

ALEXANDRE LANUTTI CHRISTINO

ESTUDO DE DETECÇÃO DE FAÍSCA NA PROTEÇÃO
CONTRA INCÊNDIO NAS INSTALAÇÕES DE UMA INDÚSTRIA
REFORMADORA DE PNEUS DE CAMINHÕES E TRATORES

São Paulo

2014

ALEXANDRE LANUTTI CHRISTINO

ESTUDO DE DETECÇÃO DE FAÍSCA NA PROTEÇÃO
CONTRA INCÊNDIO NAS INSTALAÇÕES DE UMA INDÚSTRIA
REFORMADORA DE PNEUS DE CAMINHÕES E TRATORES

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Especialista em Engenharia de
Segurança do Trabalho

São Paulo
2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Christino, Alexandre Lanutti

Estudo de detecção de faísca na proteção contra incêndio nas instalações de uma indústria reformadora de pneus de caminhões e tratores / A.L. Christino. -- São Paulo, 2014.

84 p.

Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. Incêndio (Proteção) 2. Detecção de Faísca 3. Instalações industriais I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo que me deu até este momento, a minha família pelo incentivo e apoio e aos professores por compartilhar parte de seus conhecimentos, estudos e experiências durante todo o curso.

À direção e funcionários da empresa analisada, e a todos que contribuíram de alguma forma para a elaboração deste trabalho.

RESUMO

Todos os anos ocorrem inúmeros acidentes causados por incêndios e explosões em instalações industriais em todo o mundo, deixando um rastro de destruição e consequentemente pessoas feridas, mutiladas, mortas, instalações fabris destruídas, e em algumas situações causadas por incêndio ou explosão de pós. Esta monografia tem como objetivo estudar, identificar e avaliar a concentração, o transporte e o comportamento do pó no interior do sistema de exaustão das instalações de uma indústria reformadora de pneus de caminhões e tratores. A escolha do tema é justificada pela própria vivência em instalações industriais de reforma de pneus de caminhões e tratores, moveleira e de logística, onde se constata a utilização de sistema de detecção e combate a incêndio conforme determina as Normas do Corpo de Bombeiros, dos Órgãos Municipais, Estaduais e Federais, das Associações de Normas Técnicas, sistema este que detecta e combate o incêndio em uma etapa mais avançada. Por isso, o estudo visa detectar e extinguir, qualquer possibilidade de incêndio e explosão em toda a extensão dos dutos de exaustão, de toda a linha de produção utilizando detectores de faísca e bicos de extinção na indústria de reforma de pneus de caminhões e tratores. A indústria estudada já dispõe de sistema de detecção e combate a incêndio e alvará de vistoria conforme determina a legislação vigente.

Palavras chave: Incêndio. Proteção contra incêndio. Detecção de Faísca.
Segurança do trabalho. Instalações industriais.

ABSTRACT

Every year there are numerous accidents caused by fires and explosions in industrial facilities around the world, leaving a trail of destruction and consequently injured, maimed, killed, destroyed manufacturing facilities, and in some situations caused by fire or dust explosion. This monograph aims to study, identify and assess the concentration, transport and the behavior of the powder inside the premises of a tire retreading industry of trucks and tractors exhaust system. The theme itself is justified by experience in industrial facilities retreading truck and tractors, furniture and logistics, where we see the use of detection and firefighting system conformity with the rules of the Fire Department, the bodies municipal, State and Federal, Technical Standards Associations, a system that detects and fighting fire in a more advanced stage. Therefore, the study aims to detect and extinguish any possibility of fire and explosion on the entire length of the exhaust duct, the entire production line using spark extinguishing nozzles and in the retreading of truck and tractor industry detectors. The industry already has studied detection and firefighting and permits the inspection system as required by current legislation.

Keywords: Fire. Fire protection. Spark detection. Safety. Industrial Installations.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1: Triângulo do fogo..... | 16 |
| Figura 2: Porosidade de partícula sólida..... | 18 |
| Figura 3: Efeito da área de superfície quente na ignição de diversas misturas de gases..... | 21 |
| Figura 4: Efeito da área da superfície quente e orientação sobre a ignição de misturas de 6% de metano no ar..... | 22 |
| Figura 5: Temperatura de um arco elétrico em função do arco de corrente..... | 23 |
| Figura 6: Teste MIT..... | 26 |
| Figura 7: Teste MIT..... | 27 |
| Figura 8: Teste MIT para camadas espessas..... | 28 |
| Figura 9: Temperatura da superfície versus espessura da camada de pó..... | 28 |
| Figura 10: Registro de tempo de pressão para uma explosão..... | 34 |
| Figura 11: Pentágono da explosão de poeiras..... | 30 |
| Figura 12: Evolução da pressão ao longo do tempo durante uma explosão de pó num recipiente fechado..... | 31 |
| Figura 13: Registro do tempo de pressão para uma explosão..... | 32 |
| Figura 14: Características de explosividade do pó – Pressão x Concentração..... | 35 |
| Figura 15: Características de explosividade do pó – Pressão x Tempo..... | 36 |
| Figura 16: Faixa de explosividade - medida experimental..... | 37 |
| Figura 17: K_{st} em função da matéria incombustível e de matérias voláteis..... | 39 |
| Figura 18: K_{st} como uma função do teor de matéria não combustível e uma fração de partícula $d < 75 \mu m$ | 39 |
| Figura 19: Esquema de curso da explosão em duto longo..... | 41 |
| Figura 20: Características de explosividade do pó – Pressão x Tempo..... | 42 |
| Figura 21: Faixa de explosividade - medida experimental..... | 44 |
| Figura 22: Equipamento com abertura para instalação do painel de explosão..... | 47 |
| Figura 23: Painel de explosão..... | 48 |
| Figura 24: Porta de explosão..... | 48 |
| Figura 25: Supressão de explosão..... | 50 |
| Figura 26: Sequência de atuação do sistema de isolamento mecânico de explosão.... | 51 |
| Figura 27: Detector de fumaça óptico..... | 52 |

| | |
|---|----|
| Figura 28: Detector de fumaça óptico..... | 53 |
| Figura 29: Detector de gás e chamas..... | 54 |
| Figura 30: Detector de chamas..... | 55 |
| Figura 31: Cone de visão para n-Heptano e n-Hexano..... | 56 |
| Figura 32: Cone de visão para o metano..... | 56 |
| Figura 33: Detector instalado no duto..... | 58 |
| Figura 34: Detecção e extinção de faísca..... | 59 |
| Figura 35: Bico extintor de faísca..... | 59 |
| Figura 36: Componentes do bico extintor de água..... | 60 |
| Figura 37: Unidade de elevação de pressão..... | 61 |
| Figura 38: Detector de faísca (normal)..... | 61 |
| Figura 39: Detector de faísca (para locais com luz ambiente)..... | 62 |
| Figura 40: Detector de faísca (para locais com alta temperatura)..... | 63 |
| Figura 41: Sistema de detecção de faísca..... | 64 |
| Figura 42: Planta baixa da empresa objeto de estudo..... | 68 |
| Figura 43: Planta baixa com <i>lay-out</i> do setor de produção..... | 69 |
| Figura 44: Exame inicial..... | 71 |
| Figura 45: Raspagem..... | 72 |
| Figura 46: Estrutura de pneu radial..... | 72 |
| Figura 47: Escareação..... | 73 |
| Figura 48: Colagem..... | 74 |
| Figura 49: Preenchimento e consertos..... | 74 |
| Figura 50: Cobertura..... | 75 |
| Figura 51: Vulcanização..... | 75 |
| Figura 52: Autoclaves – vulcanização..... | 76 |
| Figura 53: Exame final..... | 76 |

ANEXO

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Limite de explosividade..... | 84 |
|---|----|

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AIT | <i>Auto Ignition Temperature</i> |
| ASMT | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| AVCB | Atestado de Vistoria do Corpo de Bombeiros |
| CBPMESP | Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo |
| DIN | <i>Deutsches Institut für Normung</i> |
| DSC | <i>Differential Scanning Calorimetry</i> |
| FISQ | Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos |
| ISO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| MIT | <i>Minimum Ignition Temperature</i> |
| NFPA | <i>National Fire Protection Association</i> |
| NR | Norma Regulamentadora |
| USP | Universidade de São Paulo |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1. OBJETIVO | 15 |
| 1.2. JUSTIFICATIVA | 15 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA | 16 |
| 2.1. FOGO | 16 |
| 2.2. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS | 17 |
| 2.2.1. Influência das propriedades físicas dos materiais | 17 |
| 2.2.2. A porosidade das partículas sólidas | 17 |
| 2.2.3. Densidade de partícula sólida | 18 |
| 2.2.4. Umidade | 18 |
| 2.2.5. Estrutura química | 19 |
| 2.2.6. Formação de calor | 19 |
| 2.3. FONTES DE IGNIÇÃO | 20 |
| 2.3.1. Ignição – fontes externas | 20 |
| 2.3.1.1. Sólidos (partículas) quentes | 20 |
| 2.3.1.2. Ignição de gases por sólidos quentes | 21 |
| 2.3.1.3. Ignição de nuvens de poeira por sólidos quentes | 22 |
| 2.3.1.4 Chamas | 22 |
| 2.3.1.5. Corrente elétrica | 23 |
| 2.3.1.6. Eletricidade estática | 24 |
| 2.3.2. Auto-ignição | 25 |
| 2.3.3. Sensibilidade de ignição | 25 |
| 2.3.3.1. Temperatura mínima de ignição (MIT) | 25 |
| 2.3.3.2. Concentração mínima de explosividade (MEC) | 29 |
| 2.3.3.3. Energia mínima de ignição (MIE) | 29 |
| 2.4. RISCO DE EXPLOSÃO | 30 |
| 2.4.1. Condições essenciais para ocorrência da explosão | 30 |
| 2.4.2. Parâmetros da explosão do pó | 30 |
| 2.4.3. Pressão máxima de explosão (P_{max}) | 31 |
| 2.4.4. Taxa máxima de pressão de explosão $(dp/dt)_{max}$ | 32 |
| 2.4.5. Limite inferior de explosão | 32 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4.6. Explosão primária..... | 33 |
| 2.4.7. Explosão secundária..... | 33 |
| 2.4.8. Turbulência..... | 33 |
| 2.4.9. Válvula de alívio..... | 34 |
| 2.4.10. Supressão da explosão..... | 34 |
| 2.5. CARACTERÍSTICAS DE EXPLOSÃO..... | 34 |
| 2.5.1 Parâmetros de inflamabilidade..... | 34 |
| 2.5.2 Parâmetros de explosividade..... | 35 |
| 2.5.3 Propagação da explosão..... | 40 |
| 2.5.4. Dinâmica de explosões em dutos..... | 43 |
| 2.6. MEDIDAS DE PREVENÇÃO..... | 44 |
| 2.6.1 Limitação da emissão de poeira..... | 44 |
| 2.6.2. Limitação de fontes de ignição..... | 44 |
| 2.6.3. Explosões..... | 45 |
| 2.7. MEDIDAS DE PROTEÇÃO PASSIVA..... | 45 |
| 2.7.1. Instalações, materiais e equipamentos resistentes à pressão..... | 46 |
| 2.7.2. Acessibilidade..... | 46 |
| 2.7.3. Compartimentação..... | 46 |
| 2.8. MEDIDAS DE PROTEÇÃO ATIVA..... | 47 |
| 2.8.1. Redução da pressão de explosão (Ventilação)..... | 47 |
| 2.8.2. Supressão de explosão..... | 49 |
| 2.8.3. Sistema de isolamento mecânica da chama..... | 50 |
| 2.8.4. Detectores de fumaça..... | 51 |
| 2.8.4.1. Detectores ópticos de fumaça..... | 52 |
| 2.8.4.2. Detectores de fumaça de ionização..... | 53 |
| 2.8.5. Detectores de gás e chamas..... | 54 |
| 2.8.6. Detectores de chamas..... | 55 |
| 2.8.7. Detecção de faísca..... | 57 |
| 2.8.7.1. Bico extintor de faísca..... | 59 |
| 2.8.7.2. Detector de faísca..... | 61 |
| 2.8.7.3. Central de detecção e extinção de faísca..... | 63 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 66 |
| 3.1. ESTUDO DE CASO..... | 66 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2. INFORMAÇÕES DA EMPRESA..... | 66 |
| 3.3. CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO..... | 66 |
| 3.4. MATERIAL DE PESQUISA..... | 67 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 70 |
| 4.1. ENTREVISTA..... | 70 |
| 4.2. VERIFICAÇÃO..... | 71 |
| 4.3. DISCUSSÕES / RESULTADOS..... | 77 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 80 |
| 6. REFERÊNCIAS..... | 81 |
| 7. ANEXO..... | 84 |

1. INTRODUÇÃO

A reforma de pneus consiste na reposição da banda de rodagem do pneu desgastado pelo uso, sendo uma prática utilizada em vários países visando evitar o desperdício e também é uma forma de reaproveitar as carcaças dos pneus utilizados pelo setor de transporte, uma vez que estas carcaças são projetadas para ter uma sobrevida e suportar em torno de duas reformas. Na Comunidade Européia e no Japão, a reforma de pneus é considerada “indústria verde” e conta com incentivos para sua instalação e um grande estímulo à indústria de reciclagem, e faz parte da estatística de reciclagem nestes países.

O Brasil é 2º maior reformador de pneus do mundo, ficando atrás somente dos Estados Unidos. A indústria reformadora de pneus está regulamentada pela Portaria 444 de 19 de novembro de 2010, que regulamenta o segmento de reforma de pneus no quesito segurança para a linha automóvel e comercial (caminhão/ ônibus).

O processo de reforma de pneus é realizado em oito etapas, sendo a primeira o exame inicial, sucessivamente a raspagem, escareação, aplicação de cola, o preenchimento, a colocação de nova banda de rodagem, a vulcanização e o exame final. Durante o processo de reforma do pneu, nas etapas de raspagem e escareação são gerados resíduos de pó de borracha, os quais são transportados através de dutos cilíndricos (sistema de aspiração) até um silo para o armazenamento.

A etapa de aplicação de cola na carcaça do pneu é feita em uma cabine de pintura aberta provida de coifa. O produto utilizado é uma cola a base de n-hexano e diluída em solvente à base de nafta de petróleo, produtos esses com alto grau de inflamabilidade.

Em caso de um incêndio, um silo com grande volume lança uma enorme quantidade de energia, o que põe em perigo a integridade das pessoas e das instalações industriais. Além do fogo, o perigo de uma explosão de pó tem de ser levado em consideração, pois são partículas finas que estão contidas no material armazenado, que são produzidos por abrasão durante o processo de produção.

Quando estas partículas finas são dispersas no interior dos dutos do sistema de aspiração, no enchimento ou esvaziamento do silo, e eventualmente uma nuvem de pó é formada no interior do silo, basta encontrar uma fonte de ignição com energia suficiente para então ocorrer uma explosão de pó.

1.1. Objetivo

O objetivo desta monografia é estudar, identificar e avaliar a concentração de pós, o transporte e o comportamento do pó no interior do sistema de aspiração das instalações de uma indústria reformadora de pneus de caminhões e tratores, utilizando o sistema de detecção de faísca e os bicos de extinção na proteção contra incêndio.

1.2. Justificativa

A escolha do tema é justificada pela própria vivência em instalações industriais de reforma de pneus de caminhões e tratores, moveleiras e de logística, onde se constata a utilização de sistema de detecção e combate a incêndio conforme determinam as normas técnicas do Corpo de Bombeiros, dos Órgãos Municipais, Estaduais e Federais e ABNT, sistema este que, detecta e combate o incêndio em uma etapa mais avançada. Por isso este estudo visa conhecer formas de detectar e extinguir um incêndio já na criação da faísca, impossibilitando o início de um incêndio ou explosão em toda a extensão dos dutos (sistema de aspiração) e toda a linha de produção.

Durante o período de pesquisa verificou-se a falta de literatura, manuais técnicos e estudos sobre o tema explosão de pós em português, pois parte do material utilizado como base de pesquisa para elaboração dessa monografia foi em inglês. Na ABNT encontraram-se poucas normas técnicas sobre o assunto em português, sendo sua maioria em inglês e alemão.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. FOGO

Para iniciar um fogo são necessários três pré-requisitos: um material inflamável tem que se reunir com um oxidante (o oxigênio contido no ar ambiente) e uma fonte de ignição tem que atuar sobre a mistura. Esta relação é descrita pelo triângulo de fogo na Figura 1(USP, 2011).

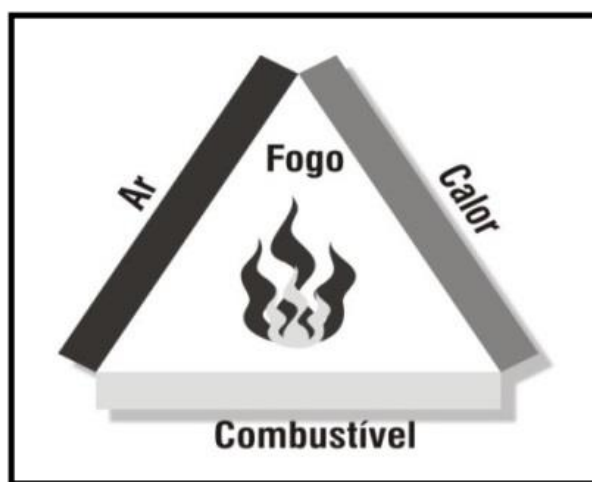


Figura 1 – Triângulo de Fogo
Fonte: Arquivo Pessoal

De acordo com ECKHOFF (2003) os elementos combustíveis suscetíveis de contribuir para o início de incêndio podem ser tanto os produtos produzidos, produtos armazenados ou materiais combustíveis necessários para fins operacionais (óleo, combustível, etc.) encontrados no interior das instalações industriais ou armazenados em áreas vizinhas ou em áreas especiais.

Com os produtos armazenados, a prevenção de incêndio deve levar em conta as características específicas dos produtos em relação aos incêndios. Para os diferentes tipos de operações durante o ciclo de produção realizadas nas instalações e nos equipamentos devem ser tomadas algumas ações de prevenção. Tais como evitar acúmulos desnecessários de produtos imediatamente adjacentes a áreas onde há um alto risco de ignição e garantir que os produtos sejam mantidos em um estado que limita o risco de auto-ignição.

As fontes de ignição são caracterizadas pela sua energia e sua duração de ação, e nem toda fonte de ignição é capaz de acender qualquer material inflamável ou mistura. Há uma forte relação entre a eficiência de uma fonte de ignição e a capacidade do material para atuar como um receptor da energia de ignição. A sensibilidade da ignição de um material depende da sua estrutura química e das propriedades físicas, como o tamanho das partículas, a porosidade e o teor de umidade.

2.2. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

As propriedades físicas e químicas dos materiais são relevantes para o comportamento do fogo, e os diferentes mecanismos de ignição dos materiais sólidos, entre eles a auto-ignição que foi revelado ser a causa de um grande número de incêndios no passado (KRAUSE, 2009).

