem ser até ocasionadas pela ocorrência de atrito entre partes metálicas, tais como rotores e estatores de motores e ventiladores.

São ainda de considerar situações de impactos acidentais entre peças e ferramentas, quer devidos a condicionamentos dos processos de fabricação e tecnológicos que não foram devidamente ponderados, ou por causas acidentais, como é o caso da queda de ferramentas ou pequenos componentes mecânicos e outros acessórios.

A energia libertada pela fonte de ignição tem de ser tão forte quanto o necessário para assegurar que o resultado é independente da energia de ignição, mas ao mesmo tempo não sendo excessivamente forte de forma a não originar pressões e temperaturas que levem a interpretações erróneas sobre o início e consequente desenvolvimento de reacções de explosão.

Somente desta forma, se consegue assegurar que a concentração mínima de explosividade seja independente da energia de ignição, utilizada na sua determinação experimental.

Contudo, a avaliação e ponderação de todos estes aspetos é bastante complexa, sendo quase obrigatória a comparação de comportamentos e resultados experimentais entre reatores de pequena capacidade, por exemplo 20 L e os reatores de 1 m³, como procedimento correto e adequado à determinação dos valores de energia de ignição ideais, tal como referem *GOING et al.* (2000); *CASHDOLLAR e CHATRATHI* (1992).

Pela interpretação do gráfico da Figura 2.9, o valor da concentração mínima de explosividade obtido com o reator esférico de 1 m³, é independente da energia de ignição, ao passo que a concentração mínima de explosão diminui com o aumento da energia de ignição, quando se opera com o reator semi-esférico de 20 L. Por outro lado, os valores da concentração mínima de explosão obtidos com o reator semi-esférico de 20 L, quando se usa uma energia de ignição de 2500 J, são semelhantes aos obtidos com o reator esférico de 1 m³. Assim sendo esta energia de ignição é normalmente recomendada para trabalhar com o reator de 20 L.

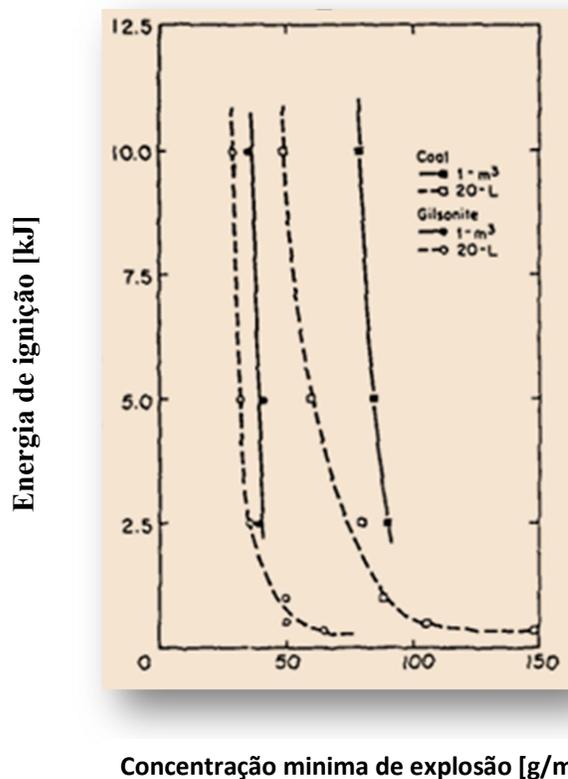


Figura 2.9 – Efeito da energia de ignição na concentração mínima de explosão.

(Cashdollar e Chatrathi, 1992)

Na observação do gráfico acima, o valor da concentração mínima de explosão é representado pela assíntota vertical à curva da energia de ignição, em função da concentração.

O aparecimento de uma nova curvatura para os valores mais elevados de energia de ignição, indicia a utilização de energias de ignição demasiado elevadas para o volume do sistema em estudo e que conduziram, eventualmente a situações de sobre-indução. Este comportamento para os pós de carvão betuminoso de *Pittsburg* e gilsonite, obtendo valores da ordem dos 80 g/m³ e de 35 g/m³, respetivamente, para a concentração mínima de explosão. O mesmo comportamento foi obtido por *HERTZBERG et al.* (1986), num estudo efetuado com polietileno, carvão de *Pittsburgh* e metano, obtendo concentrações mínimas de explosão de 35 g/m³, 90 g/m³ para cada pó, respetivamente e 4,9 % v/v para o metano.

2.6.4. Efeito da concentração de oxigénio na explosão de poeiras

A quantidade de oxigénio existente, é definida como a concentração mínima para a combustão total da massa de pó.

Para se prevenir a ocorrência de uma explosão de pó, vulgarmente é criada uma atmosfera inerte. Como é intuitivamente esperado, a violência de uma explosão de pó, diminui com a redução do conteúdo de oxigénio em que é disperso o pó. A redução da concentração de oxigénio para níveis inferiores ao atmosférico, dificulta o início de uma explosão. Para a inibição completa da propagação de chama, reduz-se drasticamente a quantidade de oxigénio. Tal como refere *CASHDOLLAR et al.* (1998), a concentração mínima de oxigénio é a concentração abaixo da qual uma explosão não ocorre.

Na investigação elaborada por *WIEMANN* (1987), sobre a influência do conteúdo de oxigénio no valor da pressão máxima e da velocidade máxima de aumento de pressão, obtidos durante a explosão de pó de carvão num reator fechado de 1 m³, os resultados mostram que ambos os parâmetros diminuem com a

descida do conteúdo de oxigénio e que a zona da concentração de pó explosiva é estrangida, em particular, no lado rico da mistura. Conclui-se 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 consideravelmente 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.

Os investigadores *NAGY* e *VERAKIS* (1983) estudaram o efeito da concentração inicial de oxigénio na atmosfera sobre o valor da pressão máxima desenvolvida pela explosão de vários pós, concluindo que, geralmente, uma pequena redução da concentração de oxigénio relativamente à do ar, provocava uma diminuição moderada na pressão máxima de explosão, mas que, à medida que se aproximava a concentração de oxigénio limitante, a pressão máxima de explosão diminuía rapidamente. Chegaram ainda à conclusão que, a velocidade de aumento de pressão diminuía, quase sempre linearmente, com a diminuição da concentração de oxigénio.

De outra forma, *CASHDOLLAR* e *HERTZBERG* (1988), estudaram a influência do conteúdo de oxigénio do gás oxidante no valor da concentração mínima de explosão de pó de carvão, com alto teor em voláteis, tendo concluído 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.

2.6.5. Influência na humidade do ar e da poeira na ignição

Na sua generalidade, a ignição de um material combustível fica mais estrangida, quanto maior for o teor de humidade presente no referido material,

bem como no ar, em virtude da água residual ao evaporar, empobrecer o ambiente, diminuindo a concentração de oxigénio existente.

Não obstante o processo de ignição seja iniciado, pode inibir-se devido ao efeito da modificação da atmosfera pelos vapores emitidos no curso da combustão do material húmido.

Em oposição, quanto mais seco for o ambiente da mistura, mais suscetível fica à ocorrência de ignição.

2.6.6. Temperatura mínima de ignição de poeiras

O conhecimento da temperatura mínima de ignição torna-se importante, dado que uma explosão de pó pode ocorrer, se uma nuvem de pó explosivo é gerada na proximidade de uma superfície quente que se encontra a uma temperatura acima da temperatura mínima de ignição.

Define-se como temperatura mínima de ignição, a temperatura a partir da qual pode ocorrer a combustão da poeira e não possa ser alcançada em situações normais. Uma oscilação da temperatura fora do normal, pode ocorrer devido aos fatores aleatórios indicados acima, por exemplo, ocorrência de faíscas, ou pelo uso controlado da fonte da ignição nas condições experimentais do reator. Na Tabela 2.3, apresentam-se alguns resultados indicativos da temperatura de auto-inflamação no ar, referentes a partículas correntes.

Tabela 2.3 – Temperaturas de auto-inflamação indicativas para suspensões de várias partículas correntes

(Adaptado de Campos, 1984)

Natureza das poeiras	Temp. de auto-inflamação [°C]
Carvão	530 a 610
Cereal	400 a 480
Polietileno	410
Polyvinil Butyral	390
Resinas epóxicas	530
Farinha	450
Serradura	430

A transição de incêndio para explosão pode ocorrer facilmente, desde que as poeiras que se encontrem depositadas nas imediações do fogo, entrem em suspensão e levem à obtenção de uma mistura gás-sólido com concentração mínima de explosão, sendo este um ingrediente ideal para a ocorrência das subsequentes explosões.

Ao invés, se as poeiras em suspensão causarem uma explosão, as partículas de poeira que estavam a queimar podem deixar de estar em suspensão e espalhar o fogo, deixando de haver explosão e passando a haver um regime de propagação de uma frente de chama, a velocidades relativamente lentas.

Nesse contexto, constitui-se a possibilidade de acontecer que esta frente de chama chegue a uma nova região com concentrações de partículas dentro dos limites de explosão, voltando a gerar-se condições para o reaparecimento de novas explosões.

Nesta circunstância os danos podem vir a revelar-se consideravelmente maiores do que no caso descrito anteriormente.

2.7. Classificação das poeiras: aptidão de ignição e graduação da explosividade

Uma concentração de poeiras é considerada como combustível, se uma vez inflamada por uma fonte de energia, a sua reação se propaga de forma sustentável, após retirada a fonte de energia.

Torna-se relevante referir que, todas as poeiras explosivas devem ser combustíveis, mas nem todas as poeiras combustíveis são facilmente explosíveis. Por exemplo, a antracite e a grafite não são facilmente explosíveis, muito embora tenham um elevado poder calorífico.

Se a composição de poeiras for conhecida, pode-se averiguar se é potencialmente explosiva, consultando a lista de poeiras ensaiadas experimentalmente, publicada por exemplo pela H.M. Factory Inspectorate do Ministério do Trabalho, no Reino Unido. A partir dessa lista pode-se classificar as

poeiras de grupo A, como sendo aquelas que propagam chamas quando inflamadas a uma temperatura de 25 °C. Como grupo B, são classificadas as poeiras, que não propagam chamas quando inflamadas à mesma temperatura, podendo no entanto, as poeiras desta classe deflagrarem a temperaturas mais altas.

Outra classificação de poeiras, citada por *TOMAZ e GÓIS, 2019*, é baseada na natureza da combustão das poeiras (Tabela 2.4), quando expostas a chama de gás ou a um fio de platina incandescente. O esquema de classificação estabelece seis tipos (*Tomaz e Góis, 2019*), conforme descrito abaixo:

Tabela 2.4 – Classificação de poeiras baseada na natureza da combustão das poeiras

(Adaptado de *Tomaz e Góis, 2019; Gummer e Lunn, 2003; ISSA, 1998*)

Tipo de poeiras	Natureza da combustão
CC1	sem ignição; nenhuma combustão auto-sustentada
CC2	ignição curta e extinção rápida; combustão local de curta duração
CC3	queimando ou brilhando sem se espalhar; combustão sustentada, sem propagação
CC4	propagação de fogo incandescente; propagação de combustão latente
CC5	espalhamento de fogo aberto; propagação de chama aberta
CC6	combustão explosiva

Uma terceira classificação de poeiras é baseada no valor obtido pelo *Kst*, descrito na EN 13094:2020. Este índice, representa a taxa de aumento da pressão, ou seja, a velocidade com que a onda de explosão se propaga caso a poeira entre em combustão e, de um certo modo, pode medir a gravidade relativa de uma substância em relação a outra. A forma, tamanho e nível de humidade das partículas de poeira, são apenas alguns dos fatores que determinam o valor *Kst* da poeira.

O *Kst* representa a taxa máxima de aumento de pressão em 1 m³, quando as poeiras são inflamadas. Por outras palavras representa, a “violência da explosão das poeiras”.

Terá sido *BARTKNECHT (1981)* quem introduziu o conceito *Kst*, dividindo-o em quatro categorias, de acordo com a Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Categorias do índice Kst

(Adaptado de Bartknecht, 1981; Tomaz e Góis, 2019)

<i>K_{st}</i>	Grupo St0	Não explosiva
$0 < K_{st} < 200$	Grupo St1	Explosão fraca
$200 < K_{st} < 300$	Grupo St2	Explosão forte
$300 < K_{st}$	Grupo St3	Explosão muito forte

O cálculo do K_{st} é obtido pela relação $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{max}$ do gráfico de explosividade, a partir de ensaios experimentais.

O Departamento de Minas dos EUA (US Bureau of Mines), desenvolveu um índice de explosividade que relaciona os outros pós, relativamente ao pó de carvão de Pittsburgh.

O índice de explosividade IE é o produto da severidade da explosão ES pela sensibilidade de ignição IS :

$$IE = ES \times IS \quad (2.5)$$

onde,

IE – Índice de explosividade;
 ES – Severidade da explosão;
 IS – Sensibilidade da ignição.

$$IS = [(MIT \times MIE \times MEC) P_c] / [(MIT \times MIE \times MEC) P_{amostra}] \quad (2.6)$$

onde,

MIT – Temperatura mínima de ignição [$^{\circ}C$];
 MIE – Energia mínima de ignição [J];
 MEC – Concentração explosiva mínima [$g \cdot m^{-3}$].

$$ES = [(MEP \times MRPR) P_c] / [(MEP \times MRPR) P_{amostra}] \quad (2.7)$$

onde,

MEP – Pressão máxima de explosão [bar];
MRPR – Taxa máxima de aumento de pressão [%].

Relativamente às equações (2.6) e (2.7), os subíndices *Pc* e *amostra*, retratam o carvão de Pittsburgh e a amostra utilizada.

O índice de explosividade *IE* é circunstancial. Nesse sentido, é menos dependente do equipamento utilizado, mas a sua determinação implica a aplicação de toda a gama de ensaios.

2.8. Acidentes por explosões de poeiras

Não obstante existir alusões de explosões de poeiras na literatura desde 1785, os registos sistemáticos, despontaram apenas no início do século XX.

As referências disponíveis mais abundantes encontram-se nos países mais desenvolvidos, em virtude de disporem de serviços de registo estatístico organizado. Ao invés, nos países menos desenvolvidos não existem fontes confiáveis e nem estatísticas sobre este tipo de acidentes.

Todavia, não deixa de ser admitido que, pelo menos uma explosão de poeiras ocorra por dia em cada país industrializado.

Os relatórios estatísticos de acidentes de trabalho em Portugal envolvendo explosões, ocorridos entre 2001 e 2018, publicados pelo Gabinete de Estratégia e Planeamento do Ministério da Solidariedade e da Segurança Social, até 2010, e posteriormente pelo Gabinete de Estratégia e Estudos do Ministério da Economia e mais tarde pela ACT - Autoridade para as Condições de Trabalho, revelam que o número de acidentes mortais tem vindo a diminuir, mas os acidentes atribuídos a desvios causados por problemas elétricos, explosão ou incêndios, têm-se mantido sensivelmente iguais, situando-se em termos percentuais, entre 1,4 % e 10,1 %, relativamente ao total de acidentes mortais (Figura 2.10), sendo a média no período em análise de 5,7 % (TOMAZ e GÓIS, 2019).

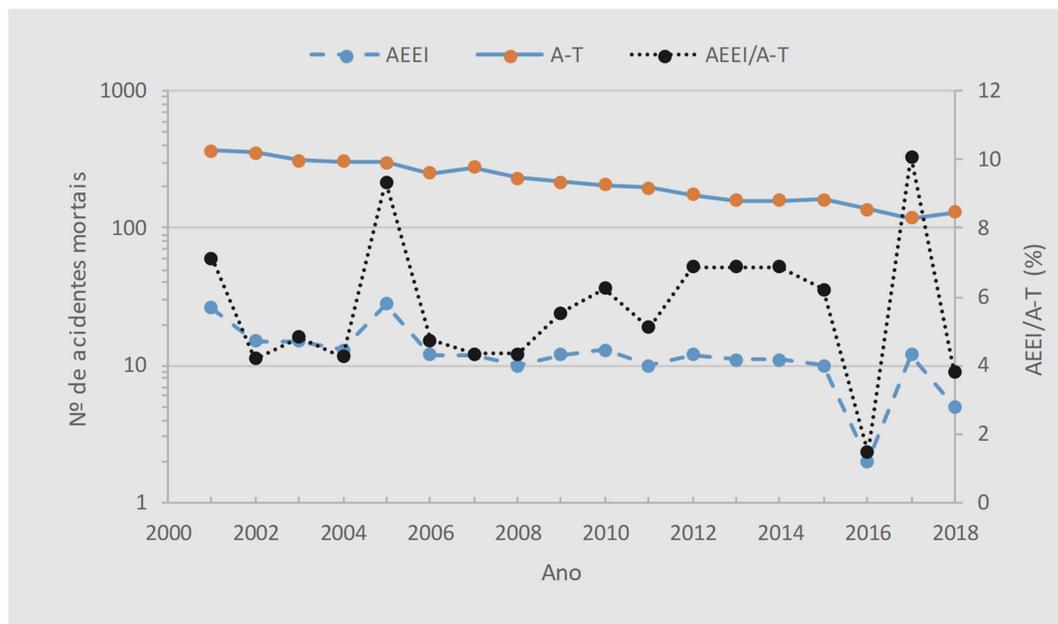


Figura 2.10 - Evolução do número de acidentes de trabalho mortais em Portugal

(Tomaz e Góis, 2019)

O gráfico da Figura 2.10 foi construído com base nos dados disponíveis em: AEEI - Acidentes de trabalho mortais, com desvio atribuído a problemas elétricos, explosão ou incêndio; A-T - Acidentes de trabalho mortais e AEEI/A-T - Percentagem de acidentes de trabalho mortais com desvio atribuído a problemas elétricos, explosão ou incêndio em relação ao total de acidentes de trabalho mortais.

Os dados estatísticos dos acidentes mortais relativos ao período 2003-2005 na EU-25, publicados pela Comissão Europeia, mostram que o número de acidentes com mortes atribuídos a desvios causados por problemas elétricos, explosão ou incêndio é de aproximadamente 5,7 % do total de acidentes fatais registados (Figura 2.11), o que está em concordância com a média em Portugal, para o período de 2001 a 2018.

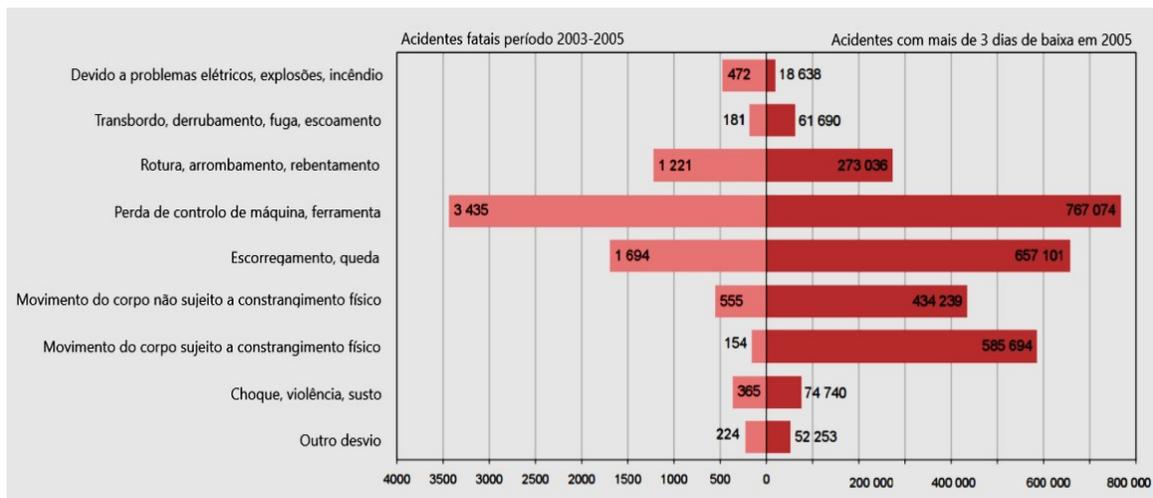


Figura 2.11 - Número de acidentes fatais (parte esquerda) e acidentes de trabalho com mais de 3 dias de baixa (parte direita), por tipo de desvio

(Tomaz e Góis, 2019)

A prática de engenharia de segurança de sistemas mostra que os acidentes mais graves são decorrentes de uma sequência de falhas ao longo do tempo, não havendo uma causa única.

Os acontecimentos, que normalmente são vistos como a “causa”, são na realidade decorrentes de um número muito grande de chamados “quase acidentes” ou “incidentes”. Estes são menores e não produzem consequências danosas, mas se a investigação e busca do mecanismo de falha (e devida correção) forem negligenciados, podem gerar eventos catastróficos (TOMAZ e GÓIS, 2019).

As concentrações de poeiras adequadas para uma explosão raramente se acumulam fora dos ambientes de processo, portanto a maioria das explosões de poeiras começa dentro de um equipamento (como moinhos, misturadores, telas, secadores, ciclones, silos, condutas de aspiração). Já as explosões de gás/vapor raramente acontecem dentro dos recipientes, devido à falta de ar para suportar as explosões.

3. MATERIAIS E METODOLOGIA

Para compreender os fenómenos associados à explosão de poeiras e de gases e quais os fatores que podem influenciar a reação, foi feita uma investigação documental a partir de artigos em revistas científicas da especialidade e em trabalhos académicos, preferencialmente escritos em inglês, tendo sido usadas como palavra-chave: dust explosion, gas explosion, ignition source, process industry. O período temporal da pesquisa cobriu preferencialmente os últimos 20 anos. Com base neste critério, foram apresentadas várias considerações ao longo do texto do presente estudo, com destaque para o capítulo 2.

Para a investigação documental sobre legislação e normas sobre medidas de segurança na instalação e funcionamento de equipamentos de secagem ao nível industrial e de certificação de conformidade de equipamentos, foram feitas pesquisas no Diário da República online e nos portais das organizações de normalização CEN, ISO e IPQ. Desta pesquisa foram também recolhidos e interpretados várias leis e decretos-lei, diretivas europeias, normas e códigos.

Para conhecer a dimensão da sinistralidade associada à explosão de secadores fez-se uma investigação documental, tendo por referência revistas da especialidade e portais de bases de dados sobre sinistralidade industrial. Para esta pesquisa não foi definido um período temporal, procurando-se de qualquer modo focar a recolha em documentação disponibilizada em portais de revistas científica, em trabalhos académicos (teses de doutoramento e dissertações de mestrado) e em notícias divulgadas pelos meios de comunicação. Na procura de informação foram preferencialmente usadas expressões em inglês, tendo sido usado como palavras-chave: accidents in process industries, explosion hazards, in process industries, industrial explosion accidents. A referida pesquisa, permitiu

obter uma considerável dimensão de informações, extremamente uteis para a contextualização do presente trabalho.

Para descrever a realidade em Portugal sobre as medidas adotadas na instalação, funcionamento e manutenção de secadores industriais, foram obtidos conhecimentos imprescindíveis, de uma forma realística e objetiva, relativos à empresa CIREs – Estarreja, que serviram de base para o desenvolvimento do estudo de caso.

4. EXPLOSÕES EM SECADORES E MEDIDAS DE MITIGAÇÃO

4.1. Processo de secagem por recirculação de calor

Estudo de caso - CIRES (Estarreja)

As instalações da fábrica da CIRES - Companhia Industrial de Resinas Sintéticas, integrada no Grupo Empresarial SHIN-ETSU, encontram-se localizadas num complexo industrial que se situa a oeste da estrada EN-109, à sua passagem pela zona do Samouqueiro, entre as localidades de Estarreja e Avanca.

A fábrica da CIRES encontra-se localizada na parte norte desta zona industrial, ficando as principais indústrias vizinhas tais como a Bondalti Chemicals (antiga CUF), a DOW e a Ar Líquido a sul e a oeste. A entrada nas instalações da CIRES faz-se através de um desvio que sai da estrada EN-109, junto ao km 45, e que atualmente constitui uma rua que dá acesso ao estabelecimento, e que se prolonga por um caminho de emergência até ao apeadeiro de Samouqueiro da rede ferroviária das Infraestruturas de Portugal.

As coordenadas geográficas da Portaria do estabelecimento são:

40° 46' 47" N e 008° 34' 26" W



Figura 4.1 – CIRES – Estarreja (vista área)

A CIRES, fabrica resinas de policloreto de vinilo (PVC) do tipo suspensão (s-PVC), em 6 reatores de 40 m³ (3 dos quais se encontram fora de serviço) e em 3 reatores de 130 m³ de capacidade, e resinas do tipo emulsão (e-PVC), em 4 reatores de 14 m³ de capacidade.

Possui nas instalações armazenagem de Cloreto de Vinilo Monómero (VCM) para produção, em 4 depósitos horizontais (2x100 m³, 2x250 m³) à pressão de vapor e no estado líquido.

O VCM é recepcionado no estabelecimento através de um pipeline que liga as Instalações Portuárias de Recepção (IPR) no Porto de Aveiro e a fábrica de Estarreja.