2.2.1. Influência das propriedades físicas dos materiais

Ainda segundo KRAUSE (2009) os materiais quando expostos ao calor podem se decompor e liberar gases, dos quais, os mesmos queimam numa reação na fase gasosa. Os materiais sólidos ou os resíduos sólidos da reação de decomposição queimam por oxidação na superfície das partículas. Portanto, a taxa de reação da combustão depende da área de superfície das partículas, pois o oxigênio penetra entre os espaços vazios da partícula e dependendo do diâmetro alterarão o comportamento do fogo, e em um incêndio somente os poros livres (abertos) permitem a absorção do oxigênio na superfície da partícula.

2.2.2. A porosidade das partículas sólidas

As partículas sólidas têm poros externos (poros livres) e internos (poros cegos), e o diâmetro dos poros pode variar de alguns micrômetros a alguns nanômetros. Os poros livres estão abertos para a superfície da partícula e os externos estão envoltos no material sólido (poros cegos), a Figura 2 mostra um esboço da estrutura do poro de uma partícula sólida (KRAUSE, 2009).

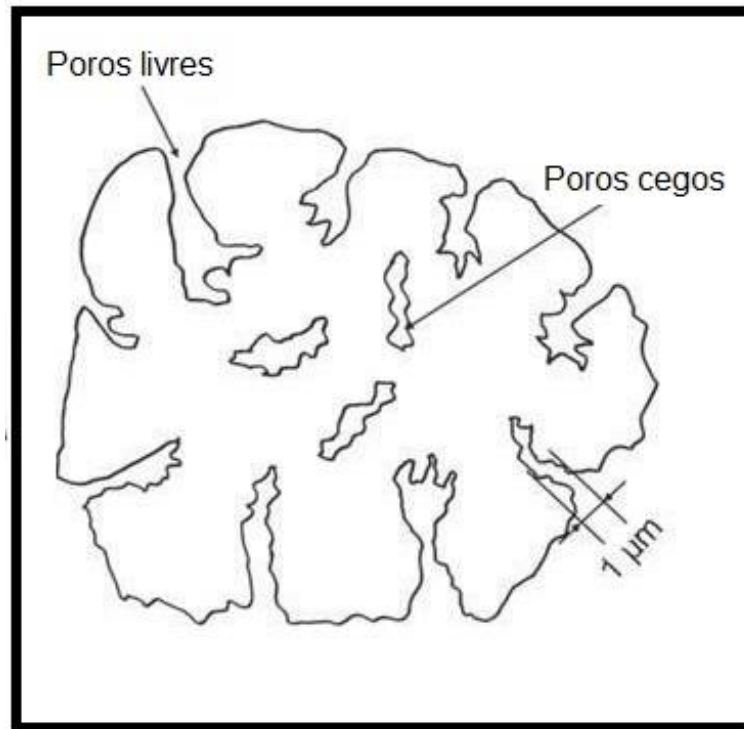


Figura 2 – Porosidade de partícula sólida.
Fonte: (KRAUSE, 2009)

A porosidade das partículas pode ser medida por um equipamento chamado porosímetro através da injeção de mercúrio líquido nos poros de partículas e também através de técnicas de absorção de gás, utilizando o nitrogênio ou o dióxido de carbono injetado dentro dos poros. A porosidade da partícula influencia na inflamabilidade, pois quanto maior a porosidade maior a superfície para reagir com oxigênio.

2.2.3. Densidade de partícula sólida

A densidade da partícula é a massa da partícula dividida pelo volume da partícula, que pode ser medida usando o picnômetro, onde a amostra da partícula é imersa num líquido e a extrusão do volume do líquido é medida (KRAUSE, 2009).

2.2.4. Umidade

A umidade desempenha um papel chave na possibilidade do material para inflamar, no entanto, se a fração de massa de água for igual ou superior 40% pode não inflamar.

Abaixo desse teor de água a combustão poderia ser iniciada de forma lenta quando comparado com as amostras secas, devido à evaporação da água. Portanto o grau de teor de água interfere na propagação do fogo, porque o calor fornecido por uma fonte de ignição ou produzido por uma reação exotérmica é completamente absorvido pela água.

Outro efeito ocorre quando o material relativamente seco é molhado sem ser encharcado, pois quando a água é absorvida pela superfície da partícula, o calor de absorção é libertado e isto leva a um aumento da temperatura do material o que pode levar a uma auto-ignição (KRAUSE, 2009).

2.2.5. Estrutura química

De acordo com BARTON (2002) o comportamento dos materiais em um incêndio, também é influenciado por suas propriedades químicas e a capacidade destes materiais para reagir com o oxigênio liberando calor. Existem diferentes testes de laboratório para avaliar a inflamabilidade dos materiais.

2.2.6. Formação de calor

Os incêndios são dominados por reações exotérmicas, apesar de algumas reações serem endotérmicas.

A reação exotérmica é uma reação química cuja energia é transferida de um meio interior para o meio exterior, assim aquecendo o ambiente.

A reação endotérmica é uma reação química cuja energia total dos seus produtos é maior que a de seus reagentes, ou seja, ela absorve energia na forma de calor. A unidade do calor é J/mol e os elementos químicos e moléculas de gases monoatômicos tem um valor de calor igual zero e outras têm um valor de calor negativo.

O poder calorífico é a quantidade de energia por unidade de massa liberada na oxidação de um determinado combustível.

Em segurança contra incêndios a carga de incêndio é usada para estimar a liberação de calor de um incêndio. Este é o valor calorífico bruto multiplicado com a massa total do material armazenado e dividido pelo volume da instalação de armazenamento (ECKHOFF, 2003).

2.3. FONTES DE IGNIÇÃO

A natureza do material deve ser considerada a fim de compreender o potencial de ignição, e em geral há três tipos de substâncias susceptíveis de ignição, sendo os gases inflamáveis ou combustíveis, as nuvens de poeira e a camada estável de material granular (BARTON, 2002).

As fontes de ignição são divididas em duas classes, sendo as externas (fontes de calor) e a auto-ignição (KRAUSE, 2009).

2.3.1. Ignição - Fontes externas

Segundo KRAUSE (2009) uma fonte externa de ignição pode ser qualquer fonte de energia suficiente para ativar a combustão de um determinado material. A questão de saber se uma determinada fonte de energia será suficiente para acender uma determinada substância não é fácil de responder, no entanto é essencial saber como a energia está sendo entregue.

Também devem ser consideradas as características individuais de cada fonte de ignição, podendo ser elas as altas temperaturas ambientais (dependendo da substância), os sólidos quentes, forças mecânicas (choque, impacto, vibração e pressão), chamas, corrente elétrica e eletricidade estática entre outras.

2.3.1.1. Sólidos (partículas) quentes

Ainda segundo KRAUSE (2009) os sólidos quentes podem atuar como uma fonte de ignição para gases, nuvens de poeira e camadas assentadas. Na prática, um sólido quente pode surgir como, uma fagulha de metal, resíduos da abrasão de matérias, devido a uma quebra e/ou falha de alguma parte de uma máquina ou devido ao

aquecimento elétrico.

2.3.1.2. Ignição de gases por sólidos quentes

Em alguns estudos realizados por KRAUSE (2009), têm apontado para a necessidade de haver altas temperaturas para inflamar um gás por meio de um sólido quente, pois a temperatura necessária deverá ser mais elevada do que a AIT (temperatura de auto-ignição) da mistura combustível-oxidante.

A área da superfície quente é crucialmente importante, e não apenas a sua temperatura, e isto é mostrado na Figura 3 para diversos gases, e na Figura 4 mostra os resultados para o metano, que se comporta um pouco diferente de outros gases.

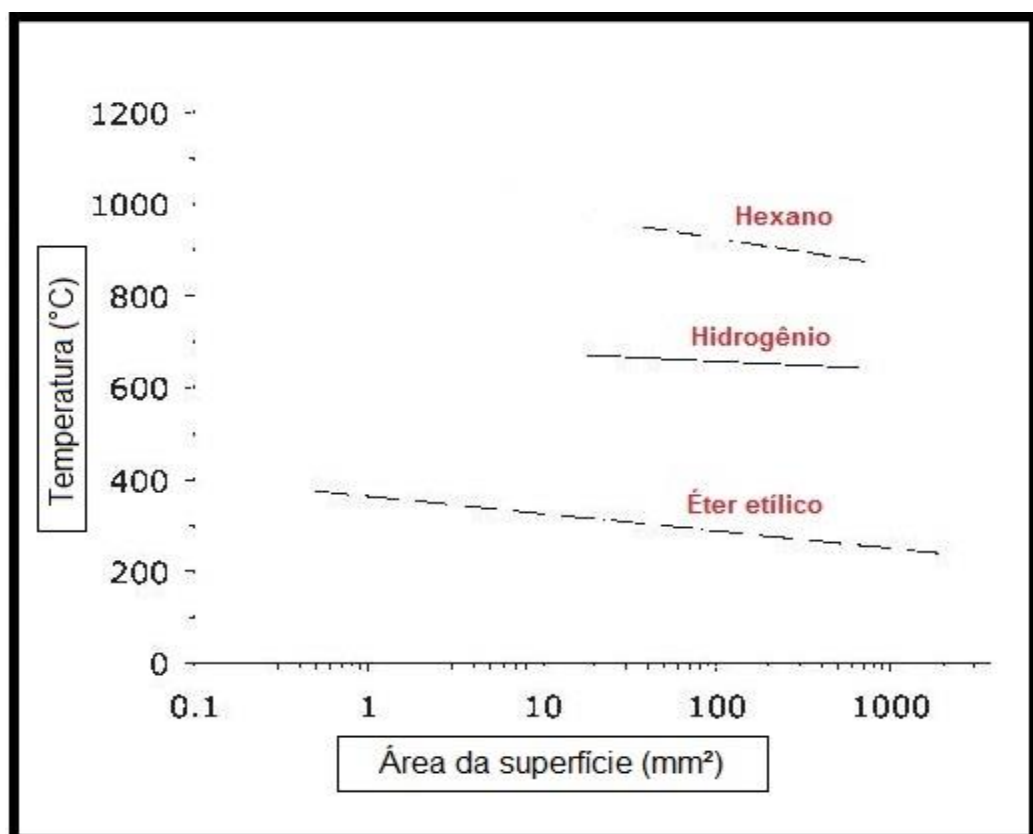


Figura 3 - Efeito da área de superfície quente na ignição de diversas misturas de gases.
Fonte: (KRAUSE, 2009)

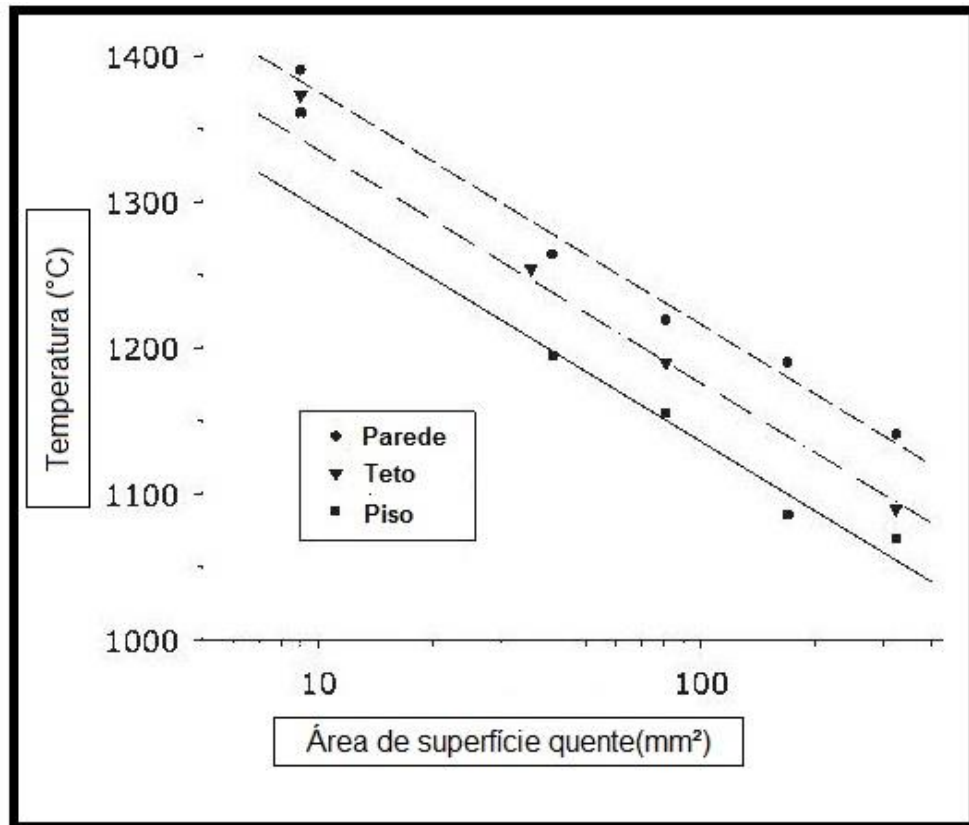


Figura 4 - Efeito da área da superfície quente e orientação sobre a ignição de misturas de 6% de metano no ar.
Fonte : (KRAUSE, 2009)

2.3.1.3. Ignição de nuvens de poeira por sólidos quentes

As nuvens de poeira são inflamadas por superfícies quentes, e para isso, não são necessárias áreas muito grandes ou altas temperaturas. Uma faísca é um tipo de sólido quente uma vez que é simplesmente uma partícula incandescente criada por moagem, abrasão, impacto ou atividades semelhantes (BARTON, 2002).

2.3.1.4. Chamas

A chama é uma fonte de ignição para gases, nuvens de poeira, líquidos e sólidos. Uma pequena chama requer uma exposição maior para inflamar um material sólido, mas infelizmente não existe nenhuma teoria disponível que se possa prever a resposta de um sólido para a aplicação de uma pequena chama.

As nuvens de pó, os líquidos e sólidos também podem ser queimados sem aplicação direta de uma chama, mas pelo fluxo de calor a partir de um objeto de

queima. Este é um mecanismo de fogo importante em algumas indústrias, mas não é um dos cenários de ignição primários que precisam ser considerados para os silos. Um incêndio perto do silo, no entanto, deve ser visto como um perigo extremo e ignição dos materiais depositados nele (KRAUSE, 2009).

2.3.1.5. Corrente elétrica

De acordo com ECKHOFF (2003) a corrente elétrica é considerada uma fonte de ignição para substâncias em qualquer estado, gasoso, nuvem de poeira, líquido ou sólido. Os mecanismos mais importantes pelos quais a ignição pode ocorrer são os arcos voltaicos ou faíscas, e o aquecimento localizado dos condutores elétricos. Um arco elétrico que atravessa o ar eleva a temperatura aproximada de 6500K como mostra a Figura 5.

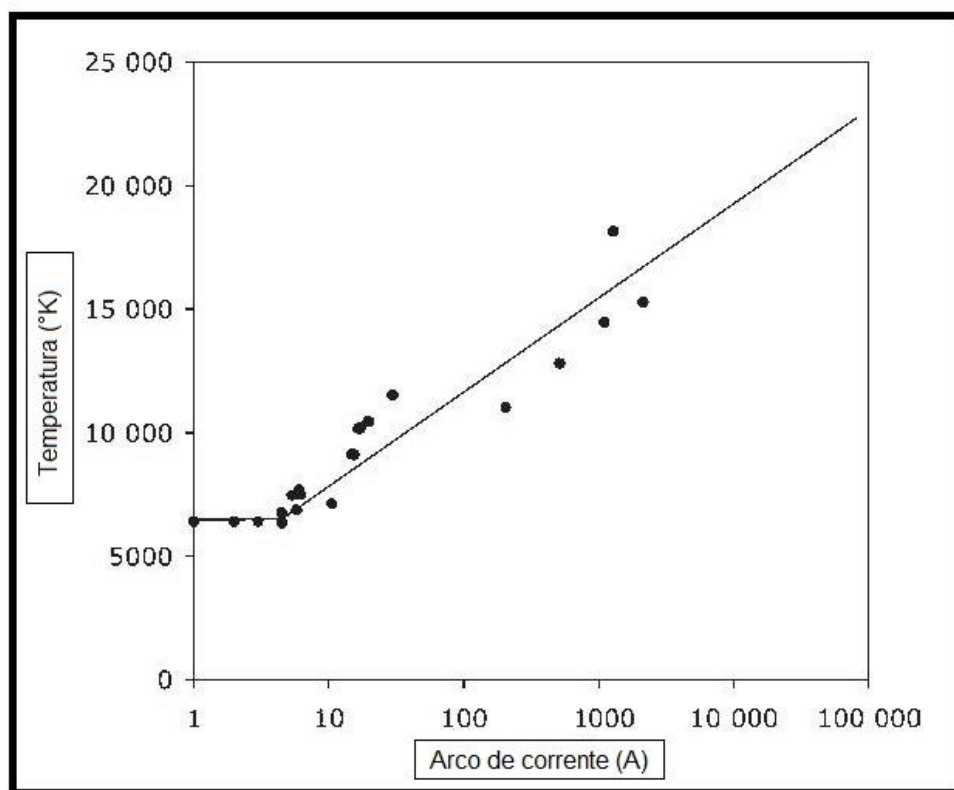


Figura 5 - Temperatura de um arco elétrico em função do arco de corrente.
Fonte: (ECKHOFF, 2003)

Para KRAUSE (2009) todas as substâncias inflamáveis têm temperaturas de ignição muito baixas, no entanto, não implica que um arco elétrico é 100% a garantia de que vá acender um determinado combustível.

Se um objeto de grande massa é introduzido em um arco elétrico de baixa potência, o arco pode simplesmente ser extinto.

A faísca é diferente de um arco elétrico, enquanto a faísca elétrica é uma descarga transiente, o arco elétrico é uma descarga contínua. Assim, um arco pode inflamar uma mistura de gás inflamável, enquanto uma faísca elétrica pode ser de baixa intensidade de energia que deixe de provocar a ignição, mas vale ressaltar que os valores necessários para inflamar misturas de gases inflamáveis são muito baixos.

O aquecimento localizado de condutores elétricos pode ser intencional ou devido a uma falha (sobrecarga e curto-circuito). O aquecimento intencional inclui dispositivos tais como resistências para aquecimento e alguns tipos de lâmpadas elétricas.

2.3.1.6. Eletricidade estática

ECKHOFF (2003) diz que a eletricidade estática pode provocar a ignição devido à acumulação de carga e de descarga posterior, o que pode ser suficiente para provocar o colapso de ar ou outro meio de isolamento.

A energia máxima normalmente alcançada em uma descarga de corona não é muito mais que 0,01mJ, teoricamente suficiente para acender os gases mais inflamáveis. Descargas corona são muitas vezes utilizadas em processos e máquinas como uma medida de segurança para diminuir o acúmulo de carga.