No interior do perímetro fabril do estabelecimento da **CIRES** encontra-se ainda instalada a empresa BAMISO, que se dedica à produção de energia elétrica e térmica (na forma de vapor) por cogeração, bem como à produção de ar, água filtrada, desmineralizada e desionizada, usando para tal a água captada no rio Antuã.

A classificação da atividade económica da **CIRES** é:

CAE (Rev.3) - 20160 – Fabricação de Matérias Plásticas sob Formas Primárias.



Figura 4.2 – CIRES - Estarreja

Importa ainda mencionar que a CIRES, faz parte integrante do Complexo Químico de Estarreja, CQE (Figura 4.3), sendo que as empresas constituintes do referido complexo, encontram-se abrangidas pela legislação de acidentes industriais graves, Diretiva Seveso (superior e inferior), cumprindo os mais elevados padrões de segurança.



Figura 4.3 – Complexo Químico de Estarreja - CQE

A entrada de qualquer pessoa nas instalações da CIRES só é autorizada aos seus trabalhadores ou aos trabalhadores da BAMISO, a visitantes e a colaboradores externos ao estabelecimento, após o cumprimento do estabelecido no procedimento - “Prestação de Serviços do Exterior” e “Regulamento de Segurança para visitantes ou trabalhadores do exterior” .

Na portaria das instalações os trabalhadores da CIRES ou da BAMISO procedem ao registo no sistema informático de ponto, usando o seu cartão identificativo dotado de banda magnética. A entrada de qualquer trabalhador da CIRES ou BAMISO está condicionada ao estabelecido nos regulamentos de segurança da CIRES e da BAMISO.

Após a entrada de um visitante nas instalações, o visitado é responsável pela sua permanência na empresa, incluindo a eventual situação de emergência, situação em que se deve orientar, relativamente aos comportamentos a tomar.

A entrada de um colaborador externo nas instalações só é autorizada após este receber formação específica em segurança, onde se aborda, entre outras

questões, os procedimentos a adotar em caso de emergência, como definido no procedimento - “Prestação de Serviços do Exterior”.

Neste caso, uma aplicação informática procede ao registo diário da entrada de trabalhadores externos nas instalações.

4.1.1. Sistema de secagem

De um modo geral os sistemas de secagem por recirculação de calor são constituídos por uma câmara em forma de túnel, equipada com um feixe de sensores de temperatura e pressão e por uma válvula de alívio da sobrepressão.

Existem ainda sondas de medição da concentração de gás proveniente da libertação de voláteis, no interior da câmara de secagem e na entrada e na saída das tubagens de recirculação. O aquecimento pode ser indireto por circulação de óleo a alta temperatura ou por vapor saturado e por recirculação de gás quente, aquecido por qualquer desses fluidos quentes.

A Figura 4.4 ilustra, através de um diagrama esquemático, o processo tipo de secagem por recirculação de calor instalado na empresa CIREs, sediada no Complexo Industrial de Estarreja.

Após o ar de secagem ser aquecido até à temperatura de operação, é insuflado pela parte inferior na câmara de secagem. O ar quente que sai do ciclone é reenviado para a parte inferior da câmara de secagem através da tubagem de recirculação.

O condensador encontra-se instalado na tubagem de exaustão para arrefecer o gás residual, ainda antes do adsorvente de carvão ativado, remover os compostos orgânicos voláteis.

O vaso de expansão foi incluído no sistema de circulação de gás, por forma a mitigar a expansão do gás, causada pelo aumento da temperatura, mantendo assim a pressão no equipamento de secagem com um valor próximo da pressão atmosférica.

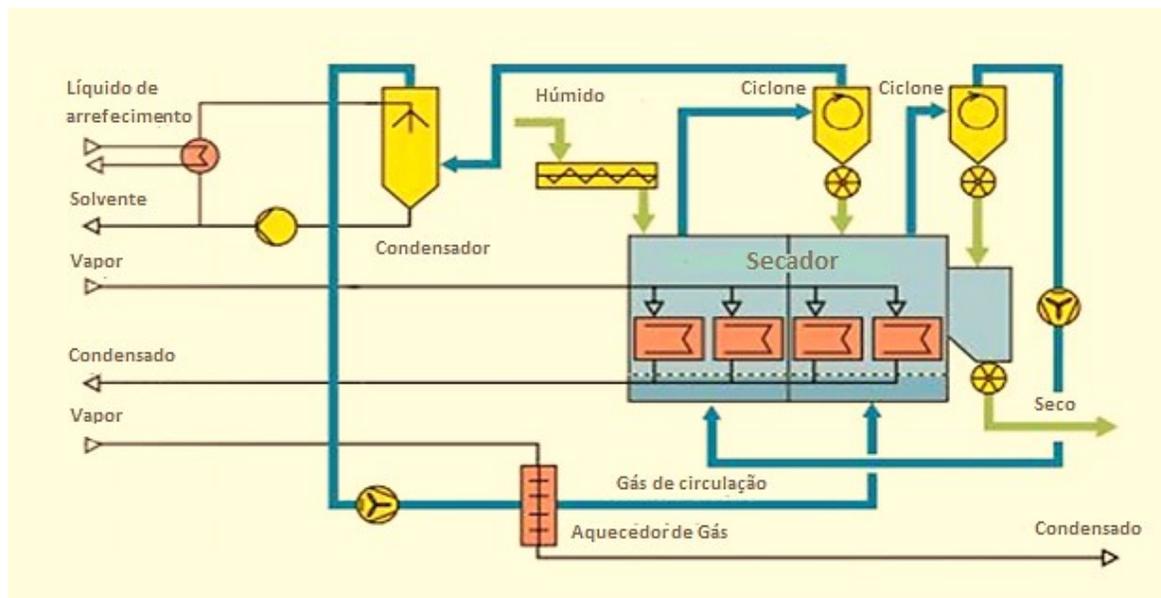


Figura 4.4 – Diagrama esquemático de secador por recirculação de calor

O ciclo das operações básicas do processo de secagem, é apresentado no diagrama abaixo - Figura 4.5 - sendo composto pelos seguintes passos:

- (1) carregamento do produto;
- (2) ligação do ventilador de recirculação e do aquecedor elétrico;
- (3) ventilação e troca de gás em intervalos de 15 minutos;
- (4) operação de secagem;
- (5) paragem do aquecedor elétrico e do ventilador de recirculação;
- (6) exaustão de gases;
- (7) descarga do produto.

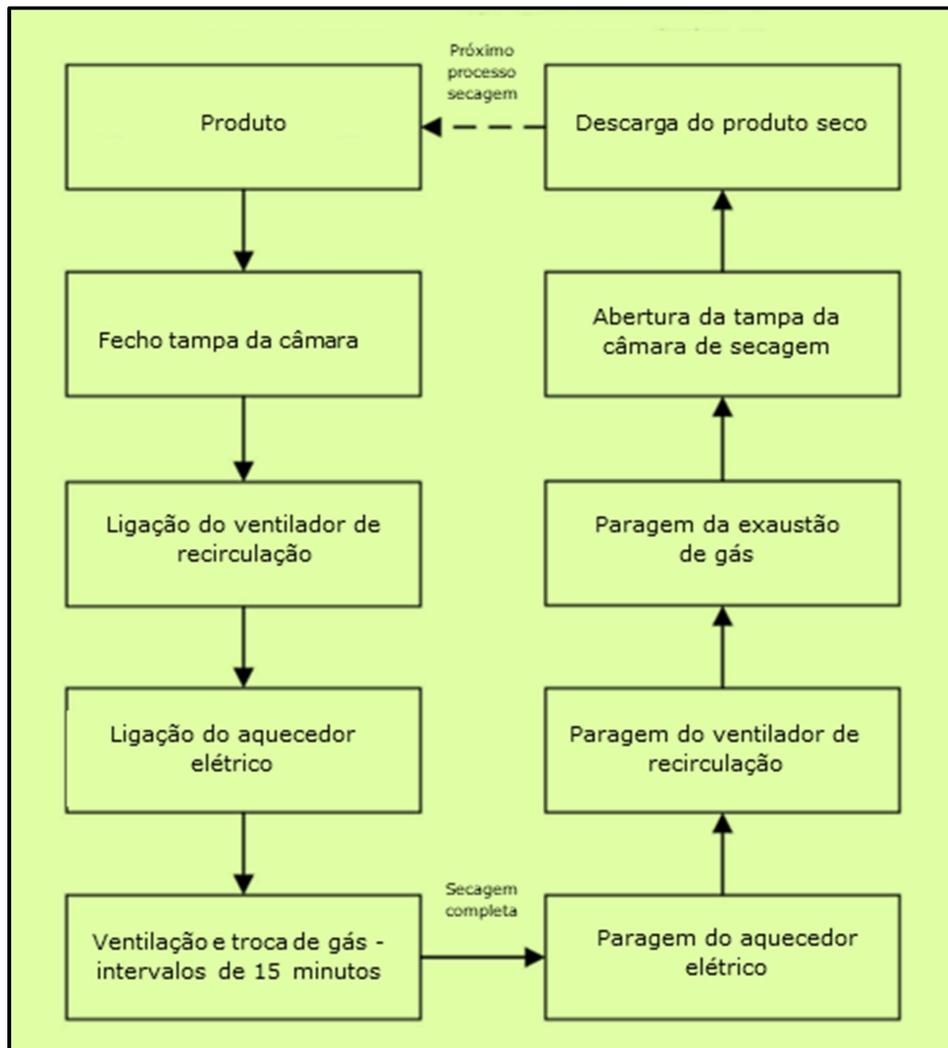


Figura 4.5 - Ciclo do processo de secagem por recirculação de calor

Os parâmetros básicos de operação do equipamento de secagem por recirculação de calor, encontram-se descritos através da Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Parâmetros básicos de operação do equipamento de secagem por recirculação de calor

Item	Parâmetros	Descrição
1	Especificação da câmara de secagem	Ø = 2000 mm; h = 2000 mm; material: aço 16MnR
2	Volume total do secador [m ³]	7,80 (câmara de secagem 6,28 m ³ ; <i>pipelines</i> 1,52 m ³)
3	Composição do revestimento [%]	Estireno (65,0); resina <i>epoxy</i> (28,0); óleo de tungue (7,0)
4	Volume de trabalho [m ³]	4,12 (12 conjuntos de enrolamentos com 0,34 m ³ cada)
5	Peso do revestimento por operação [kg]	2,7914 (densidade = 1,72 g.cm ³)
6	Limites de inflamabilidade do estireno [% de vol.]	1,1 a 6,1 à temperatura e pressão ambiente
7	Caudal de ventilação [m ³ /h]	1200
8	Pressão de serviço [MPa]	≤ 0,10
9	Temperatura de operação [°C]	150

Durante todo o processo de secagem, sabe-se que é gerada uma grande quantidade de gás inflamável. Quando a concentração do solvente inflamável atinge os limites de explosividade, na presença de uma concentração adequada de oxigénio, passa a existir a probabilidade de ocorrência de uma explosão.

As fontes de ignição geralmente conhecidas incluem chama aberta, descarga de faísca elétrica, faísca eletrostática e faísca de choque por fricção.

As medidas de proteção para essas fontes de ignição no processo de secagem incluem: instalações de segurança adequadas e suficientes, por exemplo, dispositivos elétricos à prova de explosão, extintores de incêndio e equipamentos de alarme, vulgo detetores; inspeções técnicas programadas ao equipamento e formação e treino no âmbito da segurança ativa e passiva, para os operadores do equipamento.

Para a operação de secagem por recirculação de calor, é importante ter em consideração uma outra fonte de ignição notável: a alta temperatura, a qual pode gerar uma autoignição. Portanto, deve ser considerada a aplicação de medidas de redução da temperatura de operação.

A superfície quente do aquecedor elétrico instalado no secador pode ser uma fonte de ignição. Nesse sentido, deve ser considerada a aplicação de medidas de redução da temperatura de operação.

Porém, para a secagem por recirculação de calor, a temperatura de operação deve ser suficientemente elevada, sendo habitualmente igual ou superior a 150 °C, tornando o ambiente inevitavelmente quente. Sob essa condição, os solventes orgânicos comuns e outros componentes inflamáveis utilizados durante o processo de secagem, facilmente atingirão o ponto de ebulição, originando constrangimentos na mitigação dos efeitos provenientes das fontes de ignição.

No entanto, alguns dos componentes aplicados em produtos químicos, geralmente contêm solventes orgânicos inflamáveis e voláteis que por vezes se acumulam nas câmaras de secagem.

Uma fonte de ignição, por exemplo, uma faísca elétrica estática, pode originar uma explosão, quando a concentração de solvente inflamável no ar, atinge os limites de explosividade.

Este tipo de acidentes ocorre habitualmente durante o processo de secagem de peças revestidas com tintas, pó húmido, emulsão ou solução, como é o caso do estireno e do e-PVC (PC em emulsão) e s-PVC (PVC em susoensão).

Após alguns estudos de casos de explosões de secadores, por recirculação de calor, constatou-se que a causa dos acidentes ficou a dever-se a temperaturas de operação excessivamente elevadas, durante o processo de secagem, originando a inflamação da mistura.

No sentido de evitar acidentes nos processos de secagem por recirculação de calor, será necessário proceder-se ao suprimento frequente de ar fresco e ao controlo da concentração de gás combustível ou partículas, abaixo de 25 % do limite inferior de explosividade (LEL - Lower Explosive Limit).

A alimentação substancial de ar fresco, no entanto, também origina uma secagem não uniforme e um desperdício de calor, podendo tornar a secagem pouco eficiente. Além disso, o risco de incêndio e de explosão permanecem, em caso de deficiências no funcionamento do equipamento de ventilação.

Como forma de colmatar esta situação, se tal for possível, deverão ser aplicadas medidas mais abrangentes, como redução ou eliminação de materiais perigosos e de erros de operação.

Os materiais potencialmente perigosos são substituídos por materiais não perigosos, a fim de se evitar o risco de acidente durante a produção, transporte ou uso do produto.

Segundo *AMYOTTEE et al.*, (2009) existem quatro princípios de segurança fundamentais:

- Evitar as matérias-primas perigosas;
- Reduzir a severidade das condições do processo;
- Aumentar a segurança e confiabilidade do equipamento;
- Reduzir a quantidade de meios perigosos no processo.

A análise teórica de engenharia realizada de forma minuciosa em vários ensaios, resulta também na aplicação das diretrizes recomendadas para prevenção de acidentes em processos de secagem.

Tal como já referimos anteriormente, a explosão ocorre quando estão presentes um combustível (substâncias inflamáveis sob forma de gases, vapores ou poeiras) em mistura com o ar (ou seja, uma quantidade suficiente de oxigénio), dentro dos limites de explosão, e uma fonte de ignição.

Em caso de explosão, os trabalhadores ficam expostos a riscos, devido aos efeitos incontrolados das chamas e da pressão, sob forma de radiação térmica, chamas, ondas de pressão e projecção de destroços, bem como dos produtos de reacção nocivos e do consumo de oxigénio do ar, indispensável à respiração. No caso concreto da CIREs, os processos com potencial para originar atmosferas explosivas são, entre outros:

- Produção de PVC de suspensão (Figura 4.6);
- Produção de PVC de emulsão (Figura 4.7).

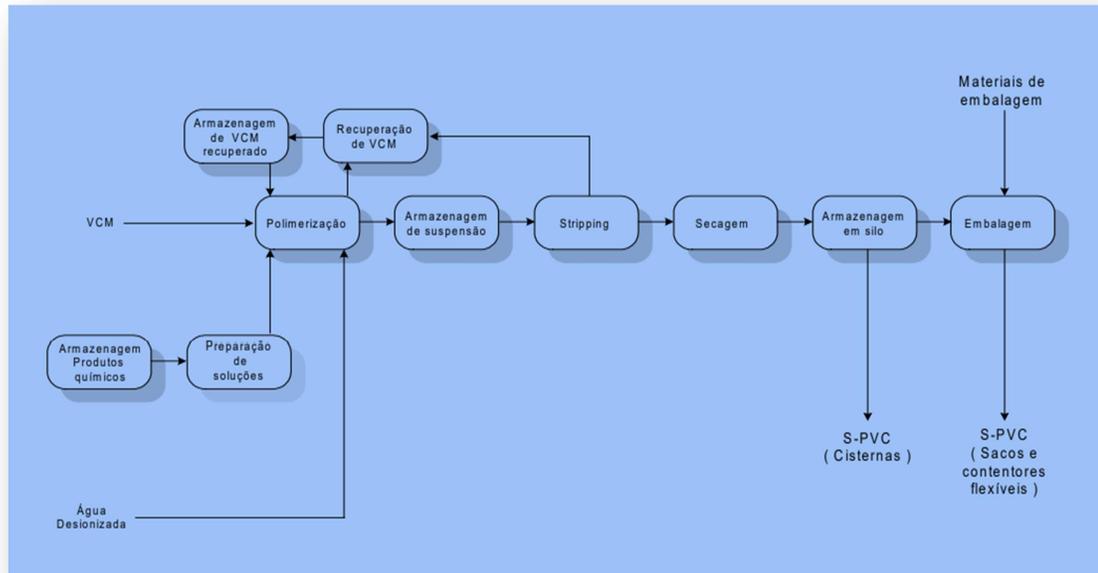


Figura 4.6 - Diagrama de produção do PVC de suspensão (s-PVC)

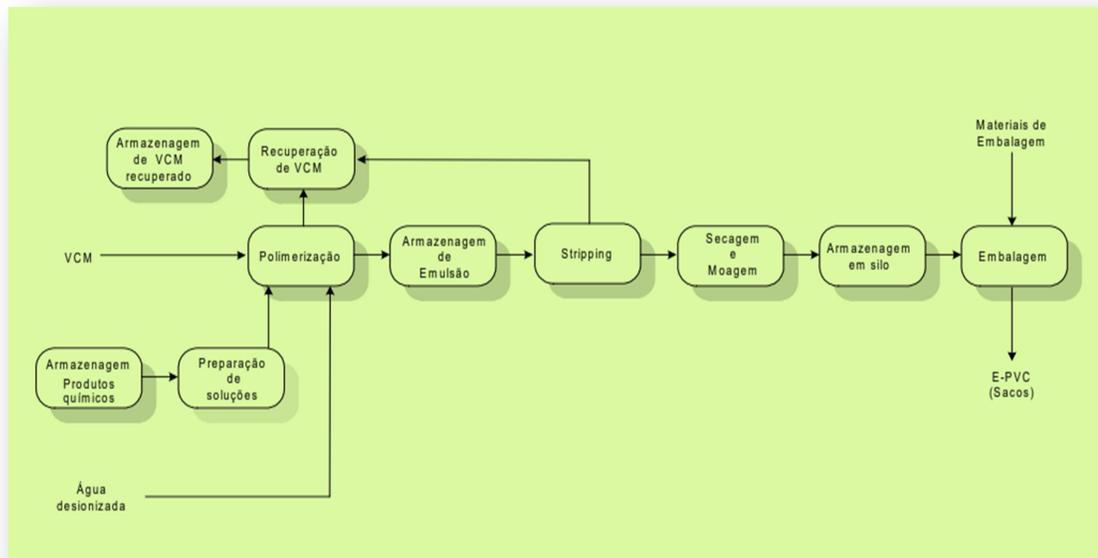


Figura 4.7 - Diagrama de produção do PVC de emulsão (e-PVC)

4.1.2. Medidas de protecção contra explosões

As medidas de protecção contra explosões encontram-se divididas em medidas técnicas e medidas organizacionais.

Devem ser tomadas medidas organizacionais sempre que as medidas técnicas não sejam suficientes para garantir e manter a protecção contra explosões no local de trabalho.

Na pratica, a saúde e a segurança dos trabalhadores durante a execução das suas tarefas é assegurada pela combinação de medidas técnicas com medidas organizacionais.

4.1.2.1. Medidas Técnicas

As medidas técnicas têm como objectivo principal, evitar que uma possível mistura de gases e/ou poeiras inflamáveis com o ar, entre em contacto com uma fonte de ignição e que, caso ocorra, as consequências sejam as mínimas possíveis.

Medidas para evitar a formação de atmosferas explosivas

Em conformidade com o artigo 6º., “Prevenção e protecção contra explosões”, do Decreto-Lei n.º 236/2003 de 30 de Setembro, as medidas de prevenção de atmosferas explosivas devem ter sempre a primazia.

Substituição de substâncias inflamáveis

É possível prevenir a formação de atmosferas explosivas perigosas se se evitar ou reduzir a utilização de substâncias inflamáveis.

A substituição de solventes por soluções aquosas, é disto um exemplo.

Limitar a concentração / Inertização

Para evitar a formação de atmosferas explosivas perigosas, uma das medidas utilizadas é a de diluir a substância inflamável no interior dos tanques com azoto (gás inerte). Deste modo o interior dos recipientes fica protegido de fontes de ignição presentes no exterior.

Prevenir ou reduzir a formação de atmosferas explosivas em torno das instalações

As instalações devem ser concebidas de modo a garantir que não ocorram quaisquer fugas significativas em condições de funcionamento normal. A continuidade desta característica é assegurado mediante uma manutenção regular.

Os processos de produção de PVC utilizam o conceito de *loop* fechado, que consiste no funcionamento da instalação, sem recurso à abertura de equipamentos durante o funcionamento normal, prevenindo-se deste modo a eventual formação de atmosferas explosivas.

Eliminação de depósito de poeiras

Os depósitos de poeiras podem evitar-se mediante a limpeza regular dos locais de trabalho. Geralmente os planos de limpeza, onde o tipo, o âmbito, a frequência e as responsabilidades individuais, estão estipulados de modo obrigatório, são um bom meio para a resolução dos depósitos de poeiras.

Realização de trabalhos de manutenção

O risco de acidentes é mais elevado durante os trabalhos de manutenção que compreendem a reparação, a revisão e a inspeção. Salvo em circunstâncias excepcionais, no âmbito das quais tenham sido tomadas outras medidas adequadas, as partes da instalação onde se prevê a realização das operações de

manutenção devem, conforme necessário, ser esvaziadas, despressurizadas, limpas, lavadas por forma a não conter substâncias inflamáveis.

Utilização de detectores de gás

A CIRES, tem instalado um sistema contínuo de análise e registo da concentração de VCM no ar, com 15 pontos de amostragem, com os quais se determinam níveis de exposição dos trabalhadores e simultaneamente servem como modo de detecção rápida de qualquer fuga de VCM. Esta detecção permite que sejam tomadas medidas que impeçam a formação de atmosferas explosivas.

Em complemento a estes sistemas, a CIRES dispõe ainda de 5 aparelhos portáteis de monitorização do ambiente de trabalho para determinação de gases voláteis utilizados, aquando do acompanhamento dos trabalhos que podem originar fontes de ignição na instalação.

A CIRES dispõe ainda de dois explosímetro utilizados para medir o LEL – Limite Inferior de Explosividade, sempre que se realizem trabalhos confinados.

Medidas para evitar a ignição

Se não for possível prevenir a formação de atmosferas explosivas, deve-se evitar a ignição dessas atmosferas. Este objectivo pode ser atingido mediante a adopção de medidas de protecção destinadas a evitar a presença de fontes de ignição ou a reduzir a probabilidade da sua ocorrência.

Electricidade estática

A medida de protecção mais importante é ligar todas as partes condutoras que possam tornar-se perigosamente carregadas, à terra. Todavia, esta medida de protecção não é suficiente quando estão presentes materiais não condutores. Neste caso, devem-se evitar níveis perigosos de carga das partes e materiais não condutores, incluindo sólidos, líquidos e poeiras.

As ligações equipotenciais e ligações à terra devem ser verificadas periodicamente com o respectivo registo das medições obtidas.

Superfícies quentes

Quando as superfícies quentes podem entrar em contacto com atmosferas explosivas, dever-se-á garantir uma margem de segurança entre a temperatura máxima da superfície e a temperatura de ignição da atmosfera explosiva. Deverá existir manutenção eficiente, por forma a evitar o aquecimento de peças móveis, devido a lubrificação insuficiente.

Chamas e gases quentes

Todo o processo de corte, soldadura, polimento e outros que possam produzir fontes de ignição, deve ser monitorizado para garantir que não há presença de substâncias inflamáveis.

Faíscas geradas mecanicamente

A produção de faíscas decorrentes de processos de fricção ou impacto devem ser eliminadas ou reduzidas, mediante a combinação de materiais adequados. Uma forma de evitar este tipo de fonte de ignição passa pela utilização de ferramentas anti-chispantes.

Descargas atmosféricas

As instalações devem ser protegidas pelas medidas adequadas de protecção contra descargas atmosféricas. Uma das medidas de protecção são os pára-raios, aos quais terá que ser feita uma medição periódica de resistência de terra, com o respectivo registo do valor medido.