A descarga é capaz de ocorrer devido à distorção do campo elétrico introduzido pelo eletrodo, que no local aumenta o campo acima do seu valor normal.

Uma descarga escova é uma descarga de baixo consumo energético e os estudos experimentais indicam que é necessária uma tensão mínima de cerca de 20-25 KV.

Além disso, considera-se que as descargas acima de 60 KV se limitam as experiências de laboratório e não são susceptíveis de ocorrer no dia a dia.

Uma descarga escova atinge cerca de 3,6 mJ de calor, enquanto a nuvens de poeira que têm uma ignição a partir 1mJ, mas a maioria dos estudos apontam que as descargas de escova não inflamam as nuvens de poeira, desde que a nuvem não seja uma mistura de gás e pó.

2.3.2. Auto-ignição

O processo de auto-ignição ocorre quando um dado material entra em contato com o oxigênio a uma determinada temperatura, e independente de qualquer fonte de calor entra em combustão e é caracterizado pelos efeitos físicos de um incêndio (BARTON, 2002).

2.3.3. Sensibilidade de ignição

2.3.3.1. Temperatura mínima de ignição (MIT)

A temperatura mínima de ignição (MIT) é a menor temperatura onde se inicia o processo de ignição, e ela determina se uma fonte de calor é capaz de dar início ao processo ou não (KRAUSE, 2009).

A fim de determinar esses valores realiza-se um ensaio de acordo com a Norma (IEC 61241-2-1), que pode ser feito tanto com uma nuvem de pó ou numa camada de pó. Onde o dispositivo utilizado para o ensaio é constituído por um cilindro vertical onde o seu interior é aquecido por uma resistência elétrica a uma determinada faixa de temperatura.

Durante o ensaio aumenta-se gradativamente a temperatura até o aparecimento de chamas, onde se torna evidente a ignição a uma determinada temperatura (Figura 6).

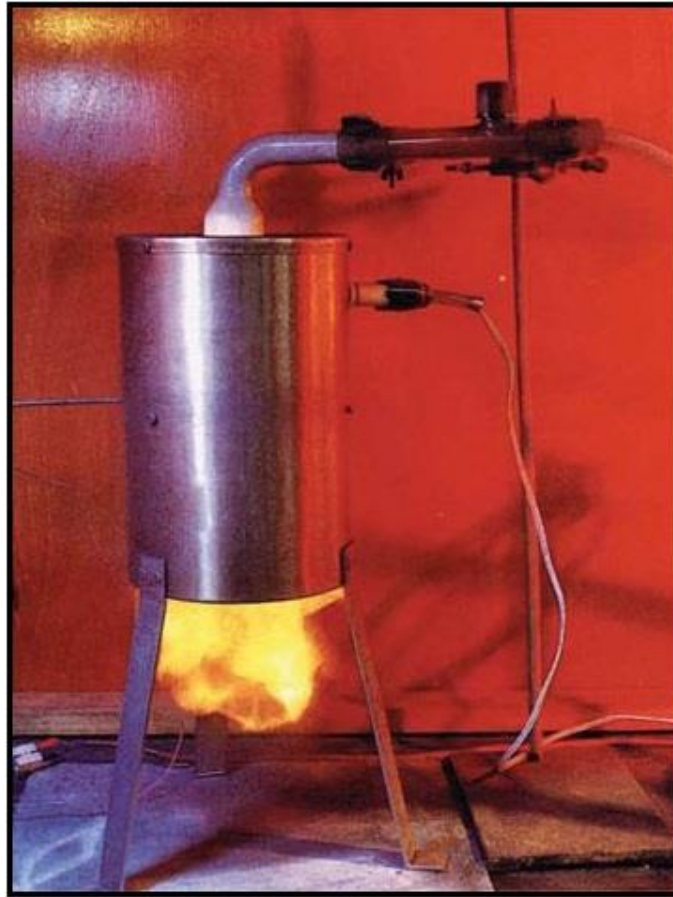


Figura 6 - Teste MIT
Fonte: (KRAUSE, 2009)

Também de acordo com a Norma (IEC 61241-2-1), pode ser utilizada outra forma de ensaio, onde se utiliza uma placa metálica cuja temperatura pode ser alterada, na qual o pó é depositado formando uma camada com espessura de 5mm.

Se a temperatura no interior da camada exceder a temperatura da placa, se entende que a ignição foi produzida até mesmo com a ausência de chama (Figura 7).

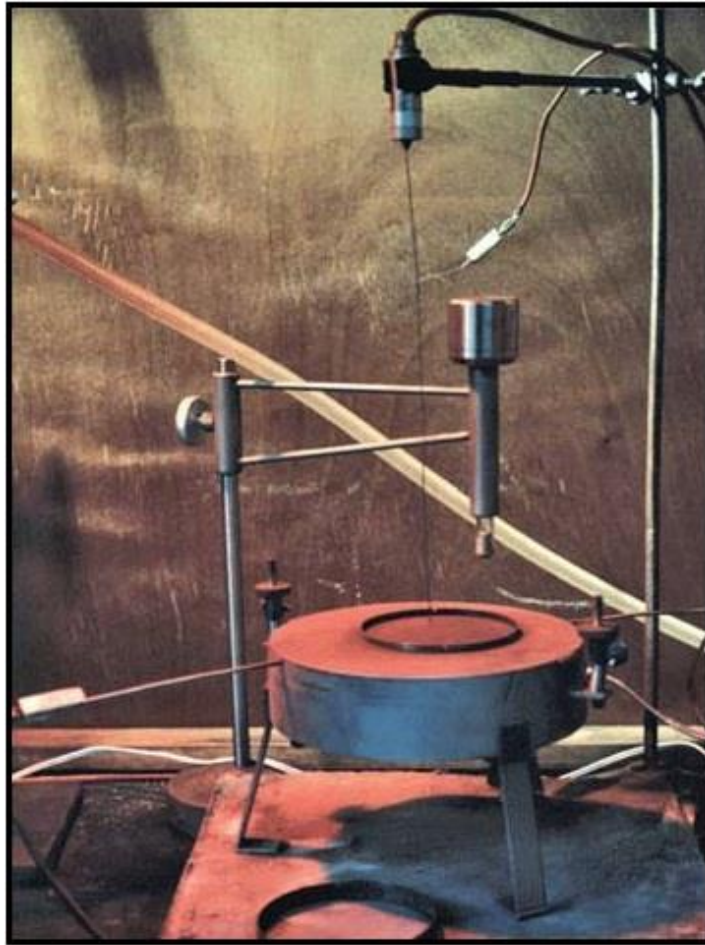


Figure 7 - Teste MIT
Fonte: (KRAUSE, 2009)

De acordo com BARTON (2002) a temperatura da camada de ignição depende da espessura da camada, e quanto maior é a camada mais baixa é a temperatura dela.

Além disso, o tempo necessário para chegar á ignição aumenta com o aumento da camada.

Para as camadas inferiores a 50mm, o MIT pode ser medido utilizando o aparelho e o procedimento aplicado com padrão de profundidade de 5 mm (Figura 8).



Figura 8 - Teste MIT para camadas espessas.
Fonte: (BARTON, 2002)

As temperaturas mínimas de ignição de alguns produtos variam de acordo com a espessura da camada. KRAUSE (2009) mostra na Figura 9 o resultado do ensaio realizado conforme a Norma (DIN EM 13821, 2007), onde foram utilizadas camadas de pó de 5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 30mm e 50mm.

Os resultados mostram que a estimativa das temperaturas de ignição das camadas mais espessas pode ser adequadamente calculada por extrapolação a partir de temperaturas de ignição das camadas mais finas (Figura 9).

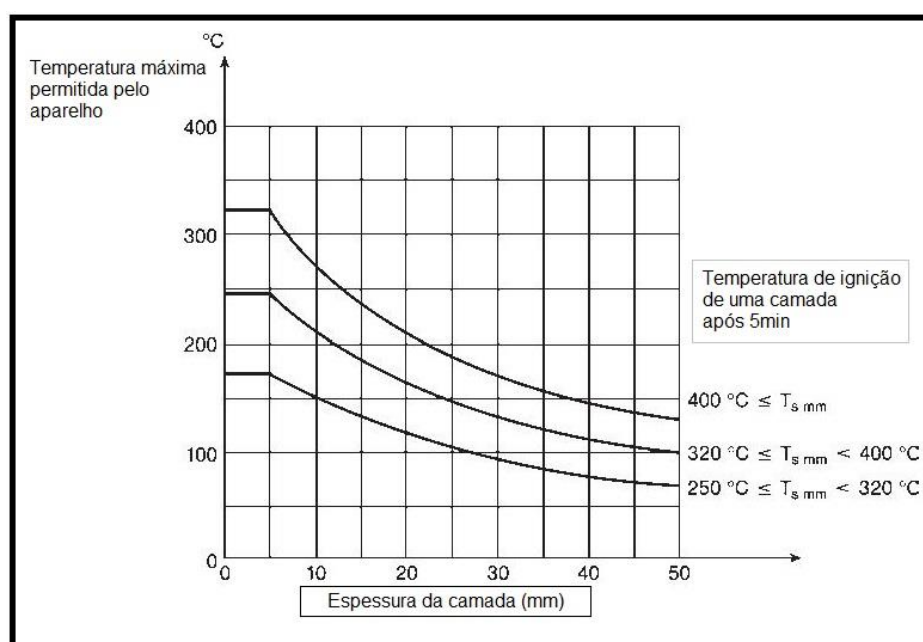


Figura 9 - Temperatura da superfície versus espessura da camada de pó.
Fonte: (KRAUSE, 2009)

2.3.3.2. Concentração mínima de explosividade (MEC)

Há uma gama de concentrações numa nuvem de pó, da qual a mistura de pó e ar é explosiva e o limite inferior é o MEC. A avaliação do perigo de explosão é efetuada em ensaios de laboratório de acordo com a Norma (DIN EN 13284-1), e estes ensaios são efetuados em esfera metálica com capacidade de 20 litros a 1m³.

2.3.3.3. Energia Mínima de Ignição (MIE)

De acordo com BARTON (2002) é o valor mais baixo de energia necessária para inflamar a mistura de pó, e a energia (em Joules) é calculada a partir da equação,

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \text{ (BARTON, 2002)}$$

onde “C” é a capacidade total do circuito de descarga e “U” é a tensão aplicada.

O MIE encontra-se entre o valor mais baixo da energia (E2) em que ocorreu a ignição e a energia máxima (E1). É possível calcular um valor único de estatística “E” estimando-se a probabilidade de ignição.

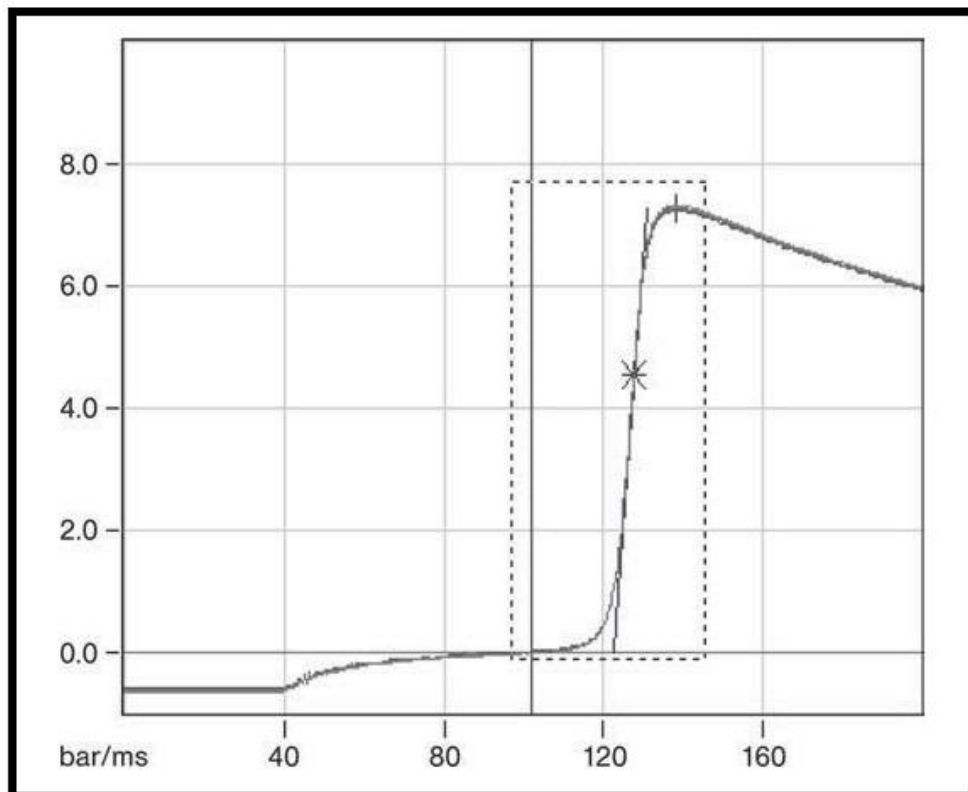


Figura 10 - Registro de tempo de pressão para uma explosão.

Fonte: (BARTON, 2002)

2.4. RISCO DE EXPLOSÃO

2.4.1. Condições essenciais para ocorrência da explosão

O fogo ocorre com a presença simultânea de material combustível, oxidante (oxigênio) e uma fonte de ignição que em conjunto representam o triângulo do fogo (Figura 1) ECKHOFF (2003).

O fenômeno de explosão das poeiras é mais complicado e necessitam do envolvimento de outros dois fatores. Esses fatores são os da mistura turbulenta de poeira combustível com o ar (dispersão) o e confinamento da mistura (concentração), completando com o triângulo do fogo, tem-se o pentágono do fogo (Figura 11) USP (2011).

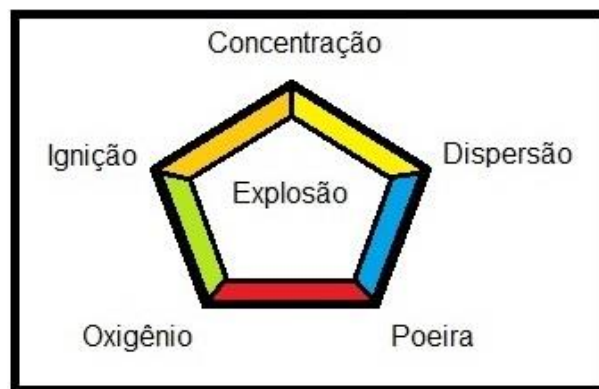


Figura 11 – Pentágono da explosão de poeiras.
Fonte: Arquivo pessoal

A mistura do combustível com o ar é particularmente importante no caso das misturas de pó – ar, sendo que nas indústrias as explosões de pó são a causa de graves acidentes.

2.4.2. Parâmetros da explosão do pó

ECKHOFF (2003) descreve que geralmente as partículas com tamanho 0,075mm participam efetivamente nos processos de combustão, conforme as amostras de poeira obtidas em unidades industriais, e que a amostra é caracterizada normalmente pelo tamanho do material utilizado.

E que as explosões são ocorrências nas quais há uma súbita liberação de energia que se materializa em um aumento de pressão associada à liberação de gases e que pode eventualmente ser acompanhada de liberação de calor.

Nas indústrias a explosões de pó são possíveis devido as grandes quantidades de poeira formada durante o ciclo de produção, o transporte e armazenamento dos materiais.

2.4.3. Pressão máxima de explosão (P_{max})

De acordo com KRAUSE (2009) a pressão máxima de explosão ocorre em um vaso fechado, durante a explosão em uma atmosfera explosiva, determinada sob as condições especificadas no teste, onde o valor mais elevado obtido em teste para uma dada concentração é visto na Figura 12.

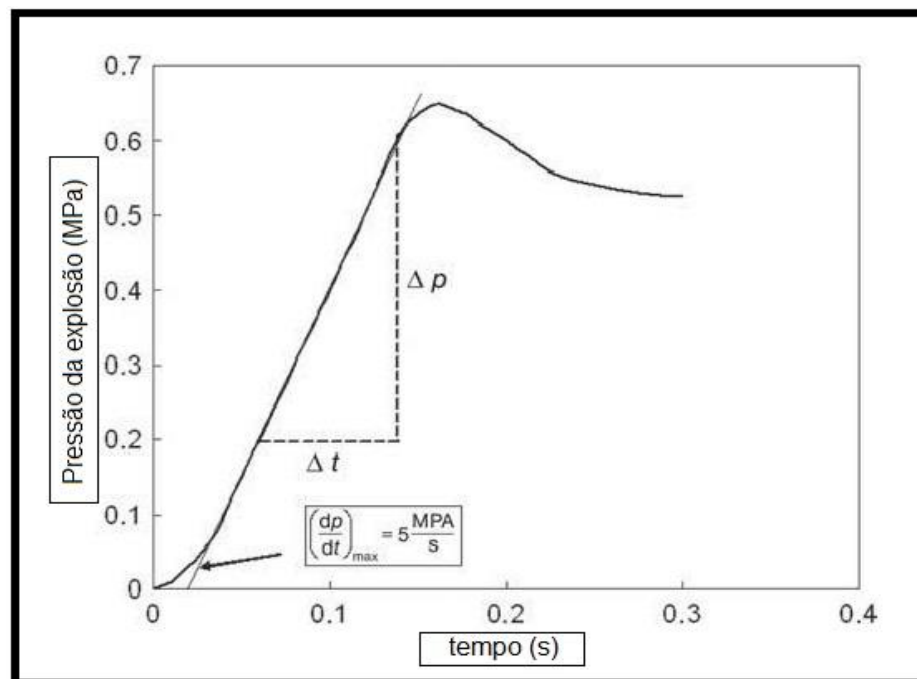


Figura 12 - Evolução da pressão ao longo do tempo durante uma explosão de pó num recipiente fechado.
Fonte: (KRAUSE, 2009)

As medições são realizadas de acordo com a Norma (DIN EN 14034-1, 2011), em um volume parcialmente fechado, onde a pressão de explosão seja menor do que a pressão máxima de explosão.

2.4.4. Taxa máxima de pressão de explosão $(dp/dt)_{\max}$

Ainda segundo KRAUSE (2009) a taxa máxima de pressão de explosão $(dp/dt)_{\max}$ é o valor máximo do aumento de pressão por unidade de tempo durante a explosão em todas as atmosferas explosivas, no intervalo de explosão de uma substância combustível num recipiente fechado. Onde as condições de teste são especificadas na Norma (DIN EN 14034-2, 2011) que determinação da taxa máxima de aumento da pressão de explosão de nuvens de poeira K_{st} .

É uma característica da gravidade de uma explosão, devendo ser considerado para a determinação das medidas de proteção contra explosões (ver figura 12 e 13).

Medido em um recipiente com volume de 1m^3 , este valor é chamado o valor K_{st} .

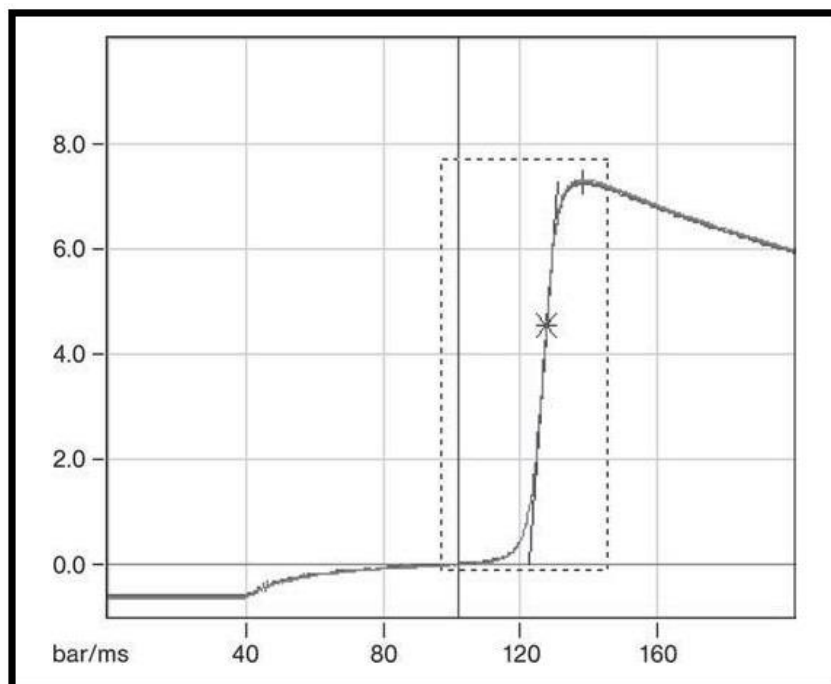


Figura 13 – Registro do tempo de pressão para uma explosão.
Fonte: (KRAUSE, 2009)

2.4.5. Limite inferior de explosão

Segundo BARTON (2002) o limite inferior de explosão é a mínima concentração de pó combustível capaz de propagar a chama em uma nuvem de poeira uniforme. No caso dos gases, eles dispõem de limites inferior e superior de explosão sendo os parâmetros característicos para cada tipo gás.

No caso do pó só o limite inferior de explosão é mensurável, pois o limite superior de explosão é muito difícil de determinar (geralmente maior do que alguns kg/m^3).

Para a maioria das poeiras o limite inferior de explosão ou concentração mínima explosiva é cerca de 50 g/m^3 . Essa grande concentração geralmente não existe permanentemente nas plantas industriais, caso contrário às pessoas não conseguiriam trabalhar devido a grande concentração de poeira.

Dentro dos equipamentos tal concentração é frequentemente excedida, no entanto, em muitos casos a concentração de explosão é apenas formada por arrastamento do pó em camadas, pela ação da pressão de explosão da onda em execução antes da frente da chama.

2.4.6. Explosão primária

ECKHOFF (2003) diz que a explosão primária é a explosão inicial produzida por um sistema de ignição de uma nuvem de pó em que a concentração de combustível é mais elevada do que o limite inferior de explosão e dentro do intervalo de explosão.

2.4.7. Explosão secundária

É a explosão produzida pela propagação da frente de chama através da atmosfera explosiva produzida como consequência do aumento de poeira no ar, devido à perturbação causada pela onda de pressão da explosão primária (ECKHOFF, 2003).

2.4.8. Turbulência

BARTON (2002) diz que as flutuações aleatórias nas propriedades de um fluido (velocidade, temperatura, densidade, concentração, etc) está associado com a existência das perturbações do fluxo de tamanhos variados.

A turbulência aumenta a transferência de calor de convecção da mistura, em seguida do efeito de explosão.

2.4.9. Válvula de alívio

Esta é uma medida de proteção que visa reduzir a pressão produzida por uma explosão em um duto e/ou silo, fornecendo aberturas para aliviar a expansão de volume causada pelo aquecimento dos gases no recinto. A pressão de explosão é reduzida, e deve ser o mais baixo possível para evitar o estouro do duto e/ou silo (ECKHOFF, 2003).

2.4.10. Supressão da explosão

Segundo KRAUSE (2009) esta é uma medida de proteção e é destinada a reduzir a pressão de explosão, injetando rapidamente agentes de extinção de forma regular (comprimento/diâmetro) do duto a ser protegido, a fim de evitar a explosão e sua ruptura. No Brasil o sistema de supressão de explosões é regido pela Norma (ABNT - NBR 6184-4, 2007).

2.5. CARACTERÍSTICAS DE EXPLOSÃO

De acordo com BARTON (2002) existem dois grupos de parâmetros que caracterizam o risco de explosão devido a misturas de pó - ar em instalações industriais:

- parâmetros de inflamabilidade;
- parâmetros de explosividade;

2.5.1 Parâmetros de inflamabilidade

Para BARTON (2002) os parâmetros de inflamabilidade são compostos pelo limite de explosividade, ponto de fulgor e ponto de ignição. E são as mínimas temperaturas em uma nuvem de poeira, a camada de poeira ou vapor de gases explosivos e uma energia mínima de ignição.

Nota-se que, para os gases e vapores a temperatura máxima da superfície do equipamento deve ser determinada por referência às temperaturas de ignição de gases e vapores.

Os métodos de determinação dos parâmetros subsequentes e é padronizado pela Norma (DIN EN 13821, 2003). Por uma escolha conveniente da temperatura máxima da superfície do material a ser usado na presença do pó, as temperaturas de ignição das camadas de pó e as poeiras nuvens devem ser determinadas.

De acordo com a Norma podem ser determinadas as temperaturas mínimas de ignição para nuvens de poeira e a energia mínima de ignição.

2.5.2 Parâmetros de explosividade

Ainda de acordo com BARTON (2002) o limite inferior de explosão (também para misturas gasosas limite superior de explosão), pressão máxima de explosão, velocidade máxima de aumento da pressão e a constante K_{st} .

E a concentração mínima de explosão C_{min} é determinada em um ensaio realizado em uma câmara esférica de 20 litros, onde é determinada a partir da curva "pressão-concentração" (Figura 14).

As concentrações mínimas de explosão variam entre 30 g/m³ a 750 g/m³ dependendo do material, tanto para as poeiras como para os gases de acordo a Norma (DIN EN 14034-2).

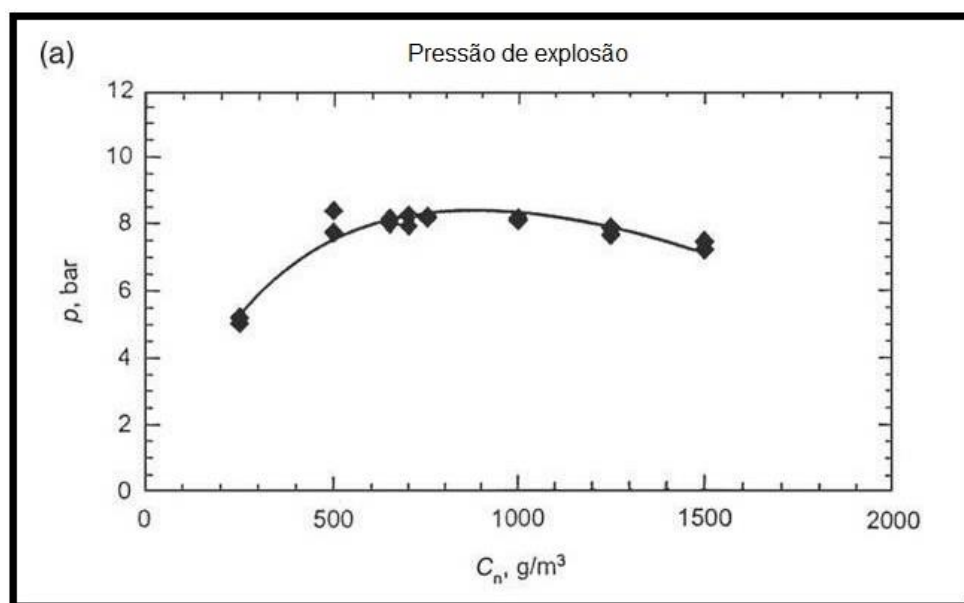


Figura 14 - Características de explosividade do pó – Pressão x Concentração.
Fonte: (BARTON, 2002)

Pressão máxima de explosão

$$\rho_{\max} = (8,4 \pm 0,8) \text{ bar}$$

Taxa máxima de aumento de pressão

$$(dp/dt)_{\max} = (313 \pm 120) \text{ bar/s}$$

Índice de explosividade

$$K_{st,\max} = 118 \text{ bar m/s}$$

De acordo com KRAUSE (2009) a pressão máxima de explosão é determinada numa câmara esférica com o volume de 20 Litros, a partir do registo da curva "pressão x tempo" (Figura 15), e a partir da curva dos valores de pressão máxima de explosão x velocidade máxima de aumento da pressão.

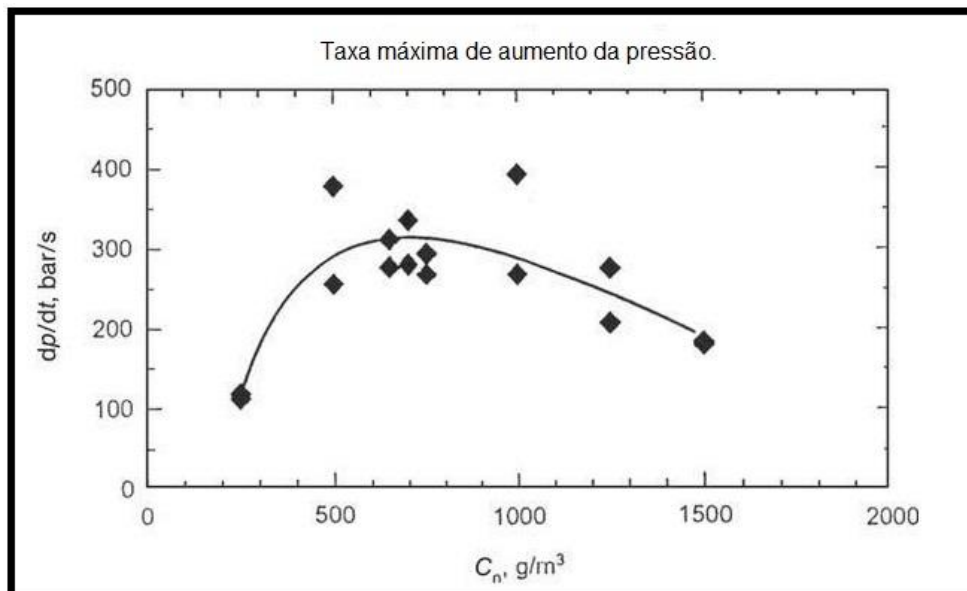


Figura 15 - Características de explosividade do pó – Pressão x Tempo.
Fonte: (KRAUSE, 2009)

KRAUSE (2009) demonstra na Figura 16 as características de explosividade são determinadas experimentalmente, onde a taxa máxima de aumento da pressão é considerada a característica de maior gravidade na explosão das poeiras e gases devido ao chamado de "A lei cúbica".

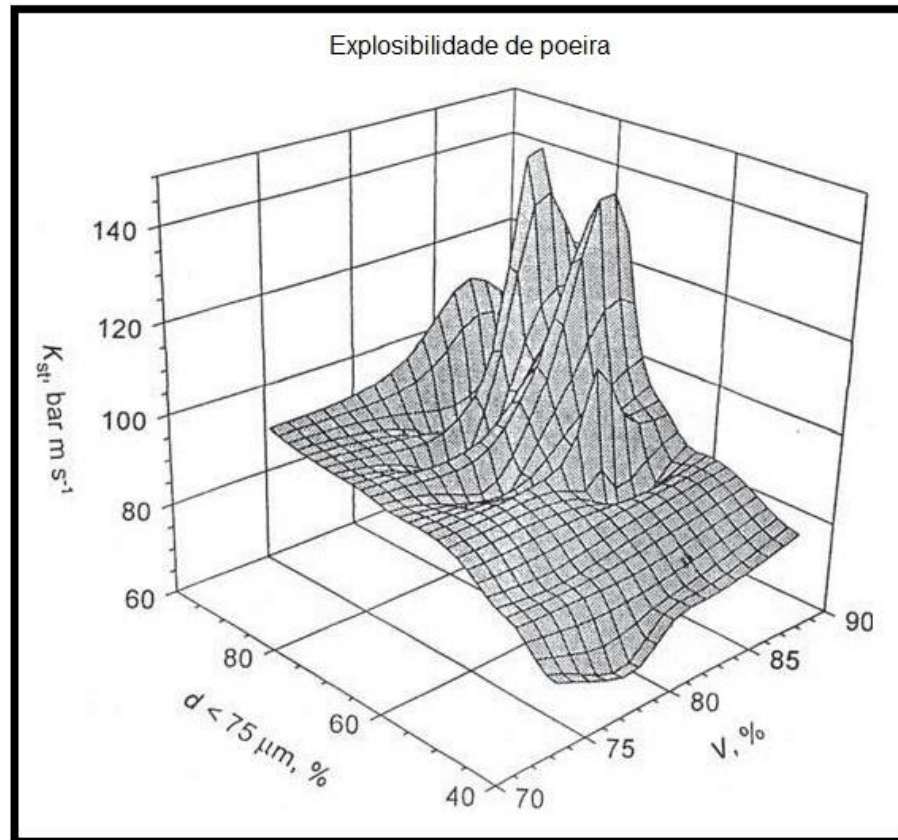


Figura 16 - Faixa de Explosividade - medida experimental
Fonte: (KRAUSE, 2009)

A formulação matemática da lei cúbica é

$$(d_P / d_t)_{\max} \cdot V^{1/3} = K_{st} = \text{constante. " (KRAUSE, 2009) "}$$

O valor K_{st} é considerado como uma medida de explosividade de pó e permite-nos calcular os efeitos da explosão de um dado volume. Este valor é a base da classificação de explosividade da poeira para as classes St1, St2 e St3.

Os valores de P_{\max} determinados num recipiente de 1m^3 de acordo com a Norma (DIN EM 14034-1, 2011) e numa câmara esférica de 20 litros de acordo com procedimentos especiais são idênticos, portanto $(d_P / dt)_{\max}$ são valores dependentes do volume usado na lei cúbica.

Os procedimentos operacionais em ambos os conjuntos de aparelhos foram definidos supondo a aplicação da lei cúbica.

Os dados usados para representação gráfica de K_{st} sobre os parâmetros seguintes são os teores de umidade e cinza, foram resumidos como um parâmetro comum do teor de matéria incombustível.

Para (KRAUSE, 2009) a Figura 17 representa a relação $K_{st} = f\{(W + A). V\}$, e a Figura 18 representa a relação $K_{st} = f\{(W + A). d < 75\mu m\}$.

Os símbolos W, A e V significam respectivamente a umidade, cinzas e conteúdo voláteis.

E a regularidade das funções vista nas Figuras 16, 17 e 18 permite-nos encontrar a influência das propriedades físicas da poeira em sua explosividade, e a partir das figuras, é visto que as funções não são afetadas pela origem do pó.

Alguns parâmetros não se encaixam nas curvas, mas resultam provavelmente da não adequação de alguns parâmetros característicos dos pós.

Além disso, o conteúdo incombustível deve ser determinado pela incineração de preferência a uma temperatura de 480°C em vez de 850°C.

A fórmula mais simples analítica descrevendo a explosividade do pó é,

$$K_{st} = C_1 \cdot \exp [C_2 \cdot V + C_3 (W + A) + C_4 (d < 75\mu m)] \text{ “(KRAUSE, 2009)”}$$

Para KRAUSE (2009) a partir dos valores de K_{st} dadas na equação abaixo, pelo método dos mínimos quadrados, pode-se calcular os coeficientes C, onde os valores numéricos são indicados a seguir:

$$K_{st} = 13,64 \cdot \exp [0,0166 V + 0,0244 (W + A) + 0,024 (d < 75\mu m)] \text{ “(KRAUSE, 2009)”}$$

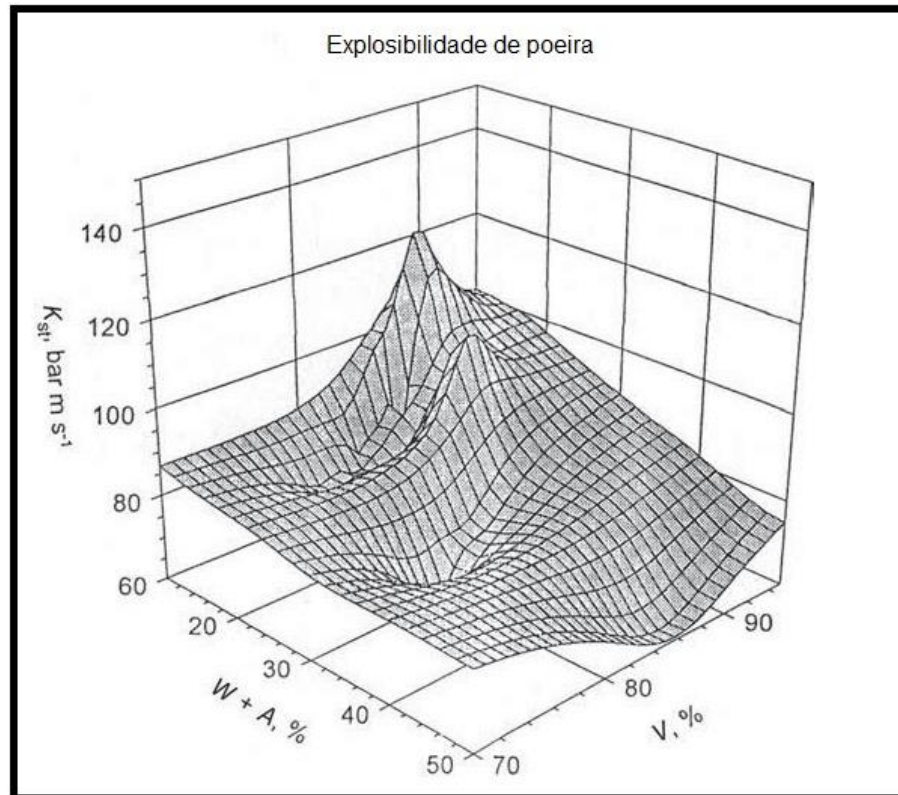


Figura 17 - K_{st} em função da matéria incombustível e de matérias voláteis.
Fonte: (KRAUSE, 2009)

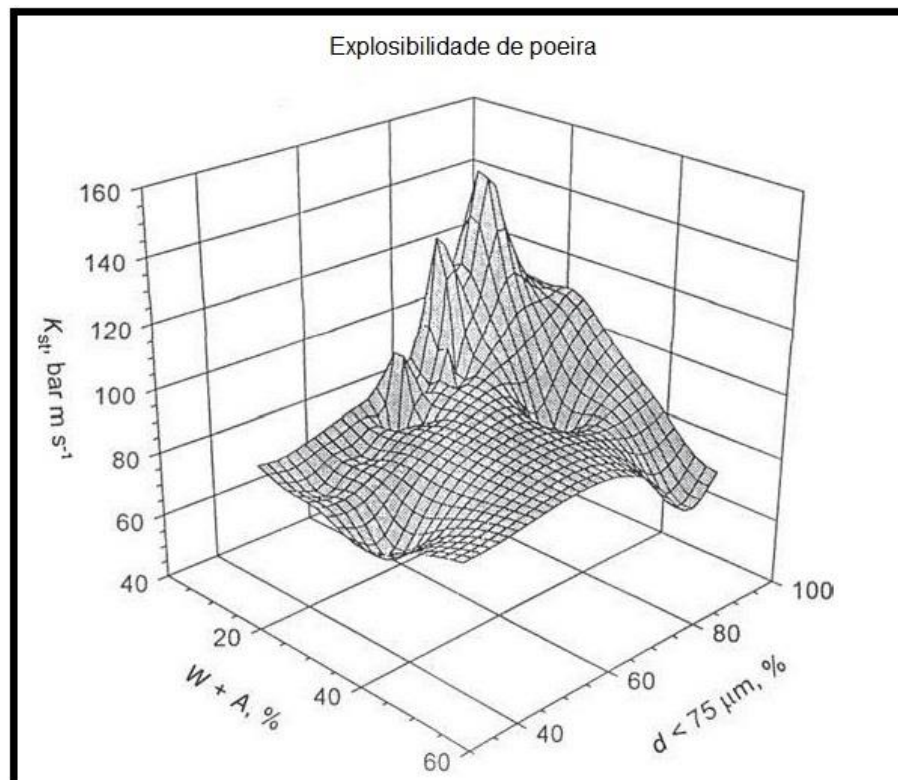


Figura 18 - K_{st} como uma função do teor de matéria não combustível e uma fracção de partícula $d < 75 \mu\text{m}$.
Fonte: (KRAUSE, 2009)

A diferença máxima entre os valores calculados e medidos é de $25,8 \text{ bar m}^{\text{s}^{-1}}$. Segundo KRAUSE (2009) a equação anterior pode servir como uma apreciação geral sobre a explosividade dos pós.