Aparelhos eléctricos

Todo o equipamento de trabalho e material da instalação deverá ser adequado para a utilização em áreas perigosas, devendo ser montado, instalado e utilizado de modo a que não possa provocar uma explosão.

Os aparelhos e sistemas de protecção a utilizar devem corresponder às categorias definidas na Directiva 94/9/CE, salvo disposição em contrário do documento de protecção contra explosões, fundamentada na avaliação de riscos.

Ondas electromagnéticas de frequência rádio (RF) 10^4 Hz a 3×10^{12} Hz

Como medida de segurança geral contra o efeito de ignição de ondas electromagnéticas, deverá ser mantida uma distância de segurança, em todas as direcções, entre partes radiantes mais próximas e a antena receptora no local que pode conter uma atmosfera explosiva. Se não for possível manter uma distância de segurança adequada, deverão ser tomadas medidas de protecção especiais, como por exemplo, a blindagem.

Reacções exotérmicas, incluindo auto-ignição de poeiras

Sempre que possível, as substâncias com tendência para auto-ignição devem ser evitadas. Quando for necessário manusear tais substâncias, deverão ser aplicadas as medidas de precaução necessárias para cada caso em particular: enchimento com inertes; estabilização; melhoria da dissipação de calor (dividindo as substâncias em porções mais pequenas); limitação da temperatura e da pressão; armazenamento a temperaturas baixas e limitação dos períodos de permanência.

Medidas para limitar os efeitos de explosões

Em muitos casos, as medidas de protecção contra explosões centradas na prevenção da formação de atmosferas explosivas e da presença de fontes de

ignição não podem ser aplicadas com fiabilidade suficiente. Resta então tomar medidas que limitem os efeitos de uma explosão no interior das instalações que passam por:

- Concepção resistente à explosão;
- Descarga da explosão;
- Supressão da explosão;
- Prevenção da propagação de chamas e da explosão.

4.1.2.2. Medidas Organizacionais

Quando existem riscos potenciais de explosão num local de trabalho, a organização do trabalho deve igualmente obedecer a exigências específicas. As medidas organizacionais permitem configurar os processos de trabalho de modo a impedir que os trabalhadores sejam afectados pelos efeitos de uma explosão.

Instruções de trabalho

Estas instruções são prescrições e regras de conduta vinculativas, relacionadas com as actividades, estabelecidas por escrito pelos empregadores e dirigidas aos trabalhadores. Descrevem os riscos para as pessoas e para o ambiente, existentes no local de trabalho e indicam as medidas de protecção tomadas ou a cumprir.

Qualificação suficiente dos trabalhadores

Deve existir, em cada local de trabalho, um número suficiente de trabalhadores com experiência e formação necessárias para realizar as tarefas que lhes são confiadas em matéria de protecção contra explosões.

Formação e informação dos trabalhadores

A CIRES proporciona aos trabalhadores formação adequada sobre os riscos de explosão existentes no local de trabalho e as medidas de protecção tomadas. Os trabalhadores devem receber formação, por ocasião:

- da contratação;
- de qualquer transferência ou mudança de funções;
- da introdução ou de mudança de equipamentos de trabalho;
- da introdução de uma nova tecnologia.

A obrigação de formação é igualmente aplicável aos trabalhadores de empresas externas. Deve ser mantido um registo escrito da data, conteúdo e participantes destas acções de formação, para além de informação sobre:

- Pontos do local de trabalho com risco de explosão;
- Como surge o risco de produção de uma explosão;
- Medidas de protecção e o seu funcionamento;
- Manipulação correcta dos equipamentos de trabalho;
- Execução segura das tarefas em áreas de risco ou próximas destas;
- Significado da sinalização das áreas de risco;
- Indicação dos equipamentos móveis, cuja utilização está autorizada nas respectivas áreas;
- Equipamento de protecção individual que devem utilizar durante o trabalho.

Sistemas de autorização para a execução de trabalhos

Se numa área perigosa ou nas suas imediações forem realizados trabalhos susceptíveis de provocar uma explosão, esses trabalhos devem ser sujeitos à aprovação pelo responsável da CIRES, mediante um formulário de autorização

que todos os intervenientes devem receber e assinar, conforme o descrito no “Procedimento Realização de Trabalhos Especiais”.

Sinalização das áreas perigosas

Onde for necessário, devem ser assinaladas as áreas onde se possam formar atmosferas explosivas (Figura 4.8). Durante a formação, os trabalhadores devem ser informados da sinalização existente e do respectivo significado.



Figura 4.8 – Sinalização de atmosfera explosiva

Supervisão dos trabalhadores

Nos locais onde se possam formar atmosferas explosivas em quantidades susceptíveis de constituírem um risco para a segurança e a saúde dos trabalhadores, deve-se assegurar uma supervisão adequada durante a presença de trabalhadores, de acordo com a avaliação de riscos, mediante o recurso a meios técnicos apropriados.

Depósito de poeiras - LIMPEZA

Os depósitos de poeiras perigosos podem evitar-se mediante a limpeza regular dos locais de trabalho e dos compartimentos onde se encontram as instalações técnicas. Neste domínio, recomenda-se a utilização de planos de

limpeza nos quais o tipo, o âmbito e a frequência das medidas de limpeza e as responsabilidades individuais são estipuladas de modo obrigatório.

Importa ter especialmente em conta as superfícies pouco visíveis (situação elevada, por exemplo) ou de difícil acesso, nas quais se podem acumular quantidades consideráveis de poeiras ao longo do tempo.

Caso sejam libertadas grandes quantidades de poeiras, na sequência de perturbações de funcionamento (danificação ou rebentamento de recipientes, fugas, etc.), devem ser tomadas medidas complementares para eliminar sem demora os depósitos de poeiras. Os procedimentos de limpeza por via húmida e de aspiração (utilização de instalações centrais adequadas ou de aspiradores industriais móveis que não apresentam fontes de ignição) apresentam grandes vantagens do ponto de vista da segurança.

Devem eliminar-se processos de limpeza que provoquem o levantamento de poeiras depositadas, assim como a prática de eliminar poeiras acumuladas por sopragem.

4.1.2.3. Aquisição de Equipamentos: Requisitos

Nas áreas onde se possam formar atmosferas explosivas devem ser utilizados equipamentos e sistemas de protecção de acordo com a legislação em vigor (Decreto-Lei n.º 111-C/2017 de 31 de agosto e Portaria n.º 341/97, de 21 de Maio), salvo disposição em contrário. Nestas áreas deverão ser sinalizados os respectivos locais de acesso, se houver atmosferas com concentrações susceptíveis de constituir um risco para a segurança e saúde dos trabalhadores.

Cada dispositivo de trabalho tem de ser avaliado de acordo com a categoria do aparelho ou do sistema de protecção para os quais contribuam ou sejam necessários. Os aparelhos encontram-se divididos em dois grupos: o Grupo I e o Grupo II.

Nas instalações da CIREs, o grupo de aparelhos a utilizar são os do Grupo II, uma vez que os do Grupo I engloba os aparelhos destinados a trabalhos subterrâneos em minas e às respectivas instalações de superfície.

O Grupo II está dividido em categorias que dependem do local onde se prevê utilizar o equipamento, o facto de se verificar ou não de modo permanente a presença de uma atmosfera potencialmente explosiva ou da probabilidade da sua ocorrência, durante um longo ou um curto período de tempo.

A categoria 1, inclui equipamentos dotados da capacidade de manter parâmetros de funcionamento declarados pelo fabricante e garantir um nível de protecção muito elevado, tendo em conta a utilização prevista em zonas 0, 1 e 2 ou 20, 21 e 22.

A categoria 2, inclui produtos dotados de capacidade de manter os parâmetros de funcionamento declarados pelo fabricante e garantir um elevado nível de protecção, tendo em conta a utilização prevista em zonas 1 e 2 ou 21 e 22.

A categoria 3 inclui produtos dotados de capacidade de manter os parâmetros de funcionamento declarados pelo fabricante e garantir um nível de protecção normal, tendo em consideração a utilização prevista em zonas 2 ou 22.

Cada aparelho e sistema de protecção deve ter inscritas, de maneira legível e indelével, as indicações mínimas seguintes:

- Nome e endereço do fabricante;
- Marcação CE, constante do anexo X da Portaria n.º 341/97 de 21 Maio;
- Designação da serie ou do tipo - Número de série, caso exista;
- Ano de fabrico;
- Classe de Temperatura (T1, T2, T3, T4, T5 ou T6);
- Marcação específica de protecção contra explosões (Figura 4.9).

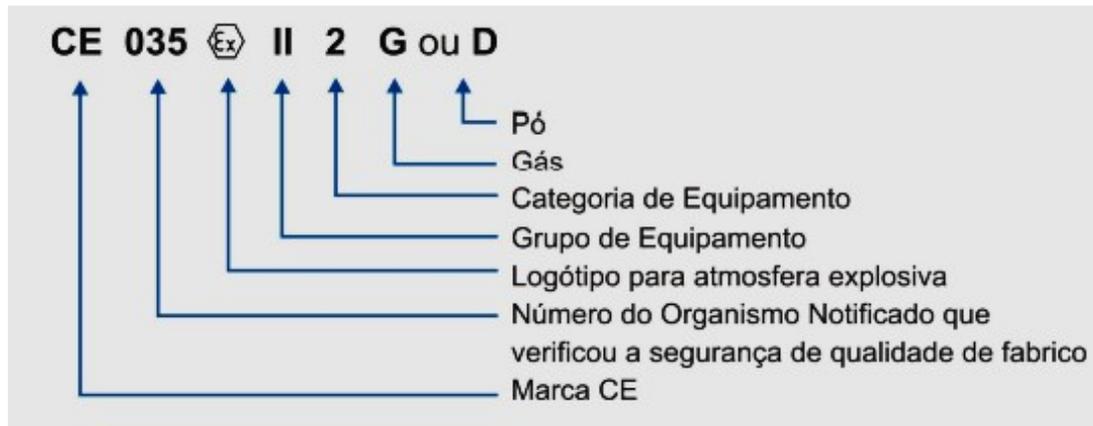


Figura 4.9 – Marcação específica de proteção contra explosões

Nota:

Numa situação em que o aparelho seja para utilização em atmosfera potencialmente explosiva provocada por gás e poeira (atmosfera híbrida), na marcação do aparelho deverá estar presente G e D.

Por vezes surge a marcação GD ou G/D que geralmente significa G ou D. Os aparelhos com esta marcação não poderão ser utilizados em áreas classificadas provocadas por gás e poeira.

Cada aparelho deve também ser acompanhado de um manual de instruções em língua portuguesa que dê, no mínimo, as indicações seguintes:

- Repetição das indicações previstas no número anterior, com excepção do número de série, eventualmente completados com indicações que permitam facilitar a manutenção, nomeadamente o endereço do importador e do reparador;
- Instruções para efectuar, sem riscos;
- A entrada em serviço;
- A utilização;
- A montagem e desmontagem;
- A manutenção (revisões e reparação);
- A instalação;
- A afinação;

- Se necessário, a indicação das zonas perigosas situadas diante dos dispositivos de descarga e de pressão;
- Se necessário, instruções de formação;
- Indicações necessárias que permitam decidir, com conhecimento de causa, se um aparelho de uma determinada categoria, ou um sistema de protecção, pode ser utilizado sem perigo no local e nas condições de serviço previstas;
- Os parâmetros eléctricos e de pressão, as temperaturas máximas de superfícies ou outros valores limite;
- Se for caso disso, as condições específicas de utilização, incluindo as indicações de uma possível má utilização que possa ocorrer, determinado empiricamente;
- Se for caso disso, as características essenciais dos instrumentos que podem ser montados no aparelho ou no sistema de protecção. Os equipamentos eléctricos e mecânicos certificados para uso em zonas perigosas deverão possuir "data sheet" actualizados, na vertente ATEX, nomeadamente com a indicação de "tag number", código Ex, indicação do grupo de equipamento, categoria de equipamento, tipo de atmosfera explosiva, tipo de protecção, grupo de explosão e classe de temperatura, entre outros.

4.1.2.4. Manutenção de Equipamentos: Requisitos

De acordo com as Directivas 94/9/CE e 1999/92/CE, os técnicos que operam ou procedem à manutenção de equipamentos localizados em áreas perigosas deverão ter formação específica. Devem elaborar planos de formação adequados a todos os colaboradores que desempenhem actividades nessas áreas. Sempre que os equipamentos certificados para zonas perigosas sejam alvo de trabalhos de manutenção, os mesmos deverão ser identificados com a etiqueta "R" conforme estipulado na norma EN 60079-19 (§2.4, §2.5 e

§2.6), e deverá existir um registo individual de todo o tipo de intervenções efectuadas.