De acordo com as regras gerais, poeiras com $K_{\text{st}} < 200 \text{ bar m}^{\text{s}^{-1}}$ pertencem à classe St1 de menor perigo, as poeiras com K_{st} na faixa de 201-300 $\text{bar m}^{\text{s}^{-1}}$ pertencem a classe St2 de maior perigosa e as poeiras com $K_{\text{st}} > 300 \text{ bar m}^{\text{s}^{-1}}$ pertencem a classe St3 são as mais perigosos.

2.5.3 Propagação da explosão

De acordo com KRAUSE (2009), todos os parâmetros acima mencionados descrevem os processos de combustão, em recipientes fechados de volume relativamente pequeno onde a combustão é relativamente lenta e é executado sem fluxo de gás considerável.

Para ECKHOFF (2003) em dutos longos e em silos de armazenamento o curso de uma explosão pode ser mais violento e são necessários diferentes parâmetros para caracterizar a explosão, na Figura 19 é representada uma explosão de gás e poeira em um duto longo.

Geralmente a ignição começa na extremidade fechada do duto, embora não seja uma regra, pois em um curto espaço de tempo após a ignição, a frente de chama é formada enchendo a secção transversal total do duto.

A chama move-se como um êmbolo comprimindo os gases à frente, e este fluxo é turbulento e os mesmos podem causar um aumento da taxa de reação. Essa é uma razão para a aceleração da chama.

A parte inferior da Figura 19 representa a imagem idealizada de eventos adequados para a modelagem matemática, onde o gás explode depósitos de poeira introduzindo-os para a zona da chama e combustão do pó. O processo continua e é chamado de propagação da chama, e ele dura enquanto existir o combustível (pó depositado) e oxigênio (do ar).

Na Figura 19 o C_{ot} representa o comprimento de propagação da onda de compressão no tempo t , e W_t o comprimento de propagação da chama no tempo t respectivamente.

Iniciada a explosão de pó em um local pré-determinado de um duto pode desenvolver e propagar se existir uma quantidade suficiente de pó.

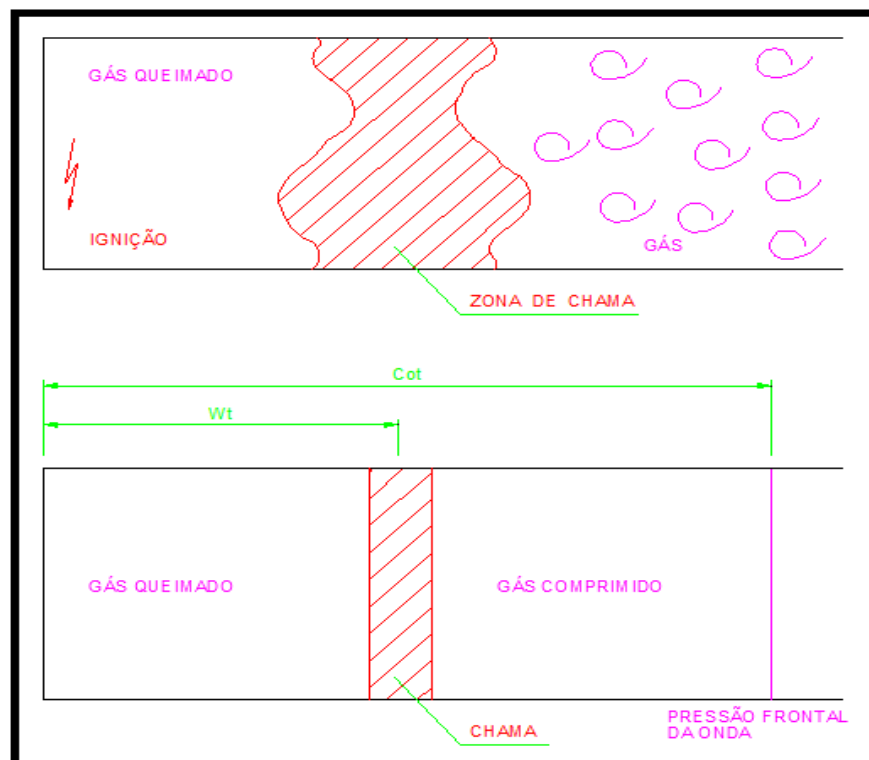


Figura 19 - Esquema de curso da explosão em duto longo.
Fonte: (ECKHOFF, 2003)

Ainda segundo ECKHOFF (2003) nas paredes dos longos dutos de exaustão das plantas industriais, pode haver uma quantidade considerável de pó depositado, onde se podem formar uma fonte de ignição.

E há duas características básicas da explosão propagada nos dutos, uma quando a menor concentração de poeira permite a propagação da explosão e outra quando a dinâmica da explosão é caracterizada pela velocidade e pressão da chama.

Para ECKHOFF (2003) num teste onde um duto é equipado com sensores para medir e registrar os parâmetros de explosão, tais como a chama em função do

tempo, a amplitude da onda de pressão, concentração de poeira local e temperatura de partículas brilhantes, é possível investigar as todas as condições de propagação da chama na zona empoeirada.

E a informação recebida a partir desses testes é muito importante para estimar o risco de um incêndio ou uma explosão em uma instalação industrial, pois a melhor regra de combate a incêndio e explosão é não haver incêndio e explosão.

Ainda segundo ECKHOFF (2003) a condição mais fácil de propagação da explosão é quando a explosão primária ocorre na extremidade fechada do duto, pois a quantidade de pó combustível necessária para a propagação da explosão neste caso é menor.

E a propagação da chama de combustão tem lugar na mistura de pó e ar disperso, criada pela ação de uma explosão resultante da combustão de uma mistura, e nestas condições a mistura de pó e ar pode ou não ser homogênea, dependendo assim da sua eficácia na combustão.

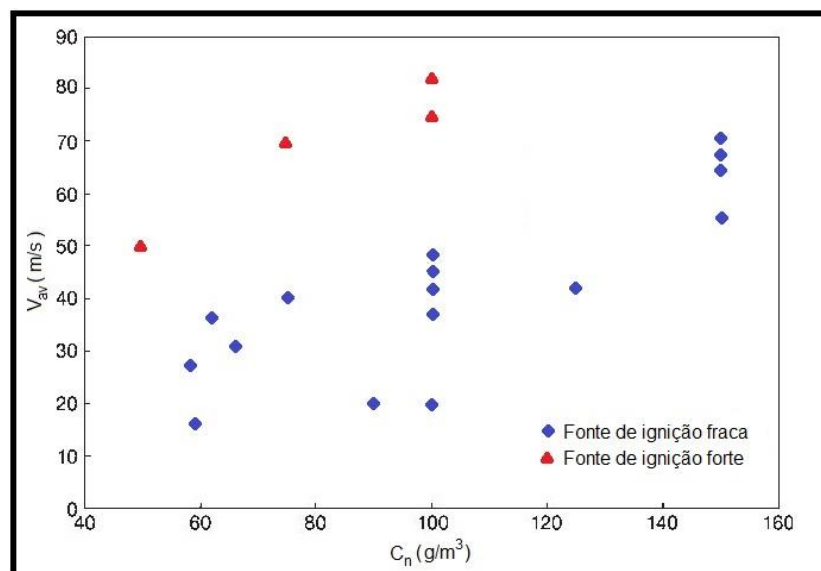


Figura 20 - Relação entre a velocidade da chama e a concentração no duto.
Fonte: (ECKHOFF, 2003)

Para a construção do gráfico da Figura 20 ECKHOFF (2003) utilizou os resultados obtidos a partir um teste realizado para avaliar a capacidade de uma chama, para propagar continuamente a partir de uma fonte de ignição, em toda extensão de um

longo duto de exaustão empoeirado, onde o pó foi distribuído em camadas sobre as paredes ao longo do duto em vários caminhos paralelos e contínuos, com densidade constante ao longo de todo o comprimento.

ECKHOFF (2003) utilizou a quantidade de poeira por unidade de comprimento dividida pela seção do duto dá a concentração de poeira nominal C_n marcado como uma das abscissas na Figura 20, onde a ordenada é a velocidade média V_{av} da chama sobre a distância percorrida pela chama.

Os resultados obtidos com a fonte de ignição fraca são marcados na Figura 20 por diamantes e os resultados obtidos quando se utilizou uma fonte de ignição mais forte são marcados por triângulos, e nos dois resultados a velocidade da chama depende da concentração de pó C_n .

A explosão primária reflete na onda de pressão, porém a velocidade de chama depende também da fonte de ignição, pois com a mesma concentração de pó a velocidade de chama pode ser diferente, dependendo de algumas diferenças na distribuição do pó e de outras condições, tais como o aumento da pressão inicial na explosão primária.

A partir do gráfico da função $V_{av} \times C_n$ vê-se que existe um valor crítico de velocidade de chama para a propagação contínua ao longo das zonas poeirentas, pois o valor da velocidade depende da geometria da distribuição do pó (ECKHOFF, 2003).

2.5.4. Dinâmica de explosões em dutos

De acordo com BARTON (2002) um crescimento da concentração de poeira acima do valor limite faz com que aumente a dinâmica da explosão nos dutos.

E a explosão pode se propagar de forma contínua ao longo do caminho, quando as camadas de poeira nos dutos de exaustão tiverem uma concentração de poeira superior a 50 g/m³. E se a concentração de poeira ao longo do duto for superior a 100 g/m³ uma pequena fonte de ignição pode acelerar-se à detonação.

2.6. MEDIDAS DE PREVENÇÃO

2.6.1 Limitação da emissão de poeira

De acordo com KRAUSE (2009) em vários casos é possível de reduzir a concentração das poeiras com sistemas de exaustão eficiente, com a limpeza constante dos dutos e dos equipamentos a fim de evitar a criação de nuvens e de camadas (Figura 21).

Também diz ECKHOFF (2003) que a redução da emissão de poeira também pode ser alcançada por meio de medidas construtivas e corretivas aplicadas nas instalações e nos equipamentos. A fim de reduzir o risco de uma explosão, o pó depositado em silos deve ser removido periodicamente.



Figura 21 – Limpeza do local de concentração de pó.
Fonte: www.karcher.com.br

2.6.2. Limitação de fontes de ignição

Segundo BARTON (2002) fontes de ignição efetivas que causam uma explosão, pode ter origem externa tais como a térmica, mecânica, elétrica e eletrostática. E as internas tais como o auto aquecimento e autoignição do material.

E diz ainda que a prevenção de explosões significa a eliminação de todas e quaisquer fontes de ignição efetivas, pois para evitar uma explosão devem ser tomadas medidas de forma a evitar a possibilidade de atuação de quaisquer fontes de ignição, através da escolha de equipamentos e sistema eficientes para o controle, monitoramento e extinção de toda e qualquer fonte de ignição.

Segundo ECKHOFF (2003) outro método de limitação de fontes de ignição eficaz é a utilização de uma substância de extinção de incêndios pela inertização antecipada, uma vez que tenha sido detectada a fonte.

Este meio de prevenir uma explosão é usado principalmente em instalações onde o produto for transportado por gravidade ou por transporte pneumático.

2.6.3. Explosões

Segundo KRAUSE (2009), em equipamentos ou áreas onde a poeira é permanente em suspensão ou em concentrações explosivas, há sempre a possibilidade de uma explosão primária e medidas de proteção devem ser tomadas a fim de limitar os seus efeitos.

E caso as explosões primárias se não sejam devidamente anuladas, pode assim aumentar a possibilidade de uma segunda explosão com resultados proporcionalmente mais destrutivos. Além das medidas de prevenção mencionadas, devem ser tomadas medidas de proteção com o objetivo de reduzir os efeitos de uma explosão.

Para ECKHOFF (2003) várias medidas podem ser tomadas, na qual vai depender se essas medidas tem capacidade para proteger contra o excesso de pressão ou contra a propagação da explosão.

Os métodos utilizados para a proteção contra explosão são as instalações e equipamentos resistentes a pressão, a redução da pressão de explosão (ventilação), supressão da explosão por meio da extinção da chama e também a prevenção da propagação da explosão obtida por isolamento de dispositivos e uso de barreiras.

2.7 MEDIDAS DE PROTEÇÃO PASSIVA

Para ECKHOFF (2003) a proteção passiva é o conjunto de medidas implantadas durante a construção da edificação e na implantação da planta industrial que devem ser previstas ainda na fase de elaboração do projeto, e seu desempenho independe

de qualquer acionamento para desempenhar sua função, e reagem de maneira passiva ao desenvolvimento do incêndio de modo a não contribuírem com o crescimento e propagação do fogo.

As medidas tais como edificações, materiais e equipamentos resistentes à pressão, áreas facilmente acessíveis, a compartimentação e rotas de fuga são medidas de proteção passiva.

2.7.1. Instalações, materiais e equipamentos resistentes à pressão

Para ECKHOFF (2003) o método consiste em assegurar que as partes dos edifícios e dos equipamentos suscetíveis de serem afetadas por efeitos de pressão induzidas por uma explosão são suficientemente resistentes e não passível de colapso.

Medidas estas que devem ser previstas no projeto da edificação e no projeto da planta industrial para que os materiais incorporados e elementos construtivos sejam resistentes às características de reação ao fogo.

2.7.2. Acessibilidade

É essencial adaptar o projeto arquitetônico e o projeto das instalações e equipamentos, a fim de possibilitar melhor acesso aos equipamentos, instalações e aos locais que necessitam de limpeza e verificação constante (ECKHOFF, 2003).

2.7.3. Compartimentação

Para KRAUSE (2009) a filosofia básica de prevenção de incêndios é dividir uma edificação em compartimentos por meio de compartimentação de fogo (paredes de fogo, tetos, telas, paredes periféricas), cuja função é impedir a propagação de um incêndio na edificação e nos equipamentos adjacentes, por meio de compartimentos de incêndio para as rotas de fuga.

2.8 MEDIDAS DE PROTEÇÃO ATIVA

A proteção ativa são medidas protetivas caracterizadas e diretamente relacionadas à intervenção imediata destes sistemas em caso de um princípio de incêndio e dependem de acionamento manual ou automático (USP, 2011).

2.8.1. Redução da pressão de explosão (Ventilação)

Segundo KRAUSE (2009) a redução da pressão da explosão por ventilação consiste que a força da pressão deva ser inferior que à força da estrutura da instalação, a fim de minimizar os efeitos da pressão induzida por uma explosão.

Também os equipamentos com volume inferior a 100 m³ tais como pequenos silos, podem ser protegidos por painéis de explosão (Figura 22) que consistem em painéis feitos de um material leve; e estes abrem logo que o excesso de pressão excede um valor de limiar. A redução da pressão provocada por uma explosão será reduzida por meio de aberturas de alívio contidas nos painéis de explosão.



Figura 22 – Equipamento com abertura para instalação do painel de explosão.
Fonte: (KRAUSE, 2009)

O tamanho das aberturas de alívio depende da pressão presumida de explosão que a instalação pode suportar e da pressão de ruptura do painel de explosão (Figura 23).

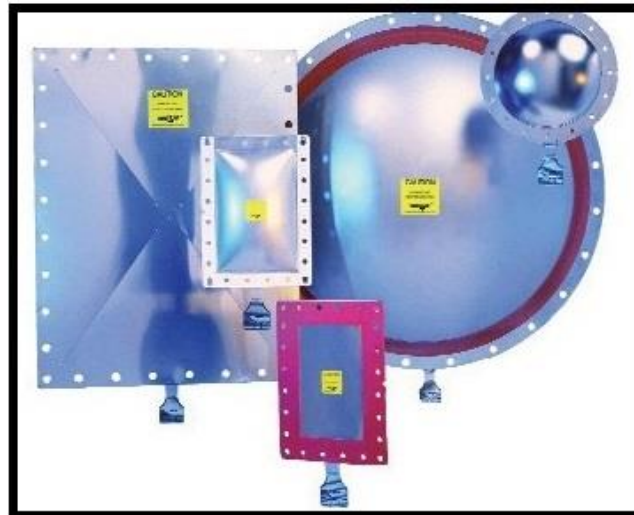


Figura 23 – Paineis de explosão.
Fonte: Parte do catálogo – www.bsbipd.com

Portas de explosão (Figura 24) cuja principal característica é que elas fechem automaticamente, assim que o nível de pressão em excesso acabar, têm a vantagem de evitar a entrada de ar no gabinete e um maior desenvolvimento de incêndio. Além disso, as emissões de gases tóxicos formados por uma explosão são evitadas (ECKHOFF, 2003).



Figura 24 – Porta de explosão.
Fonte: (ECKHOFF, 2003)

Quando grandes volumes devem ser protegidos, como por exemplo, edifícios ou silos de grande porte, parte das paredes exteriores e telhado podem ser usados para ventilar limitando a pressão da explosão.

É, portanto, essencial que a ventilação deve ser efetuada numa direção que não expõe os trabalhadores ou qualquer outro equipamento a qualquer perigo, de preferência em direção ao lado de fora do edifício.

Com equipamentos cujo comprimento e diâmetro sejam de grandes dimensões a proteção por ventilação é desaconselhável, pois com a abertura da ventilação pode aumentar as chamas (ECKHOFF, 2003).

2.8.2. Supressão de explosão

Para KRAUSE (2009) o sistema de Supressão de Explosão (Figura 25) detecta o estágio inicial de uma deflagração ao sentir a onda de pressão que antecipa a bola de fogo, e usa este sinal para ativar um agente de extinção para extinguir a bola de fogo no estágio inicial, antes que atinja proporções destrutivas.

Um sistema típico compõe sensores, fonte de alimentação, monitor e canhões de injeção de agente supressor, e a quantidade, o tamanho e localização dos sensores e dos canhões são determinados para cada aplicação.

A supressão bem sucedida de uma deflagração resulta em uma pressão de explosão reduzida e um pico baixo de pressão dentro do equipamento. A bola de fogo em desenvolvimento recebe uma injeção de bicarbonato de sódio com grau alimentício que a extingue a partir do seu interior; não apresentando nenhuma evidência externa ao processo de que uma deflagração ocorreu.

A necessidade de isolar o equipamento de processo pode ser facilmente alcançada utilizando a tecnologia de sistema de supressão. Quando o sensor detecta os estágios iniciais da deflagração, não apenas os canhões principais de supressão são ativados, mas, ao mesmo tempo, um canhão de isolamento é ativado em cada duto, criando um bloqueio químico no duto e prevenindo a deflagração ao mover-se pela instalação.

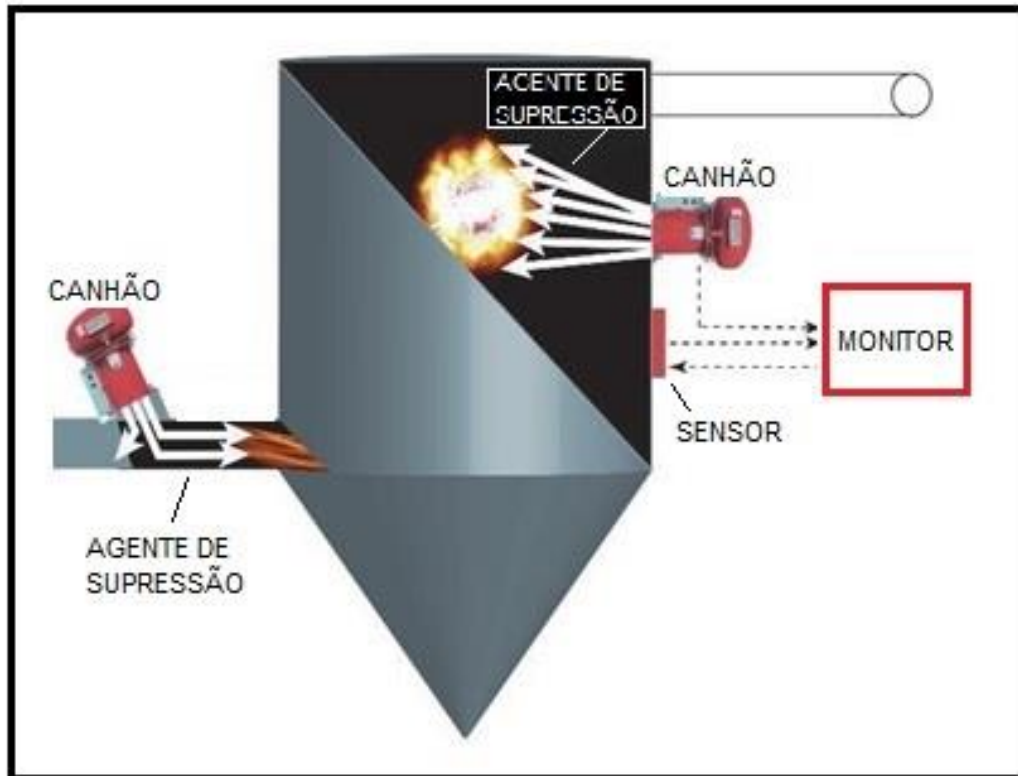


Figura 25 – Supressão de explosão.
Fonte: Parte do catálogo – www.bsbipd.com

2.8.3. Sistema de isolamento mecânica da chama

O sistema de isolamento mecânica da chama é composto por duas partes, um painel de explosão e um corta chamas. O painel de explosão responde rapidamente à pressão desenvolvida por uma deflagração e abre para aliviar esta pressão.

À medida que a bola de fogo se desenvolve, passa através do painel de explosão aberto, e é interceptada pelo corta chamas, que é uma malha em aço inoxidável, instalada em um suporte que atua como um supressor de chama tridimensional para extinguir a chama (Figura 26).

O corta chama retém a chama e os gases quentes da combustão gerados pela deflagração, bem como o pó queimado e sem queimar o que passa através do painel de explosão aberto (KRAUSE, 2009).



Figura 26 – Sequência de atuação do sistema de isolamento mecânico de explosão.

Fonte: Parte do catálogo – www.bsipd.com

2.8.4. Detectores de fumaça

Detectores de fumaça ópticos e detectores de fumaça de ionização são acionados pelos produtos de combustão ou pirólise contido no ar. Portanto, esses detalhes são especialmente adequados quando na fase inicial de uma fumaça de incêndio em desenvolvimento é gerado (USP, 2011).

As propriedades específicas do fumo (fumaça cor, o tamanho das partículas de fumo) devem ser levadas em conta na escolha de um tipo específico de sensor de fumaça (BARTON, 2002).

Os detectores de fumaça ópticos detectam comparativamente grandes partículas de fumaça à medida que ocorrem na fase inicial de um incêndio (latente).

Os detectores de fumaça de ionização detectam partículas menores na fumaça à medida que ocorrem no palco de um incêndio imediatamente antes que ocorra a transição para o fogo.

Para a escolha dos detectores apropriados deverá ser considerado se o fogo é provável que comece como latente ou rapidamente se transforma em um fogo flamejante (BARTON, 2002).

2.8.4.1. Detectores ópticos de fumaça

Este tipo de detector consiste em uma tomada de dispositivo de uso óptica do espalhamento da luz por partículas de fumaça. Os detectores ópticos utilizam o método de câmara dupla, sendo que uma câmara é usada como uma câmara de emissão, e a outra como uma câmara receptora (Figura 27).



Figura 27 – Detector de fumaça óptico.
Fonte: Parte do catálogo - www.siemens.com.br

A câmara de emissão possui um emissor de luz infravermelha, e a câmara receptora possui um sensor de luz infravermelha, sendo as duas câmaras separadas opticamente por um anteparo permanente.

O emissor de luz infravermelha emite de forma permanente um fluxo luminoso para o sensor receptor de luz infravermelha, portanto quando não há fumaça na atmosfera a célula emite corrente máxima.

Quando há presença da fumaça na atmosfera, o fluxo luminoso é reduzido provocando redução do fluxo luminoso, o que provoca queda na corrente e acionamento do alarme.

Os detectores ópticos não são convenientes para atmosferas que contenham pós em suspensão ou emissão de vapores.

2.8.4.2. Detectores de fumaça de ionização

Este tipo de detector é composto por duas fontes de radiação de baixa intensidade que causam a ionização do ar. Este detector utiliza um material radioativo, o amerício-241 (Am-241) que emite partículas alfa.



Figura 28 – Detector de fumaça óptico.
Fonte: Parte do catálogo - www.siemens.com.br

O uso do Am-241 gera polêmica, mas a maioria dos especialistas descarta o perigo de contaminação. Além de a quantidade empregada ser mínima, a radioatividade do material se dá principalmente na forma de partículas alfa, que não atravessam as paredes do detector.

Essas partículas ionizam os átomos do ar, arrancam deles os elétrons, separando os átomos que antes eram neutros, em cargas positivas e negativas. Ao entrar no aparelho a fumaça atrapalha essa ionização e a interrupção faz soar um alarme.

Os detectores de ionização são convenientes para ambientes industriais, pois são mais eficientes e sensíveis à fumaça.

2.8.5. Detectores de gás e chamas

Os detectores de gás e chamas (Figura 29) consistem em sensores de semicondutores, que são adequados para a análise de misturas de gases. Estes elementos sensores não reagem às partículas de fumaça, mas sim variação na composição do gás causado por um incêndio.

Este tipo de detector é mais adequado para aplicações industriais especialmente em áreas carregado de poeira. E através da aplicação de vários sensores diferentes de sensibilidades, neste detector é possível a detecção de gases diferentes.

Os sensores semicondutores são protegidos por uma tampa de vidro sinterizado, e o gás se difunde através do vidro para as camadas sensíveis. A poeira ou sujeira na tampa não pode impedir a difusão, e, além disso, os detectores de gás de incêndio não são sensíveis contra o nevoeiro.



Figura 29 – Detector de gás e chamas.
Fonte: Parte do catálogo - www.kidde.com.br

Uma análise dos diferentes sinais captados pelos sensores permite uma identificação de diferentes tipos de incêndios. O espectro de aplicações industriais varia de supervisão de silos para armazenamento de carvão para os produtos

agrícolas, madeira, serragem, papel, pelotas de palha e biomassa para a reciclagem de materiais. Este sensor é ideal para aplicações industriais, que exigem um sistema de proteção próprio para locais perigosos.

2.8.6. Detectores de chamas

Um detector de chamas responde a radiação emitida pelas chamas de um incêndio, que emitem espectro ultravioleta visível e radiação infravermelha. Os detectores de chamas contêm sensores ópticos para esses espectros, no entanto, não com intensidade constante, mas com certo padrão de emissividade, a chamada frequência de instabilidade. A avaliação da frequência serve como informação adicional para uma identificação quando está em fase de alerta.

Os sensores ópticos são detectores de chama e precisa de certas condições para uma detecção confiável de um incêndio, sendo que a fumaça impede a transmissão de ultravioleta, e é visível a radiação infravermelha. Portanto, os detectores de chama devem ser aplicados para incêndios com rápida transição.



Figura 30 – Detector de chamas.

Fonte: Parte do catálogo - www.kidde.com.br

As sombras causadas por obstruções na área supervisionada dificulta a detecção prematura da chama, também as poeiras ou outras camadas sobre a parte óptica do detector de chama podem reduzir a intensidade da radiação emitida por uma chama.

Portanto, muitos detectores de chama têm um sistema de controle para o grau de extinção, e se a sujeira na parte óptica exceder um limite previamente ajustado um

signal de alerta é acionado.

Os detectores de chama estão disponíveis em UV e IR, e os detectores utilizam algoritmos de processamento de sinal, que são suportados por um microprocessador de 32 bits para fornecer proteção contínua na presença de fontes de alarme falsos e ambientes com presença de radiação infravermelha.

Ele é adequado para aplicações internas e externas que exigem o mais alto nível de rejeição a alarmes falsos e desempenho na detecção de incêndio.

O detector tem um alcance de detecção no n-Heptano e no n-Hexano de um cone sólido de visão que varia de 60° a 70° (Figura 31), e para metano um cone sólido de visão de 90° (Figura 32).

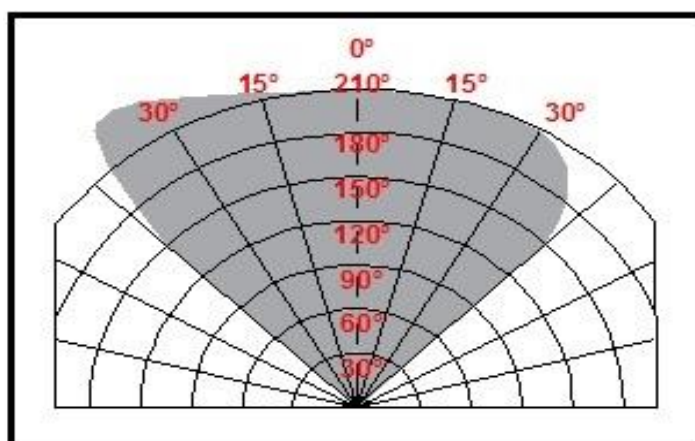


Figura 31 – Cone de visão para n-Heptano e n-Hexano.
Fonte: Parte do catálogo - www.kidde.com.br

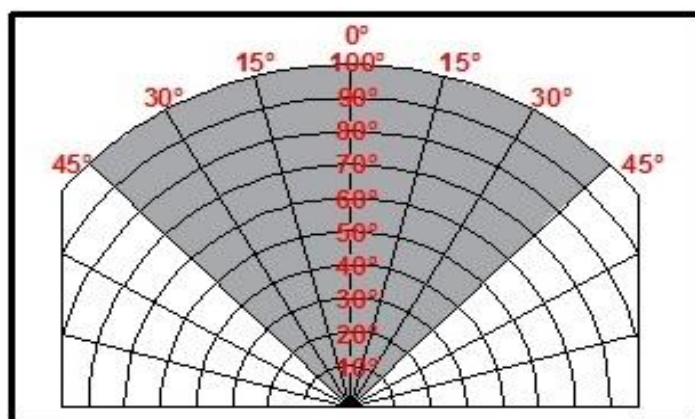


Figura 32 – Cone de visão para o metano.
Fonte: Parte do catálogo - www.kidde.com.br

Ao selecionar um tipo específico de detector, possíveis fontes de perturbação e de falsos alarmes têm que ser considerados.

Os detectores de chamas IR trabalham espectro infravermelho e filtros especiais em frente dos sensores para prevenir a transmissão de outras frações de radiação espectral.

Os detectores de chamas UV trabalham no espectro ultravioleta e as janelas de vidro especial são necessárias para alinhar a transmissão de luz ultravioleta para o sensor.

O acrílico ou vidro de uma janela pode causar uma forte extinção da radiação UV, pois tais obstáculos tem que ser removido do percurso entre a chama e o detector.

2.8.7. Detecção de faísca

Os sistemas de Detecção e Extinção de Faíscas são capazes de detectar pequenas faíscas e de extingui-las automaticamente, eliminando o risco de incêndios e explosões.

Também são muito úteis em aplicações industriais, especialmente em um ambiente empoeirado, e permitem um reconhecimento precoce de fontes de ignição antes de um incêndio.

Na Alemanha existe uma diretriz da Associação de Seguradoras que aconselha que faça parte do projeto da indústria e seja implantado na mesma o sistema de detecção de faísca nas industriais seguradas.

Incêndios e explosões ocorrem em filtros, dutos, silos ou em secadores, e tais eventos representam um grave risco para vidas humanas, causando grandes danos às instalações industriais e a suspensão prolongada das atividades.

A origem desse risco são as faíscas e partículas incandescentes geradas pelo processamento industrial dos materiais, que são capturados e transportados pelos

sistemas de transporte pneumático ou mecânico.

Os sensores de faíscas são instalados nas paredes dos dutos de exaustão (Figura 33) para detectar a radiação infravermelha emitida pelas faíscas transportadas pela corrente de ar.



Figura 33 – Detector instalado no duto.
Fonte: Parte do catálogo – www.grecon.com

A detecção das faíscas é possível mesmo com o acúmulo de sujeira e com um fluxo muito denso de material.

Após o instante no qual a faísca é detectada, uma névoa de água pressurizada é liberada dentro do duto com o objetivo de extinguir as faíscas.

O dispositivo de extinção consiste em uma válvula solenóide especial de alta velocidade e de um ou mais bicos extintores, os quais são instalados de 6 a 9 metros depois dos sensores, de acordo com a velocidade de transporte.

Para a extinção é utilizada água sob alta pressão, e os bicos extintores especiais geram em uma fração de segundos uma névoa de água que preenche todo o diâmetro do duto.

Um projeto de instalação apropriado garante que as faíscas e as partículas incandescentes atingem a névoa de água, e dessa forma são eliminadas.

A válvula solenóide se fecha automaticamente após um intervalo de tempo previamente definido, normalmente de 5 segundos.

O sistema de detecção de faísca efetivamente detecta e extingue fontes de ignição sem que para isso seja necessário desligar as máquinas ou interromper o processo de produção.

O detector de faísca detecta uma faísca ou material quente ao passar pelo sistema de transporte pneumático, e um bico extintor de água é acionado em no máximo 10ms (milissegundos) (Figura 34).

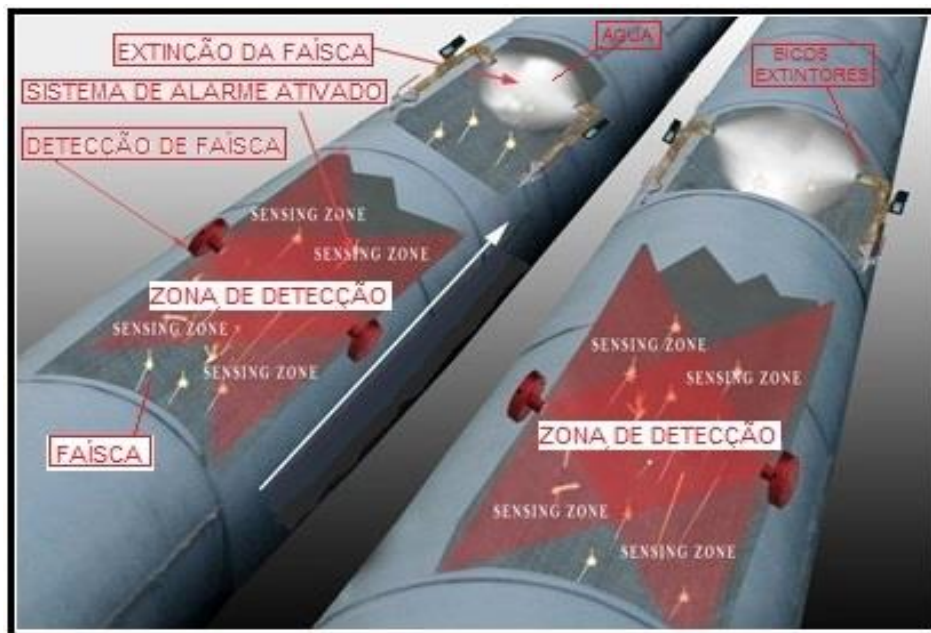


Figura 34 – Detecção e extinção de faísca.
Fonte: Parte do catálogo – www.bsbipd.com

2.8.7.1 Bico extintor de faísca

O bico extintor da faísca (Figura 35) está localizado a uma distância a ser determinada em projeto, a partir do detector de faísca no sentido do fluxo.