Deverá ser elaborada e mantida actualizada a lista completa de equipamentos existentes nas zonas classificadas como áreas perigosas. Quando for necessário proceder à substituição de equipamento presente em áreas classificadas, este deve ser alterado para equipamento com marcação adequada à classificação de Zona onde se encontram, de acordo com as indicações referidas, dada a probabilidade de constituírem uma fonte de ignição da atmosfera explosiva na área.

Deverá ainda existir na empresa, procedimentos de inspecção periódica de equipamentos eléctricos - por exemplo, por termografia - por forma a reduzir a probabilidade de explosão.

4.1.2.5. Procedimentos de monitorização durante e após a emergência

Durante uma emergência, o Diretor da Emergência da CIRES acompanhará o desenrolar das ações de mitigação e os brigadistas solicitam os meios necessários para o restabelecimento da normalidade.

Por forma a definir estratégias de combate à emergência e tomar decisões quanto às medidas de mitigação durante e após a emergência, é necessário efetuar um controlo e monitorização de parâmetros ambientais e condições atmosféricas, nomeadamente a direção do vento através dos sinalizadores de vento existentes (mangas de vento) ou anemómetros. Desta forma reduzem-se os efeitos negativos e os impactos no exterior.

As ações de pós-emergência estão condicionadas às consequências produzidas na ou nas áreas afetadas.

Após a avaliação, desencadeiam-se os mecanismos necessários de atuação:

- Garantir a vigilância das áreas afetadas contra intrusões;
- Proteger/Recuperar os equipamentos e matérias-primas dos destroços;

- Restabelecer rapidamente os meios de proteção de incêndios;
- Reativar as comunicações;
- Limpar as áreas afetadas;
- Manter/Ativar as redes de utilidades;
- Remover os resíduos;
- Avaliar o grau de contaminação das escorrências resultantes da água residuais de extinção de incêndios e proceder ao seu tratamento, sempre que possível.

Se a emergência for definida como Emergência Geral ou Emergência Externa, o Coordenador da Emergência da CIRES garantirá que o Serviço Municipal de Proteção Civil (SMPC) será devidamente informado da ocorrência.

Até à chegada dos meios de socorro externos é o Coordenador da Emergência da CIRES que dirige, através do Diretor da Emergência da CIRES, as operações de socorro e evacuação em situação de emergência.

Aquando da chegada dos meios de socorro externos ao local, essa direção é passada para o Comandante das Operações de Socorro (COS), devendo o Coordenador da Emergência prestar toda a colaboração solicitada, fornecendo informações sobre a situação em causa.

As equipas de socorro exteriores (Bombeiros, INEM, Forças de Segurança, etc.) atuam de acordo com as técnicas e hierarquias próprias em ligação com o Coordenador da Emergência e com o Diretor da Emergência que articularão a utilização dos recursos humanos e materiais disponíveis na fábrica da CIRES.

As áreas consideradas em risco na envolvente do estabelecimento foram identificadas nos alcances das modelações dos cenários de acidente do relatório de segurança. A Figura 4.10 identifica as zonas no exterior das instalações que podem ser atingidas nos vários cenários de acidente considerados representativos do estabelecimento.

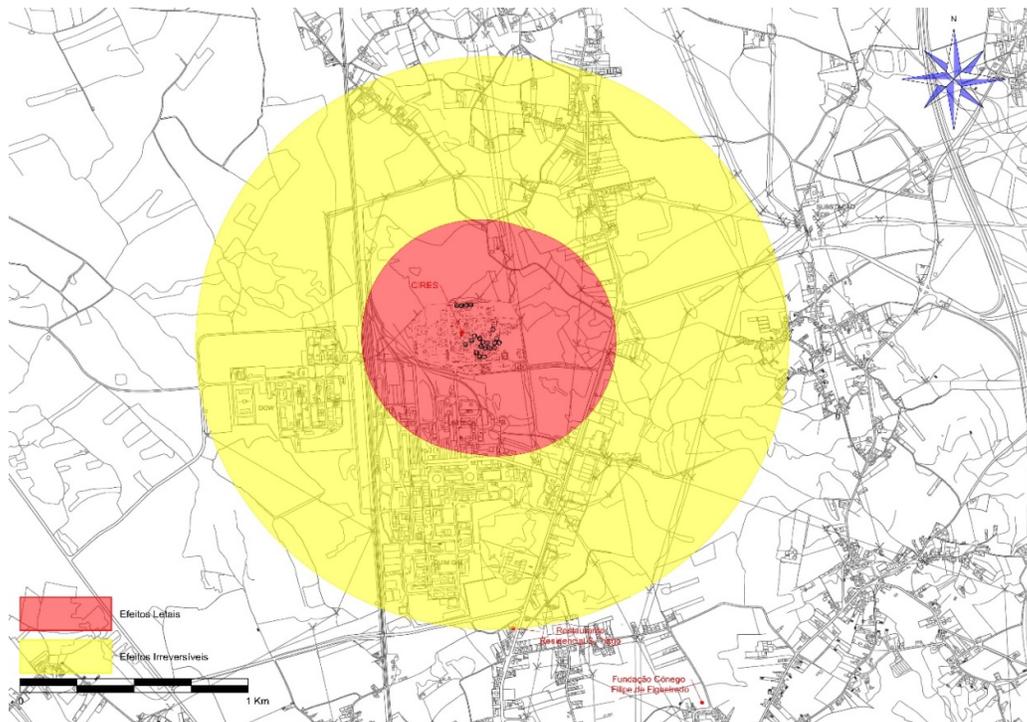


Figura 4.10 – Áreas consideradas em risco na envolvente do estabelecimento

4.1.2.6. Meios Materiais

A empresa possui um conjunto de sistemas de detecção e alarme, cujo alarme é recebido nas salas de controlo.

Sistema de detecção de incêndios

O estabelecimento encontra-se munido por um sofisticado sistema de detecção de incêndio, incluindo o modo de operação e monitorização.

Alarme de Emergência

Em caso de emergência, o estabelecimento possui um sistema de alarme sonoro, perfeitamente audível em todos os pontos das instalações e diferenciado de outros sinais acústicos igualmente utilizados.

Todo o pessoal reconhece os sinais de alarme e está formado e treinado, quanto às ações a empreender após a sua ativação.

Sistema elétrico de emergência

O sistema elétrico de emergência é composto por grupos eletrogêneos e UPS, que em cada caso de falta de tensão no Quadro Geral de Baixa Tensão (Q.G.B.T.), alimentam determinados equipamentos considerados de risco por razões de segurança/ produção. A fábrica da CIRES dispõe de:

- 4 grupos eletrogêneos de 380/400 V, 50 Hz com 350, 430, 500 e 1600 kVA;
- 7 UPS de 380 V e com a potência total de 2190 kVA (para os motores dos reatores de polimerização de 130 m³ e equipamentos auxiliares destes incluindo todas as bombas de água de arrefecimento);
- 5 UPS de 380 V/100-110 V – instaladas nas Salas de Controlo PS1, PS2, E-PVC, Cogeração e que fornecem energia para toda a instrumentalização localizada nas salas;
- 2 UPS de 220 V para iluminação de emergência, comunicação/telefone de emergência e central telefónica.

O equipamento de proteção individual (E.P.I.) para utilização em situação de emergência e que está disponível no estabelecimento é o seguinte:

- Equipamento de proteção para combate a incêndios composto por fatos NOMEX, capacete, botas e luvas;
- Botas de borracha;
- Máscaras de proteção;
- Óculos de proteção;
- Luvas de diversos materiais.

O material de proteção destinado a defesa contra incêndios encontra-se localizado na Sala de Brigadistas e consta de:

- Material de combate a incêndios, composto por mangueiras, agulhetas, monitores portáteis, disjuntores, etc.;
- Máscaras de proteção respiratória;
- Aparelhos de respiratórios isolantes de circuito aberto (ARICAS);
- Fatos integrais de proteção química;
- Unidade móvel de proteção respiratória;

As Salas de Controlo, Posto Médico, Edifício Administrativo e Manutenção Elétrica, estão equipadas também com aparelhos de respiração autónoma.

Estão ainda disponíveis máscaras de evacuação, em diferentes locais da fábrica.

Viaturas e meios internos de socorro

A fábrica da CIRES dispõe de uma viatura de emergência equipada com diversos meios de intervenção rápida, nomeadamente:

- Meios de combate a incêndio;
- Fatos proteção química;
- Meios de rádio e comunicação;
- Sistemas monitorização do ambiente de trabalho;
- Equipamentos de Proteção Individual.

Material de primeiros socorros

A fábrica da CIRES possui um Posto Médico com competência para prestação dos cuidados de primeiros socorros médicos em situação de emergência, com enfermeiro presente nos dias úteis, no horário 8h30 – 17h30.

Além destes meios que são mobilizados em situação de acidente, existem caixas de primeiros socorros, distribuídas por todo o estabelecimento nos locais de maior concentração de colaboradores e de forma a serem rapidamente acessíveis.

Equipamentos e sistemas de segurança contra incêndios

Extintores - Os extintores postos à disposição funcionam com dois tipos de "agentes extintores" pó químico seco do tipo ABC e dióxido de carbono (CO₂). Podem ser utilizados nas "classes de fogo" indicadas nos respetivos rótulos.

Os extintores considerados portáteis, estão instalados em paredes e colunas, os restantes (unidades móveis) dispõem de rodas e encontram-se no solo nos locais designados.

Uns e outros estão distribuídos por diversos locais, de forma estratégica e devidamente sinalizados.

Rede de água - Envolvendo as instalações fabris há redes de tubagem de água enterrada e aérea, com saídas para hidrantes fixos e móveis e ao longo da qual estão colocadas caixas contendo material de incêndio: mangueiras, agulhetas, ramais triplos, joelhos e difusores para cortinas de água.

O circuito de água está sempre pressurizado, pressão mantida por uma bomba *Jockey* e a alimentação é feita por duas bombas, uma comandada por motor elétrico e outra por motor a gasóleo, que debitam um caudal máximo de 500 m³/h, e permitem pressurizar a rede de combate a incêndios com uma pressão de serviço de 8 bar.

A atual capacidade de armazenagem de água corresponde a um reservatório para de água para uso industrial, com uma capacidade de 5000 m³.

De referir ainda que em condições normais a fábrica está a ser abastecida de água proveniente do rio Antuã, a um caudal médio de 120 m³/h.

Rede de espuma - Envolvendo as bacias de retenção dos tanques de armazenagem de VCM e respetivas bombas há uma linha de produção de espuma para proteção das bacias em caso de derrame ou incêndio, com comando remoto. Esta linha é abastecida por um tanque de espumífero com a capacidade de 1000 L.

O armazém de produtos químicos está também equipado com um sistema de espuma, com comando local. Esta linha é abastecida por um tanque de espumífero com a capacidade de 1000 L.

O edifício da cogeração está também dotado de um sistema de espuma, destinado a combater um eventual foco de incêndio no poço das bombas do motor. Esta linha é abastecida por um tanque de espumífero com a capacidade de 1000 L.

Para além do espumífero localizado em tanques, a CIRES dispõe ainda de uma reserva mínima de 1000 L e de mais 1500 L de espumífero em bidões de 25 L.

Difusores para cortinas de água - São acessórios portáteis (podendo existir alguns fixos) que servem para obter barreiras de água (em sentido vertical), destinadas principalmente à função de corta-fogo (para impedir a expansão), ou isolamento de áreas ameaçadas, e ainda para minorar o alastramento dos gases derramados em direções a prevenir (relativamente à direção do vento).

Canhões de água - Material fixo e móvel para utilização no combate a incêndio e arrefecimento de equipamentos, orientado previamente, mas ajustável.

Monitores de água - Material fixo para utilização no combate a incêndio e arrefecimento de equipamentos, orientado previamente, mas ajustável.

4.1.2.7. Meios Humanos

A empresa dispõe de um Corpo de Brigadistas composto por 50 elementos, dirigidos por 3 Diretores de Emergência, 1 Diretor Operativo e coordenados por 1 Coordenador Geral de Emergência (Figura 4.11), com formação e treino em Emergências Industriais, mais especificamente no Controlo de Acidentes com Matérias Perigosas, Incêndios e Explosões.

Por outro lado, todo o pessoal que trabalha no estabelecimento está familiarizado com o mesmo e esclarecido sobre as suas regras de exploração, tendo conhecimento quanto à atuação a ter, em caso de emergência.

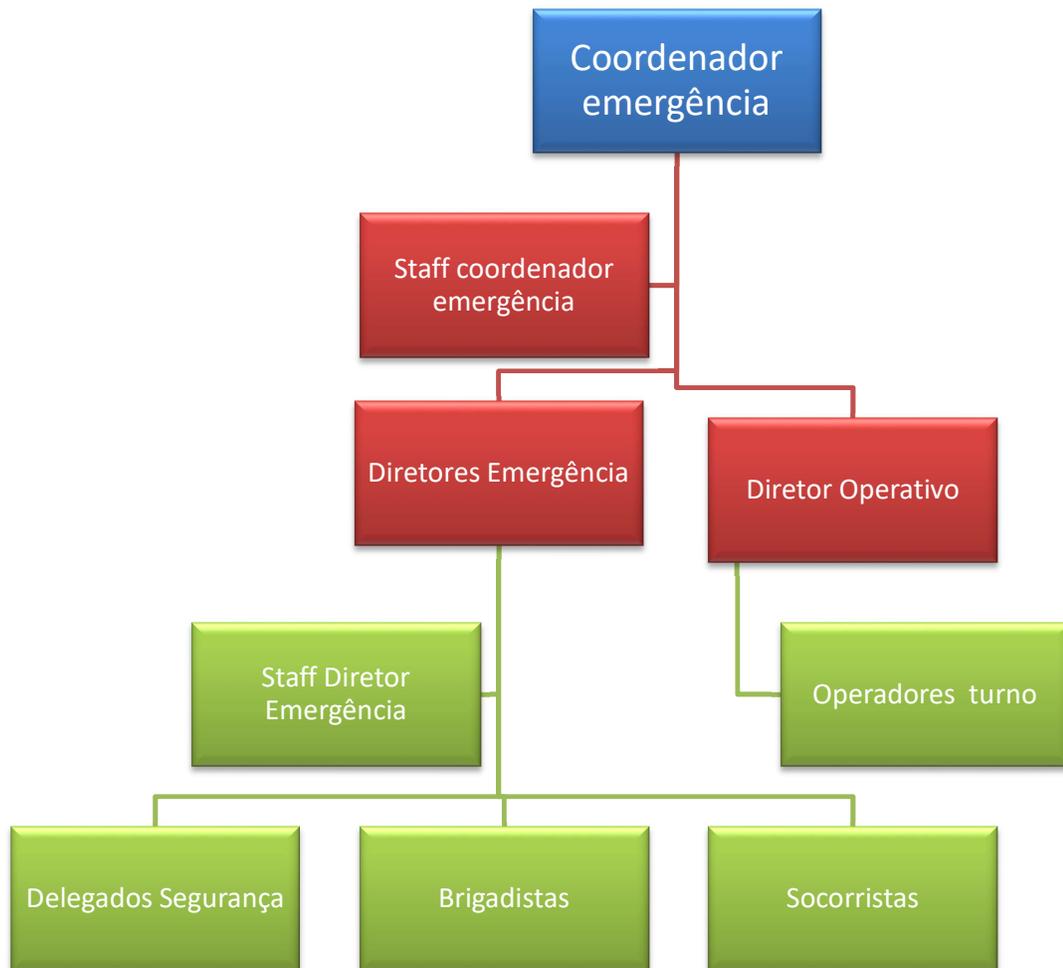


Figura 4.11 - Organograma em situação de emergência

4.1.3. Formação e Treino

Importa mencionar que, a empresa CIRES dispõe de um Plano de Formação Anual, composto por formação e treino específico para brigadistas, nomeadamente em Controlo de Acidentes com Matérias Perigosas, Incêndios e Explosões e formação teórico-prática, para todos os colaboradores internos, em especial, para situações de risco de incêndio (incluindo utilização de extintores),

emissão do alerta, evacuação, utilização dos comandos de meios de atuação em caso de incêndio e instruções especiais de emergência (Figura 4.12).

Por outro lado, a CIRES dispõe ainda de um campo de treinos, parte integrante das instalações fabris, contendo vários equipamentos de formação e treino, onde são ministrados diversos tipos de exercícios, nomeadamente combate a incêndios com fogo real, tamponamento de fugas em depósitos e tubulações, supressão de obstáculos, salvamento em grande ângulo e salvamento de vítimas em espaços confinados (Figura 4.13).

Formação inicial

Para um dado trabalhador poder exercer a função de brigadista terá obrigatoriamente que frequentar com aprovação acções de formação e/ou treino em que sejam abordadas, preferencialmente, as seguintes matérias:

- Formação na utilização de ARICAS;
- Formação na utilização de fatos químicos;
- Formação em combate a incêndios – extintores portáteis;
- Formação em combate a incêndios – linhas de água;
- Formação em combate a incêndios – espumífero;
- Entrada em espaços confinados;
- Monitorização de atmosferas potencialmente perigosas;
- Combate a derrames de substâncias perigosas;
- Tamponamento de fugas.

Complementarmente a esta formação e/ou treino específicos, os brigadistas devem, preferencialmente, possuir carta de condução de categoria B, Grupo 2, ou equivalente, para estarem habilitados à condução do veículo de emergência da CIRES.

Formação e treino de manutenção

Para um dado trabalhador manter as suas qualificações como brigadista, terá obrigatoriamente que, anualmente, frequentar com aprovação, acções de formação e/ou treino em que sejam abordadas, preferencialmente, as seguintes matérias:

- Formação na utilização de ARICAS;
- Formação na utilização de fatos químicos;
- Formação em combate a incêndios – extintores portáteis;
- Formação no combate a incêndios reais com GPL em campo de treinos:
 - *Jet-fire*;
 - *Pool-fire*;
 - Combate a incêndios em espaços confinado;
 - Resgate em incêndios em espaços confinados.
- Formação em combate a incêndios – linhas de água;
- Formação em combate a incêndios – espumífero;
- Entrada em espaços confinados;
- Monitorização de atmosferas potencialmente perigosas;
- Combate a derrames de substâncias perigosas;
- Tamponamento de fugas.

Formação para socorrista

Para um dado trabalhador poder exercer a função de socorrista terá obrigatoriamente de frequentar com aproveitamento um curso de primeiros

socorros certificado pelas entidades competentes, dela obtendo o respectivo certificado e/ou cartão de socorrista.

Antes de expirar a validade deste certificado e/ou cartão de socorrista, deverão ser frequentadas as acções de formação necessárias à sua revalidação.

Dada a natureza da actividade da CIRES, os socorristas devem de estar preparados para efectuar o resgate em ambiente tóxico. Assim, a sua formação e treino devem incluir as seguintes matérias:

- Formação na utilização de ARICAS;
- Formação na utilização de fatos químicos;
- Entrada em espaços confinados;
- Monitorização de atmosferas potencialmente perigosas.



Figura 4.12 – Formação e treino operacional – CIRES (Estarreja)



Figura 4.13 – Exercício no campo de treinos – CIREs (Estarreja)

4.1.4. Comunicações com o exterior

A comunicação de uma Emergência ao Serviço Municipal de Proteção Civil (SMPC) é efetuada pelo Coordenador da Emergência, ao ser ativado o Plano de Emergência Interno, numa situação de Emergência Geral após análise e classificação do acidente em causa, com base nos critérios anteriormente descritos.

O Serviço Municipal de Proteção Civil é avisado através do rádio, instalado na Sala de Controlo e no gabinete do Diretor de Qualidade Segurança e Ambiente (Diretor de Emergência), que permite a comunicação direta com o SMPC, sediado nos Bombeiros de Estarreja, devendo ser fornecidas as informações indicadas:

- Categoria do acidente;
- Tipo de acidente ocorrido / tipo de fenómeno perigoso;
- Condições meteorológicas, quanto a velocidade e direção do vento;

- Número de eventuais acidentados e a sua gravidade;
- Áreas em risco no interior e na envolvente do estabelecimento, com indicação da categoria de impacto;
- Situação do acidente.

Durante a emergência o Coordenador da Emergência mantém contacto frequente, via radio portátil, com os responsáveis do Serviço Municipal de Proteção Civil. O mesmo acontece sempre que as condições do sinistro evoluam para um cenário mais preocupante (alteração previsível do impacto ou situação do acidente) e/ou seja necessário a chamada de outros meios de socorro externo, para além dos que já estejam presentes.

Caso o rádio portátil do SMPC esteja ocupado por um período longo, ou haja uma falha nas comunicações, o aviso terá que ser feito telefonicamente.

4.1.5. Comunicações com estabelecimentos vizinhos

A comunicação de uma emergência aos estabelecimentos vizinhos é efetuada pelo Coordenador da Emergência, após análise do acidente em causa, caso seja previsível que o acidente em causa possa vir a afetar o normal funcionamento de algum destes estabelecimentos vizinhos, ou caso seja tomada a decisão de ativação do Protocolo de Atuação em caso de Emergência Estabelecidos com Entidades Vizinhas, de forma a solicitar reforço de meios no combate ao acidente em causa.

Esta comunicação de emergência é feita usando preferencialmente os rádios portáteis, no canal específico que permite a ligação com os estabelecimentos vizinhos e com os principais intervenientes:

- Serviço Municipal de Proteção Civil;

- Bombeiros Voluntários de Estarreja;
- GNR (Ovar) e GNR (Estarreja);
- Bondalti Chemicals;
- DOW;
- Ar Líquido.

Caso esta via de comunicação não se encontre operacional, a comunicação deve ser feita via telefone.

Existe um protocolo de ajuda mútua estabelecido entre a CIRES e as empresas vizinhas no Complexo Químicos de Estarreja, com vista a assegurar ajuda mútua em caso de emergência que afete uma das empresas. Este pacto tem 3 linhas de orientação fundamentais:

- Partilha interempresas de meios técnicos de combate a emergência;
- Colaboração interempresas no treino e formação de pessoal em combate a emergência;
- Reforço de meios humanos para combate em situações de emergência.

O protocolo em causa tem os seguintes objetivos:

- Minimizar os efeitos duma emergência para as pessoas, empresas e comunidade;
- Reduzir os danos nos equipamentos, instalações e prejuízos por interrupção dos negócios;
- Reduzir os impactos ambientais das situações de emergência;
- Otimizar a cooperação interempresas do Complexo Químico de Estarreja;
- Estabelecer as bases ideais para proporcionar uma ajuda mútua eficaz quando for necessária;

- Não interferir com os Planos de Emergência Internos das empresas.

As empresas aderentes ao protocolo em causa são: CIRES, DOW, BONDALTI CHEMICALS, Air Liquide e TJ Amaral (transportes).

Existe um protocolo de colaboração entre a CIRES e a empresa TJ Amaral com vista a assegurar, no caso de ocorrer uma anomalia grave do sistema de arrefecimento do armazém de iniciadores da CIRES em que não seja possível assegurar a reparação em tempo útil, a disponibilização no prazo máximo de 12 horas de dois camiões frigoríficos para armazenagem temporária em condições seguras do conteúdo das arcas.

5. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Neste estudo, foram abordados eventuais ocorrências de acidentes de explosão com o processo de secagem, por recirculação de calor e formas de mitigação.

No que respeita ao processo de secagem, por recirculação de calor, podemos concluir que a temperatura de secagem, a taxa de ventilação, a carga do secador e a concentração de oxigénio, têm um impacto distinto no risco de explosão do equipamento de secagem.

No entanto, o controlo da concentração de oxigénio parece ser a única medida possível para a melhoria de segurança durante o processo de secagem.

Uma das melhorias de segurança, com bastante sucesso, é a adoção de um sistema de eliminação de oxigénio ou a manutenção dos níveis de concentração de oxigénio, abaixo de 7,0 % em volume.

A introdução de azoto manterá, por seu turno, a atmosfera de gás não explosivo dentro da câmara de secagem. O duplo circuito de exaustão com função automática de alívio de pressão, contribuirá para o controlo da concentração de oxigénio na câmara e proporcionará que a pressão de serviço também não exceda os 0,10 MPa.

A aplicação de sistemas de deteção de monóxido de carbono (CO) e de sensores de temperatura tornar-se-á também imprescindível.

No que concerne aos sistemas de secagem que processam partículas e pós combustíveis e apresentam riscos de explosão inerentes, cada tipo de sistema tem os seus próprios recursos que são valiosos para processar diferentes tipos de produtos e, essas diferenças, apresentam problemas no desenvolvimento de estratégias adequadas de prevenção e mitigação.

Mesmo com todas as diferenças, existem semelhanças que podem ser aplicadas em todas as indústrias que usam esses sistemas. É necessária atenção

aos pequenos detalhes e às diferenças nos sistemas individuais para garantir que cada um opere da maneira mais segura possível.