Figura 35 – Bico extintor de água.
Fonte: Parte do catálogo – www.grecon.com

Este sistema de extinção de água é composto por lâminas de fechamento, coletores de sujeira, válvula solenoide, fluxo ou controlador de pressão, bicos injetores, dutos e se necessário um aquecedor a fim evitar o congelamento da água devido a baixas temperaturas (Figura 36).

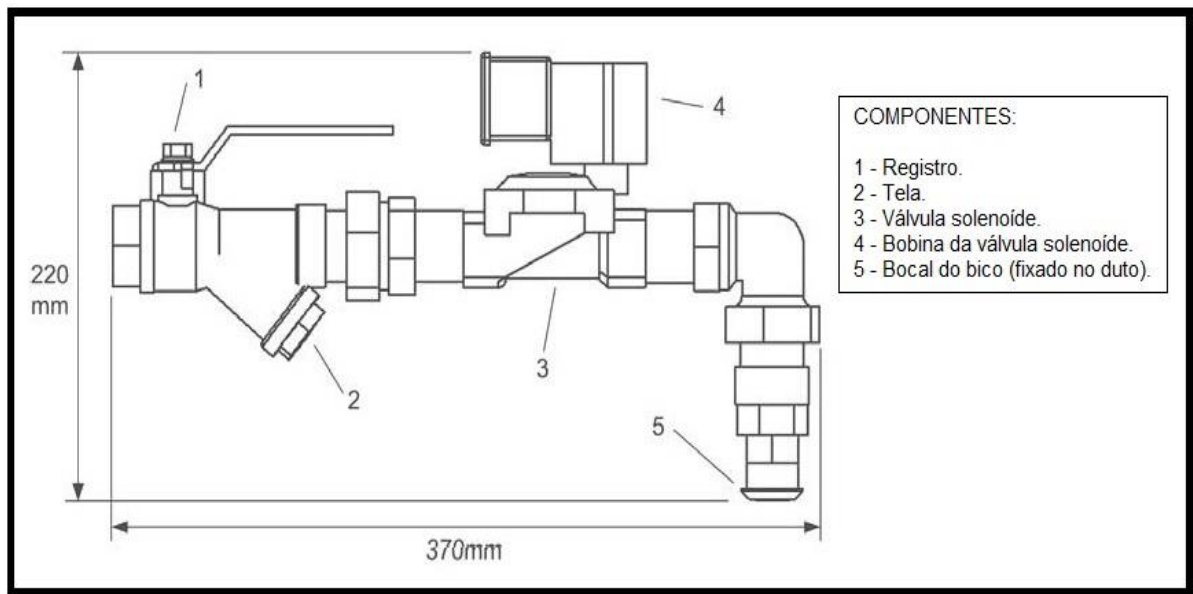


Figura 36 – Componentes do bico extintor de água.
Fonte: Parte do Manual Técnico – www.bsbipd.com

O bico extintor de água é fabricado para que independente do diâmetro do tubo de transporte (duto), todo ele possa ser preenchido com uma névoa de água suficiente para a extinção em um tempo extremamente curto.

As faíscas ou as partículas quentes, juntamente com o fluxo de material passam através da névoa de água e se extinguem com segurança.

A névoa da água é mantida por um período de tempo determinado, desde que não sejam detectadas mais faíscas ou partículas quentes, o procedimento de extinção é concluído após o tempo ajustado. Cada faísca ou partícula quente contido no fluxo de materiais prolonga o tempo de extinção.

Se a pressão da rede água disponível não tiver 10bar, deverá ser instalada uma Unidade de Elevação de Pressão (Figura 37), e também um reservatório exclusivo para abastecer o sistema.



Figura 37 – Unidade de Elevação de Pressão.
Fonte: Parte do catálogo – www.bsbipd.com

Condutores de água e sistemas de extinção em ambientes sujeitos a temperaturas muito baixas deverão ser equipados com um aquecedor isolante.

2.8.7.2 Detector de faísca

Os detectores de faísca (Figura 38) são detectores ópticos altamente sensíveis para uma notificação apurada das menores fontes de ignição em fluxos de material, e contêm sensores ópticos que trabalham no espectro infravermelho de radiação.



Figura 38 – Detector de Faísca (normal).
Fonte: Parte do catálogo – www.grecon.com

Os detectores de faísca são sempre integrados em um sistema de extinção de faísca específica para cada segmento industrial.

O processo de detecção de faíscas deverá preferencialmente se dar em ambientes escuros sem a influência de luz, como é o caso do interior de dutos de exaustão.

Nessa condição os sensores mantêm sua sensibilidade em seu nível máximo, sendo capazes de detectar faíscas que se encontram no interior do fluxo de material transportado, mesmo que o fluxo seja muito denso.

Quando o detector de faísca sofrer com a influência de luz ambiente ou artificial, deverá ser utilizado um detector especial (Figura 39) que reage somente a radiação infravermelha invisível emitida pelas partículas incandescentes.

Nessa situação poder ser necessária para o monitoramento das linhas de montagem ou esteiras condutoras com visores ou aberturas em sistemas de transporte.



Figura 39 – Detector de Faísca (para locais com luz ambiente).
Fonte: Parte do catálogo – www.grecon.com

Quando o processo de produção atingir temperatura superior a 80°C deverá ser utilizado detector de faísca (Figura 40) com três cabos de fibra óptica, onde a fibra óptica transmite a radiação infravermelha emitida pelas faíscas ou partículas incandescentes até o sensor do detector.



Figura 40 – Detector de Faísca (para locais com alta temperatura).
Fonte: Parte do catálogo – www.grecon.com

Cada um dos cabos de fibra óptica transmite a radiação infravermelha até o sensor de faíscas de forma independente, garantindo maior confiabilidade ao sistema e maior segurança.

Caso os detectores estejam expostos às temperaturas extremamente altas, deverão ser utilizados adaptadores especiais de vidro sólido, adaptados aos cabos de fibra óptica. Eles reconhecem as faíscas nos fluxos de produtos, mesmo até se o material transportado estiver em elevada temperatura.

Este tipo de sensor funciona no espectro de infravermelhos de comprimento de onda bem pequeno e são adequados para detectar até mesmo as menores faíscas no fluxo de material transportado.

2.8.7.3 Central de detecção e extinção de faísca

A central de extinção de faísca monitora sistemas industriais para evitar explosões de poeira. Ela controla e comanda todo o fluxo de operação do sistema, em outras palavras ela é o núcleo do sistema.

O monitoramento é feito por meio de detectores de faísca, e se forem detectadas quaisquer faíscas, o evento é relatado para a unidade de controle do sistema, que irá ativar as unidades de extinção de faísca conectadas ou tomar qualquer outra medida concernente a central.

Essas medidas podem incluir extinção com água, ou até mesmo em casos extremos de ocorrência maciça de faíscas, a central pode bloquear o funcionamento individual de um equipamento ou até mesmo parar todos os equipamentos da linha de produção, evitando assim uma maior disseminação de faíscas.

Sempre que são detectadas as faíscas, o sistema informa através de alarme sonora e visual. Todos os sistemas de detecção de faísca disponíveis no mercado dispõem de interface que controlam, monitoram e operam remotamente o sistema através de software instalado e um ou mais microcomputadores, facilitando toda a operação. A Figura 41 mostra um diagrama funcional do sistema de extinção de faísca.

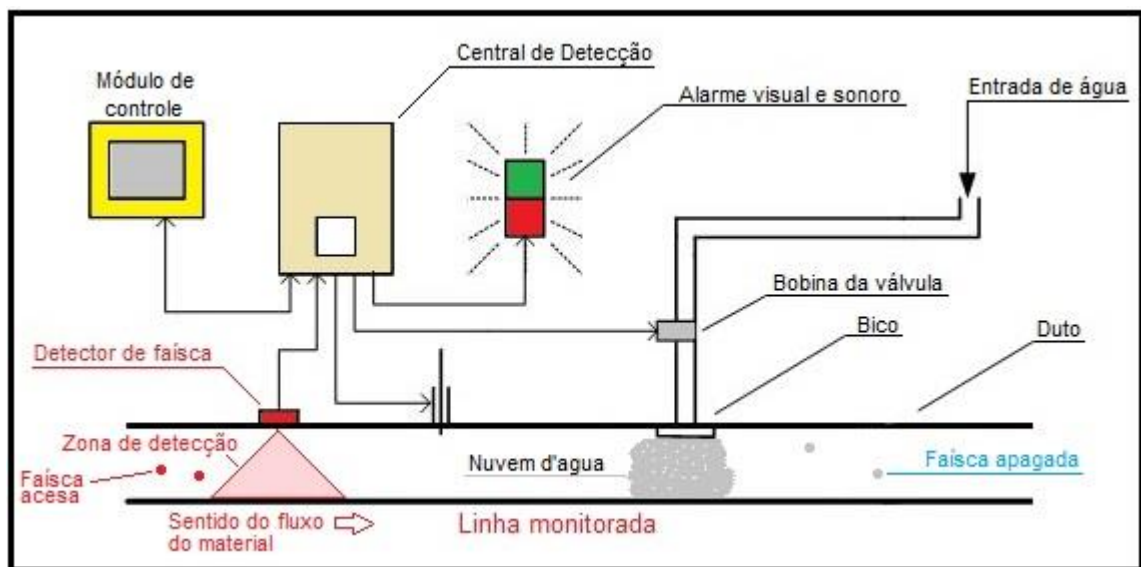


Figura 41 – Sistema de detecção de Faísca.
Fonte: Parte do Manual Técnico – www.bsbipd.com

A central registra, analisa e grava todos os eventos que ocorrem com o sistema, e em caso de alarmes ou mensagens de problemas, as medidas apropriadas podem ser automaticamente iniciadas.

O sistema também realiza a contagem das faíscas detectadas, e de acordo com o número de faíscas detectadas diferentes níveis de alarme são acionados. Para cada nível de alarme podem ser acionadas diferentes medidas.

A detecção de faíscas repetidamente ao longo de curtos intervalos de tempo pode caracterizar uma falha no processo de produção. Quando tal condição é reconhecida

um alarme adicional pode ser ativado, ou o processo especifica que está gerando tal condição e pode desligar o equipamento ou linha automaticamente, isso tudo claro depende de como o sistema foi configurado.

A fim de analisar e investigar as ocorrências de faísca, as centrais disponíveis no mercado armazenam e exibem as informações de cada ocorrência de faíscas.

Dentre as informações encontram-se a data e a hora do evento, o número exato de faíscas detectadas, a duração do evento e o local no qual as faíscas foram detectadas.

Os eventos de cada zona monitorada são armazenados cronologicamente. Os eventos armazenados podem ser avaliados por ordem cronológica de acordo com sua causa, propagação e efeito.

O funcionamento correto de todos os dispositivos de extinção é automaticamente testado pela Central de Controle, que sinaliza imediatamente caso não tenha havido escoamento de água após um alarme, bem como avisa imediatamente no caso de algum vazamento nos dispositivos de extinção.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. ESTUDO DE CASO

Realizado em uma edificação industrial situada no município de São Paulo, utilizada como reformadora de pneus para caminhões, ônibus e tratores.

O objetivo do estudo é identificar e avaliar a concentração, o transporte e o comportamento do pó de borracha nas máquinas e no sistema de aspiração instalado na empresa, utilizando o sistema de detecção de faísca e os bicos de extinção na proteção contra incêndio.

3.2. INFORMAÇÕES DA EMPRESA

A empresa reforma pneus de diversos tipos e atende a empresas dos mais variados segmentos, tais como de transporte coletivo, urbano e rodoviário, transportadores de cargas, construtoras, fazendas, etc. Em média a produção gira em torno de 100 (cem) pneus reformados por dia.

A empresa conta com um quadro de 86 funcionários distribuídos em dois turnos de trabalhos, sendo um das 07:00 às 17:00 horas, e outro das 14:00 às 22:00 horas.

3.3. CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO

A empresa, objeto do estudo, está instalada em um terreno com área total de 4.500 m² e área construída de 2.167 m² (Figura 42) compostos por duas edificações.

A primeira edificação possui uma área construída de 227 m², pé direito de 3,50 m² que abriga o setor administrativo e refeitório, e a outra edificação é um galpão com área construída de 1.940m², pé direito de 6 metros de altura abriga os setores de produção, expedição, depósito, almoxarifado e sala de compressores. O setor de produção ocupa 1.067 m² da área construída (Figura 43), e o restante da área de 873 m² é dividido entre os demais setores.

A edificação é construída na sua totalidade em alvenaria estrutural, a estrutura do telhado é de aço coberto por telhas de chapa metálicas galvanizadas.

A empresa possui e apresentou o Certificado de Conclusão de obra (Habit-se), Alvará de Funcionamento, Licença da CETESB, Laudo de Instalações Elétricas, Laudo de Sistema de Pára-raios, Sistema de detecção e combate contra incêndios conforme Decreto n.º 56.819/11 e o Atestado de Vistoria do Corpo de Bombeiros (AVCB) expedido pelo CBPMESP todos dentro do período de validade.

3.4. MATERIAL DE PESQUISA

Foram realizadas três visitas nas dependências da empresa durante o turno de trabalho diurno, nas quais foram registradas imagens fotográficas nos locais de produção, e também foram realizadas entrevistas com um dos Diretores (responsável pela produção), o técnico responsável pela manutenção e com um operador de cada etapa do ciclo de produção.

Durante essas entrevistas foram gerados relatórios, onde foi possível conhecer e compreender todo o ciclo de produção da reforma de um pneu.

Figura 42 – Planta baixa da empresa objeto do estudo.
Fonte: Arquivo da empresa

Figura 43 – Planta baixa com lay-out do setor de produção.
Fonte: Arquivo da empresa

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. – ENTREVISTA

No início de cada entrevista (conforme descrito no item 3.4) foi explanado o motivo da realização deste estudo, e que o resultado do mesmo, serviria como base para a elaboração de uma monografia para obtenção do título de especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho, e para todos foram realizadas as seguintes perguntas:

- A. Você sabe quais as principais causas de incêndio?
- B. Você já esteve presente em uma situação de incêndio?
- C. Quais tipos de materiais combustíveis você conhece?
- D. Você tem conhecimento se o pó explode?
- E. Em caso de resposta positiva. De que forma isso pode ocorrer e quais os seus efeitos?
- F. Na empresa já houve algum tipo de problema com o pó de borracha?
- G. Você sabe como prevenir uma explosão de pó?

A pergunta “A” todos conheciam algumas causas, sendo que a maioria respondeu “curto circuito”.

Já na pergunta “B” somente um respondeu que sim, pois esteve presente em um incêndio doméstico.

Na pergunta “C” todos também descreveram algum material combustível, na maioria lenha, pois até pouco tempo atrás, nesta empresa havia uma caldeira a lenha a qual foi desativada, pois houve troca de maquinário.

As perguntas “D”, “E”, “F” e “G” todos responderam de forma negativa, e jamais ouviram falar deste tema. Não fiquei surpreso, pois também só tive conhecimento do tema durante o curso, após participar da disciplina eST-301 - Proteção Contra Incêndios e Explosões - Parte B, com o Prof.º Ricardo Metzner.

4.2. VERIFICAÇÃO

No decorrer de cada entrevista foram abordados assuntos referentes a cada etapa do ciclo de produção da reforma dos pneus. Onde foi exposto que a reforma de pneus consiste na reposição da banda de rodagem do pneu desgastado pelo uso, sendo uma prática utilizada em vários países visando evitar o desperdício e também é uma forma de reaproveitar as carcaças dos pneus utilizados pelo setor de transporte, uma vez que estas carcaças são projetadas para ter uma sobrevida e suportar em torno de duas reformas.

Este processo é realizado em oito etapas, sendo a primeira o exame inicial, e sucessivamente a raspagem, escareação, aplicação de cola, o preenchimento, a colocação de nova banda de rodagem, a vulcanização e o exame final.

Todos os resíduos (pó) de borracha gerados durante o processo são aspirados e transportados através de dutos cilíndricos (sistema de aspiração) até um silo para o armazenamento e posterior envio para usina de asfalto borracha.

Como já exposto, inicia-se a etapa do ciclo de reforma com o exame inicial (Figura 44), que consiste na limpeza e análise da carcaça do pneu onde se verifica se o pneu terá condições de ser reformado. Conforme se verificou *in loco* nessa etapa não é produzido nenhum tipo resíduo (pó) de borracha.



Figura 44 – Exame inicial.
Fonte: Arquivo da empresa

A segunda etapa do ciclo de reforma é a raspagem (Figura 45), na qual consiste na remoção da banda de rodagem remanescente deixando o raio de curvatura da carcaça com as dimensões da nova banda a ser aplicada. Aqui já se verifica grande produção de resíduo (pó) de borracha, tanto que neste equipamento tem instalado um coletor interligado ao sistema de aspiração central. Ressalta-se que ainda assim verificou-se uma grande quantidade de resíduo (pó) de borracha no piso.



Figura 45 – Raspagem.
Fonte: Arquivo da empresa

Na terceira etapa ocorre a escareação, que realiza reparos e um acabamento mais apurado em relação à raspagem do pneu.

O pneu dispõe em sua estrutura de uma cintura composta de lonas (malha) de aço (Figura 46) abaixo da banda de rodagem que é retirada na etapa de raspagem.

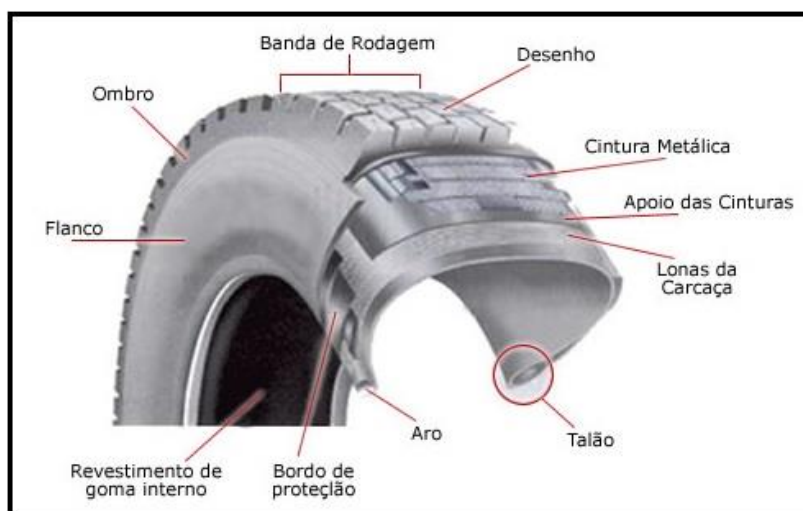


Figura 46 – Estrutura do pneu radial.
Fonte: Arquivo da empresa

Geralmente após a primeira reforma do pneu rompem alguns fios desta lona formando algumas pontas, e as mesmas necessitam de ser retiradas, e para isso utiliza-se o processo de abrasão, o qual gera bastante faísca como pode ser verificada na Figura 47.