Torna-se relevante mencionar que a empresa CIREs – Estarreja, face à implementação de procedimentos inovadores e eficazes, à cultura de segurança mantida e aplicada pela gestão de topo e, fundamentalmente devido à formação e treino dos seus colaboradores, tem evitado a ocorrência de acidentes que, de outra forma, poderiam tomar proporções catastróficas.

Nesse sentido, entende-se que o estudo de caso, descrito no presente trabalho de dissertação, para além de ser um exemplo de formas de mitigação, nomeadamente no que diz respeito a explosões em secadores industriais, poderá também servir como “ferramenta”, quer na implementação de medidas de proteção para outras empresas, que na sua utilização em futuros estudos.

Ao longo do presente trabalho, a abordagem da mitigação de acidentes de explosão, implicou a enumeração de diversos procedimentos e regras que, quando respeitados e bem aplicados, permitirão evitar ou minimizar a probabilidade da sua ocorrência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbasi, T. e Abbasi, A., (2007). **Dust explosions – Cases, causes, consequences, and control**. Journal of Hazardous Materials, 140: 7-44.

Amyotte, P., Pegg, M., (1989). **Lycopodium dust explosions in a Hartmann bomb: effects of turbulence**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Volume 2: 87-94.

Amyotte, P., Pegg, M., Khan, F., (2009). **Application of inherent safety principles to dust explosion prevention and mitigation**. Process Safety and Environmental Protection. Volume 87: 35-39. January 2009.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582008000839>.

Bartknecht, W., (1981). **Explosions: Course Prevention Protection**. Ciba-Geigy AG. Basel. Switzerland.

Brown, Lawrence S., Holmes, Thomas A., (2011). **Chemistry for Engineering Students**. Belmont: Brooks/Cole.

Campos, J.A., (1984). **A Explosão de Suspensões de Poeiras**, Publicação apresentada na 1ª reunião da secção Portuguesa do Instituto de Combustão, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Secção Autónoma de Engenharia Mecânica.

Cashdollar, A., Hertzberg, M., Zlochower, I., (1988). **Flammability limit measurements for dusts and gases: Ignition energy requirements and pressure dependences**. Symposium (International) on Combustion. Volume 21: 303-313.

Cashdollar, K. e Chatrathi, K., (1992). **Flammability limit measurements for dusts in 20-L and 1-m³**. Pittsburgh Research Laboratory, National Institute for Occupational Safety and Health. Pittsburgh. USA.
file:///C:/Users/AESB-1000293001/Desktop/cdc_8780_DS1.pdf.

Cashdollar, K. L., (1994). **Flammability of Metals and Other Elemental Dust Clouds**, Process Safety Progress. Volume 13, 139-145.

Cashdollar, K. L., (1996). **Coal dust explosibility**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 65-76.

Cashdollar, K.L., (1998). **Dust Explosions Overview**. Proceedings of the International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions. Eight International Colloquium on Dust Explosions. Schaumburg, Illinois, 21-25 September, 1-25.

Cashdollar, K., (1996). **Coal dust explosibility**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Volume 9: 65-76.

Chen, T., *et al.*, (2017). **Micronization and nanosizing of particles for na enhanced quality of food**: A review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition.

<https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1236238>.

Crowl, D., Louvar, J., (2001). **Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications**. 2nd Edition, Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences. New Jersey.

<https://ch506npc.files.wordpress.com/2019/08/chemical-process-safety-2nd-ed-daniel-a-crowl-joseph-f-louvar.pdf>.

Dahoe, A., Peeg, M., Cant, R., Scarlett, B., (2001). **On the transient flow in the 20-liter explosion sphere**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 14(6):475-487.

Dhiman, A. e Prabhakar, P., (2021). **Micronization in food processing: A comprehensive review of mechanistic approach, physicochemical, functional properties and self-stability of micronized food materials**. Journal of Food Engineering: Volume 292, March 2021, 110248.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877420303393>.

Dobashi, R. (2008). **Risk of dust explosions of combustible nanomaterial**. Department of Chemical System Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/170/1/012029/pdf>.

Eckhoff, Rolf K., Geir H. Pedersen, and Tommy Arvidsson (1988). **Ignitability and explosibility of polyester/epoxy resins for electrostatic powder coating**. Journal of hazardous materials 19.1 (1988): 1-16.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0304389488850702>.

Eckhoff, R. K., (1997). **Dust Explosions in the Process Industries**, 2nd Edition, Butterworth. Heinmann, Oxford.

Eckhoff, R. K., (2003). **Dust Explosions in the Process Industries**, 3rd Edition, Butterworth. Heinmann, Oxford.

Enamoto, H. e Matsuda, T., (1986). **Encyclopedia of Fluid Mechanics**, Volume 4, chap. 19 Solids and Gas-solids flow. Gulf Publishing Company. New York.

Glassman, I., (1996). **Explosive and General Oxidative Characteristics of Fuels: Combustion (Third edition)**. Pags. 57-118. Academic Press. San Diego. Califórnia. USA

<https://doi.org/10.1016/B978-012285852-9/50004-7>.

Gummer, J., Lunn, G., (2003). **Ignitions of explosive dust clouds by smouldering and flaming agglomerates**. J. Loss Prevent. Process Ind. 16, 2003, pp. 27–32.

Guo, L., Xiao, Q., Zhu, N., Wang, Y., Chen, X., and Xu, C. (2019). **Comparative studies on the explosion severity of different wood dusts from fiberboard production**. BioRes. 14(2), 3182-3199.

<https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/comparative-studies-on-the-explosion-severity-of-different-wood-dusts-from-fiberboard-production/>.

Hertzberg, M., Cashdollar, K., e Zlochower, I., (1986). **Flammability Limit Measurements for Dusts and Gases: Ignition Energy Requirements and Pressure Dependences**. Twenty-First Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, 303-313.

Hertzberg, M. e Cashdollar, K., (1987). **Industrial Dust Explosions**. ASTM STP 598. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1987, pp. 5-32.

Hertzberg, M. e Zlochower, I., (1990). **Devolatilization Rates and Interparticle Wave Structures During the Combustion of Pulverized Coals and Polymethylmethacrylate**, 24th Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, 1247-1255.

Hertzberg, M., Cashdollar, K. e Zlochower, I., (1992). **Explosive Dust Cloud Combustion**. 24th Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, 1837-1843.

ISSA. **Determination of the Combustion and Explosion Characteristics of Dusts**. International Social Security Agency, Mannheim, 1998.

Khazkad, N., Khan F., Amyotte P., (2012). **Dynamic risk analysis using bow-tie approach**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Volume 104: 36-44.

Kausar, A., (2014). **Formation and Properties of Poly (vinyl butyral-co-vinyl alcohol-co-vinyl acetate) / Polystyrene Composites Reinforced with Graphene Oxide-Nanodiamond**. American Journal of Polymer Science 2014, 4(2): 54-62.

<https://asset-pdf.scinapse.io/prod/19898282/19898282.pdf>.

Kuracina, R., Sabová, S., Buranská, E., (2109). **Study of Explosion Characteristics of the Wheat Flour dust Clouds in Dependence of Particle Size Distribution**. 2019: Voluma 27, Number 44. Slovak University of Technology in Bratislava.

https://www.researchgate.net/profile/RichardKuracina/publication/335732514_Study_of_Explosion_Characteristics_of_the_Wheat_Flour_Dust_Clouds_in_Dependence_of_the_Particle_Size_Distribution.

Lees, F., (1986). **The Safe Handling of Chemicals in Industry**, Volume 3: P.A. Carson & C.J. Mumford. Longman Group Ltd. Butterworths, Londres.

Lewis, B. & Von Elbe, G., (1987). **Combustion, Flames and Explosions of Gases**, 3rd ed., Academic Press. New York.

Mu, J. *et al.*, (2022). **Study on the characteristics and influencing factors of micro/nano carbon material dust explosions**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries: Volume 77, July 2022, 104757.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950423022000341>.

Nagy, J., Verakis, H., (1983). **Development and Control of Dust Explosions**. Routledge. New York.

Pinho, C., (2012). **Caraterização da ignição térmica do pó da casca do pinheiro**. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto. Portugal.

<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/68237/1/000153932.pdf>.

Proust, C., (1996). **Dust explosions in pipes: A review**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 9: 267-277.

[https://doi.org/10.1016/0950-4230\(96\)00010-1](https://doi.org/10.1016/0950-4230(96)00010-1).

Rocha, V. (2016). **Explosão de pó em indústrias – Estudos de Casos**. Dissertação de mestrado em Tecnologia de Processos Químicos. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Brazil.

<http://186.202.79.107/download/explosao-de-po-em-industrias-estudos-de-casos.pdf>.

Semenova, O., (2005). **Estudo da explosão o pó de casca do pinheiro bravo**. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto. Portugal.

Sickler, R., (1992). **Explosive Principles: An Essential Guide**. Paladin Press: Colorado. USA.

Silveira, F., (2017) **Pressão máxima num recipiente de nitrogénio**. CREF – Centro de Referência para Ensino de Física. Instituto de Física da Universidade Federal Rio Grande do Sul. Brasil.

<https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=pressao-maxima-em-um-recipiente-com-nitrogenio-liquido>.

Tomaz, V., Góis, J., (2019). **Explosões de poeiras: uma visão geral**. 5º CILASCI – Congresso Ibero-Latino-Americano em Segurança contra Incêndio, Porto, Portugal, 15 a 17 de julho de 2019.

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

Yuan, Z., Khazkad, N., Khan F., Amyotte P., (2015). **Dust explosions: A threat of the process industries**. Process Safety and Environmental. Volume 98: 57-71.

Zhao, J. *et al.*, (2020). **Explosive property and combustion kinetics of grain dust with different particle sizes**. School of Resource Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, 710055, PR China.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844020303029>.

ZIPF JR., K. *et al.*, (2007). **Effects of blast pressure on structures and the human body**. NIOSH-125.
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/versions?doi=10.1.1.691.7547>.

LEGISLAÇÃO, REGULAMENTOS E NORMAS APLICÁVEIS

ASTM E1491: 1997, Standard Test Method for Minimum Autoignition Temperature of Dust Clouds, American Society for Testing and Materials, Coshohocken, PA, 1996;

ASTM E1226: 2019, Standard Test Method for Explosibility of Dust Clouds, American Society for Testing and Materials, Coshohocken, PA, 2019;

Decreto-Lei nº 236/2003 de 30 de Setembro - Transposição para o Direito Nacional da Directiva 1999/92/CE;

Decreto-Lei n.º 243/86, de 20 de agosto (Aprova o Regulamento Geral de Higiene e Segurança do Trabalho nos Estabelecimentos Comerciais, de Escritório e Serviços);

Decreto-Lei nº DL 111-C/2017 de 31 de Agosto - Transposição para o Direito Nacional da Directiva 2014/34/UE;

Directiva 2014/34/UE - Aparelhos e sistemas de protecção destinados a ser utilizados em atmosferas potencialmente explosivas;

Directiva 1999/92/CE - Prescrições mínimas destinadas a promover a melhoria da protecção da segurança e da saúde dos trabalhadores susceptíveis de serem expostos a riscos derivados de atmosferas explosivas;

Directivas 94/9/CE e 1999/92/CE - Atmosferas explosivas;

EN 60079-0 - Material eléctrico para atmosferas explosivas - Parte 0 - Regras Gerais;

EN 60079-10-1 - Atmosferas Explosivas - Parte 10-1: Classificação de Áreas - Atmosferas Explosivas Gasosas;

EN 60079-19: 2020 - Atmosferas explosivas - Parte 19: Reparo, revisão e recuperação de equipamentos;

EN 1127-1 - Atmosferas explosivas, prevenção de explosões e protecção. Conceitos básicos e metodologia;

EN 13094:2020 - Tanks for the transport of dangerous goods - Metallic gravity-discharge tanks - Design and construction;

EN 14034-1:2004+A1:2011 - Determination of explosion characteristics of dust clouds - Part 1: Determination of the maximum explosion pressure p_{max} of dust clouds;

ISO 6184-1:1985 - Explosion protection systems - Part 1: Determination of explosion indices of combustible dusts in air;

Lei n.º 102/2009, 10 de Setembro - Regime jurídico da promoção da segurança e saúde no trabalho;

Lei n.º 3/2014 de 28 de Janeiro - Procede à segunda alteração à Lei n.º 102/2009, de 10 de setembro, que aprova o regime jurídico da promoção da segurança e saúde no trabalho;

Portaria n.º 341/97, de 21 de Maio - Sistemas de proteção.