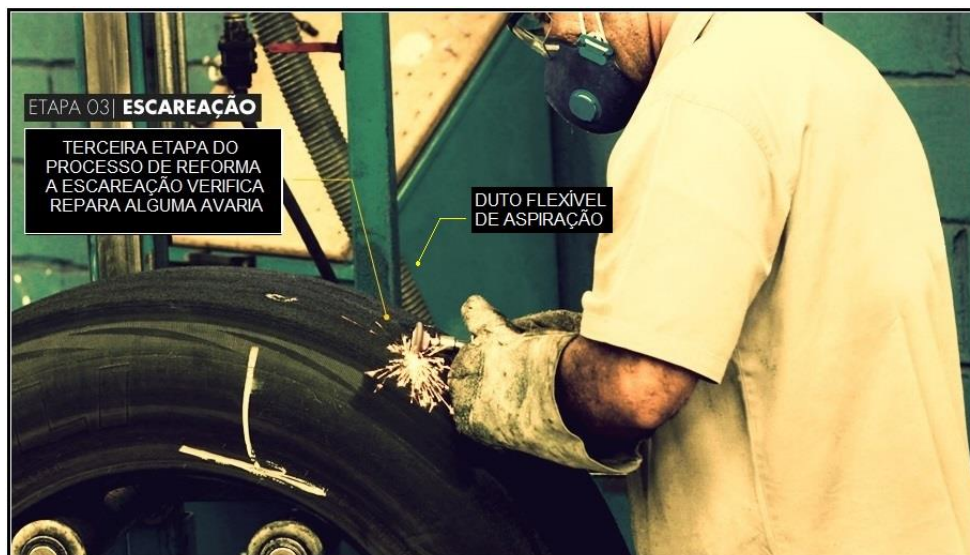


Figura 47 – Escareação
Fonte: Arquivo da empresa

Verifica-se que nesta etapa é gerado bastante resíduo (pó) de borracha, além dos resíduos de metal quente gerado no processo de abrasão para retirada das pontas da malha de aço. Também se verificou que nos equipamentos utilizados nesta etapa, uma retífica pneumática e um cavalete hidráulico onde o pneu é elevado, que não dispõe de coletor de pó a eles incorporado. Ao lado de ambos os equipamentos existe um tubo flexível interligado a um duto do sistema de aspiração, com sua extremidade inferior a uma altura de 80 cm acima do piso sem nenhum coletor de pó, onde o mesmo não é utilizado, consequentemente todo resíduo gerado fica espalhado pelo chão.

Já a quarta etapa é a colagem, onde se aplica uma camada de cola cimento sobre a carcaça do pneu a fim de dar aderência com a nova banda de rodagem. Nesta etapa a aplicação da cola é feita dentro de uma cabine aberta provida de coifa (Figura 48), interligada a um exaustor independente com saída para área externa do galpão, e também independente do sistema central de aspiração.

O produto utilizado é uma cola a base de n-hexano e diluída em solvente à base de nafta de petróleo, produtos esses com alto grau de inflamabilidade, sendo aplicado através de uma pistola de pintura interligada a uma linha de ar comprimido, e mesmo com o exaustor ligado o odor é muito forte em torno do local de aplicação.



Figura 48 – Colagem
Fonte: Arquivo da empresa

A quinta etapa consiste no preenchimento e consertos das carcaças, e tem por objetivo preencher os buracos encontrados na mesma, através de uma extrusora de borracha, reforçando seus pontos fracos e assegurando a integridade da carcaça e da reforma (Figura 49). Esta etapa não gera nenhum resíduo (pó) de borracha.



Figura 49 – Preenchimento e consertos
Fonte: Arquivo da empresa

Na sexta etapa é realizada a cobertura, onde a carcaça recebe uma nova banda de rodagem pré-moldada com um desenho específico para a atividade em que o pneu será utilizado (Figura 50), e nesta etapa também não é gerado resíduo (pó) de borracha.

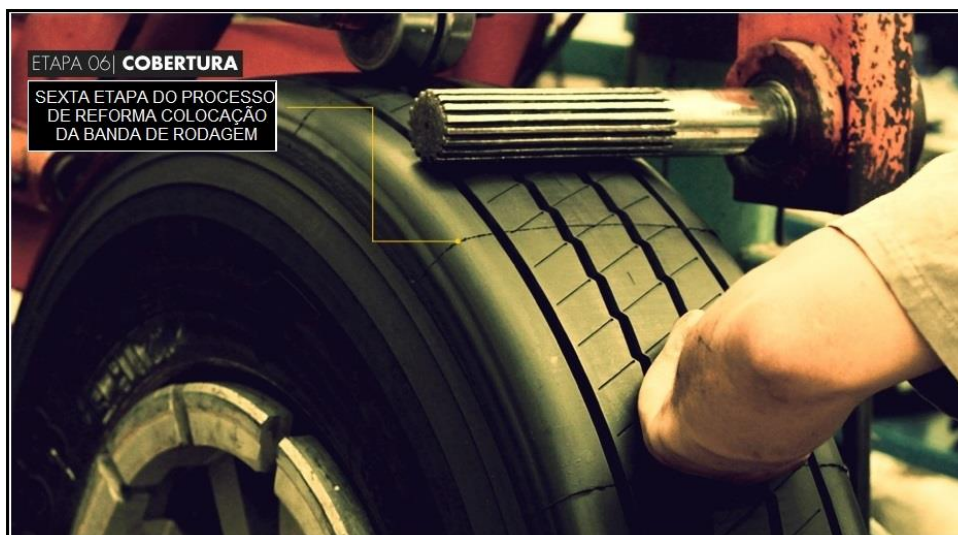


Figura 50 – Cobertura
Fonte: Arquivo da empresa

Na sétima etapa se utiliza autoclaves para o processo de vulcanização que faz a incorporação da banda de rodagem recém-aplicada com a carcaça de pneu (Figura 51).



Figura 51 – Vulcanização
Fonte: Arquivo da empresa

Na autoclave o pneu é exposto por um determinado período de tempo a uma determinada pressão e temperatura.

Nesta etapa também não são gerados resíduos (pó) de borracha, mas não há boa acessibilidade entre as autoclaves, pois estão instaladas a mesmos de 40 cm uma da outra o que dificulta a limpeza (Figura 52).



Figura 52 – Autoclaves - Vulcanização
Fonte: Arquivo da empresa

A oitava e última etapa é o exame final (Figura 53), onde os pneus após saírem das autoclaves, passam por um exame a fim de averiguar o resultado final do processo de reforma, onde se verificam o atendimento a Portaria n.º 444 do Inmetro.

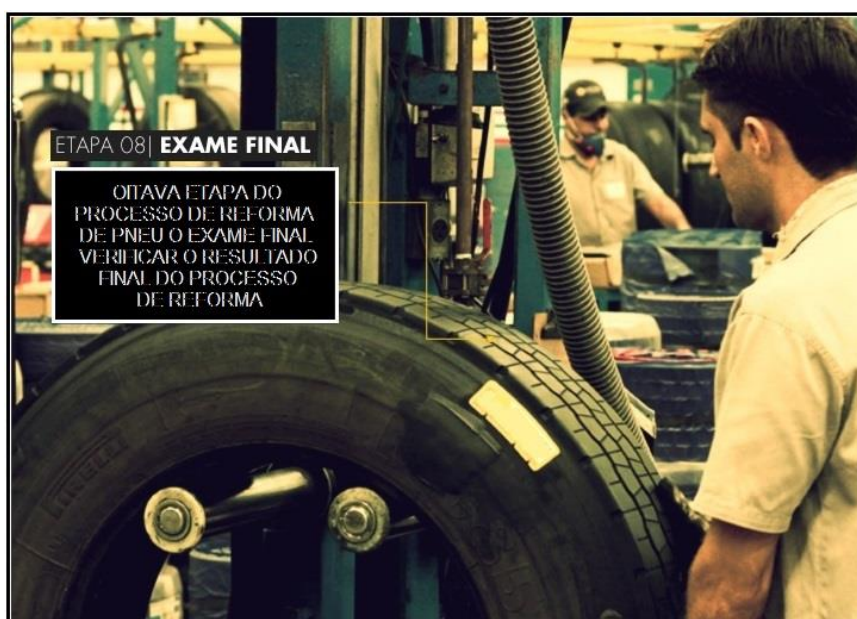


Figura 53 – Exame final
Fonte: Arquivo da empresa

Após a confirmação se todas as etapas foram devidamente cumpridas os pneus são enviados para o depósito e posteriormente aos clientes. Se existir alguma inconformidade com o pneu, o processo é refeito novamente. Na etapa de exame final não é gerado nenhum resíduo (pó) de borracha.

4.3. DISCUSSÕES / RESULTADOS

A empresa já havia implantado algumas medidas de proteção ativa e passiva na proteção contra incêndio, pois já possui sistema de detecção de fumaça, iluminação de emergência, rotas de fuga, sinalização, alarme de incêndio e equipamentos de combate a incêndio (sistema de hidrantes, extintores para todas as classes de fogo), que a princípio atendem às normas do Corpo de Bombeiros, tanto que a empresa possui o AVCB emitido pelo CBMESP.

Porém as medidas de proteção já adotadas são insuficientes para o caso em questão, pois ainda necessita de algumas medidas corretivas, a fim de garantir a integridade física dos funcionários, da edificação, bem como das instalações da empresa a fim de evitar interrupções no ciclo de produção.

Como pode ser visto, nas etapas do ciclo de reforma dos pneus foram verificadas algumas irregularidades, como por exemplo, excesso de pó espalhado no piso e nos equipamentos, alta dispersão de faísca, odor demasiado dos produtos utilizados, manuseio de produtos inflamáveis e falta de acessibilidade entre os equipamentos.

A ineficiência do sistema de aspiração acaba gerando grande concentração de pó nos equipamentos e no piso, pois na raspagem já existe o coletor de pó interligado ao sistema de aspiração, e na escareação o sistema de aspiração não está interligado ao equipamento.

Também na escareação além do pó a retífica não dispõe de dispositivo que limite a dispersão das faíscas produzidas, pois como pode ser verificado na Figura 43, o setor de escareação está ao lado do setor de colagem de carcaças, onde há alta liberação de gases e concentração de material inflamável.

Nas autoclaves a limpeza dos equipamentos fica comprometida, em face da pouca acessibilidade entre os equipamentos.

Em toda a extensão da linha de dutos (rígido e flexível) do sistema aspiração e no silo de armazenamento de pó não existe sistema de detecção e extinção de faíscas e painel de explosão.

Também é importante que a direção da empresa e todos os trabalhadores tenham conhecimento dos riscos e das consequências que o transporte através dos dutos, a concentração, o acúmulo e o armazenamento do pó da borracha ao qual estão expostos. Tal medida poderia ser sanada através de palestras ou cartazes explicativos em toda a extensão da empresa.

A diminuição da quantidade de pó pode ser resolvida através de alterações no sistema de aspiração nos equipamentos, verificando se o exaustor existente atende a capacidade de toda linha de produção, e também modificando os coletores existentes nos equipamentos de raspagem, instalando coletores junto às retificas pneumáticas nos equipamentos de escareação e os interligando ao sistema aspiração.

Ainda no setor de escareação a instalação de dispositivos que limitem e direcionem a faíscas para o coletor do sistema de aspiração, diminuindo assim pontos de fontes de ignição devido à proximidade do setor de colagem.

No setor de colagem deverá ser revista a cabine existente, pois a mesma não dispõe de sistema de exaustão eficiente, e também alterar a forma como são manipulados os produtos inflamáveis devendo a manipulação dos produtos ser realizada em local apropriado.

Nas autoclaves deverão ser revistas as distâncias entre os equipamentos visando ter maior acessibilidade durante a limpeza e manutenção dos mesmos, pois a autoclave durante a vulcanização atinge a temperatura de 180 °C.

A limpeza deverá ser de forma contínua não só nas autoclaves, como em todos os equipamentos da empresa, pois mesmo com um sistema de aspiração eficiente, poderá ocorrer, ainda que pequena, uma concentração de pó de borracha.

Nas linhas de dutos (rígido e flexível) do sistema de aspiração e no silo de armazenamento de pó, deverá ser dimensionado e instalado sistema de detecção e extinção de faíscas, e no silo deverá ser instalado painel de explosão.

Todo o sistema de aspiração e os equipamentos metálicos não condutores de corrente elétrica, deverão ser aterrados com resistência de aterramento inferior a 10 ohms (ABNT NBR-5419, 2005) e (ABNT NBR-5410, 2004), afim evitar possíveis fontes de ignição.

5. CONCLUSÃO

Os objetivos propostos inicialmente foram alcançados, onde foi possível convergir os conceitos acadêmicos obtidos durante o curso, com as pesquisas de diversas literaturas, normas técnicas e consulta à fabricante de equipamentos de proteção contra incêndio, com a realidade verificada na indústria analisada, onde se conseguiu obter subsídios para identificar, avaliar e opinar sobre o tema proposto.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 6184-1: Sistemas de proteção contra explosão - Parte 1: Determinação dos índices de explosão dos pós-combustíveis no ar. Rio de Janeiro, 2007. 6 p.

_____ - **NBR 6184-2:** Sistema de proteção contra explosão – Parte 2: Determinação de índices de explosão de gases combustíveis no ar. Rio de Janeiro, 2007. 6 p.

_____ - **NBR 6184-3:** Sistema de proteção contra explosão - Parte 3: Determinação dos índices de explosão de mistura ar/combustível exceto as misturas pó/ar e gás/ar. Rio de Janeiro, 2007. 6 p.

_____ - **NBR 6184-4:** Sistema de Proteção contra explosões - Parte 4: Determinação da eficácia dos sistemas de supressão de explosões. Rio de Janeiro, 2007. 6 p.

_____ - **NBR 15662:** Sistemas de Prevenção e Proteção contra Explosão - Gerenciamento de Riscos de explosões. Rio de Janeiro, 2009. 27 p.

_____ - **NBR 5410:** Instalações Elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004. Versão Corrigida 2008. 209 p.

_____ - **NBR 5419:** Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2005. 42 p.

BARTON, Jonh. Dust Explosion Prevention and Protection – A Practical Guide. UK: Institution of Chemical Engineers, 2002. 352 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN EN 14034-1: Determination of explosion characteristics of dust clouds - Part 1: Determination of the maximum explosion pressure P_{max} of dust clouds (includes Amendment A1). Berlin, 2011. 29 p.

_____ - **DIN EN 14034-2:** Determination of explosion characteristics of dust clouds - Part 2: Determination of the maximum rate of explosion pressure rise $(dp/dt)_{max}$ of dust clouds (includes Amendment A1:2011). Berlin, 2011. 31 p.

_____ - **DIN EN 14034-3:** Determination of explosion characteristics of dust clouds - Part 3: Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds (includes Amendment A1:2011) . Berlin, 2011. 29 p.

_____ - **DIN EN 15188:** Determination of the spontaneous ignition behaviour of dust accumulations. Berlin, 2007. 23 p.

_____ - **DIN EN 13821: 2003:** Potentially explosive atmospheres - Explosion prevention and protection - Determination of minimum ignition energy of dust/air mixtures. Berlin, 2003. 17 p.

_____ - **DIN EN 13284-1:** Stationary source emissions - Determination of low range mass concentration of dust - Part 1: Manual gravimetric method. Berlin, 2002. 42 p.

_____ - **DIN EN 13284-2:** Stationary source emissions - Determination of low range mass concentration of dust - Part 2: Automated measuring systems. Berlin, 2004

ECKHOFF, Rolf K.. Dust explosions in the process industries. USA. Gulf Professional Publishing – Elsevier Science, 2003. 719 p.

INTERNATIONAL ELECTROTECHICAL COMMISSION - IEC 61241-2-1: Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust - Part 2: Test methods - Section 1: Methods for determining the minimum ignition temperatures of dust. USA, 1994. 61 p.

_____ - **IEC 61241-2-3:** Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust - Part 2: Test methods - Section 3: Method for determining minimum ignition energy of dust/air mixtures. USA, 1994. 38 p.

KRAUSE, Ulrich. Fire in Silos: Hazards, Prevention, and Fire Fighting. Berlin. John Wiley & Sons, 2009. 176 p.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Norma Regulamentadora n.º 10 – Segurança em instalações e serviços em eletricidade. Portaria GM nº 598, de 7 de dezembro de 2004. Brasília, 2004.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION - NFPA 654: Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids. USA, 2013. 64p.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia. Engenharia de Segurança do Trabalho. Proteção contra incêndio e explosões - Parte A. São Paulo, 2011.

_____. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia. Engenharia de Segurança do Trabalho. Proteção contra incêndio e explosões - Parte B. São Paulo, 2011.

ANEXO A

Limite de Explosividade - Tabela 1

| Matérias | Peso molecular | Peso específico kg/m³ | Limites de explosividade Porcentagem (%) em volume | | Máxima concentração MAC | |
|-------------------------|----------------|-----------------------|---|--------------|----------------------------|-------|
| | | | Inferior LIE | Superior LSE | p.p.m. | mg/m³ |
| Dicloroelileno | 96,95 | 1,291 | 9,7 | 12,8 | 5 | 20 |
| Diclorometano | 98,97 | 1,257 | 6,2 | 15,9 | 50 | 174 |
| Dicloreto de propileno | 112,99 | 1,159 | 3,4 | 14,5 | 75 | 347 |
| Disulfido decarbono | 76,13 | 1,263 | 1,25 | 50 | - | - |
| Estireno | 104,14 | 0,903 | 1,1 | 6,1 | 50 | 213 |
| Eter etílico | 74,12 | 0,713 | - | - | 400 | 1200 |
| Etoxietanol | 90,12 | 0,931 | 2,6 | 15,7 | 5 | 18 |
| Formaldeído | 30,03 | 0,815 | 7 | 73 | 5 | 6 |
| Formiato de etilo | 74,08 | 0,917 | 2,75 | 16,4 | 100 | 303 |
| Formiato de metilo | 60,05 | 0,974 | 4,5 | 20 | 100 | 246 |
| Gasolina | 86 | 0,68 | 1,3 | 6 | 300 | 890 |
| Heptano | 100,2 | 0,684 | 1,1 | 6,7 | 400 | 1.640 |
| Hexano | 86,17 | 0,66 | 1,18 | 7,4 | 100 | 360 |
| Metanol | 34,04 | 0,792 | 6,72 | 36,5 | 200 | 260 |
| Monóxido de carbono | 28,1 | 0,968 | 12,5 | 74,2 | 50 | 55 |
| Octano | 114,22 | 0,703 | 0,95 | 3,2 | 300 | 1.450 |
| Óxido de etileno | 44,05 | 0,887 | 3 | 80 | 1 | 1,8 |
| Pentano | 72,15 | 0,625 | 1,4 | 7,8 | 600 | 1.800 |
| Percloroetileno | 165,85 | 1,624 | Não inflamável | - | 100 | 670 |
| Propano | 44,09 | 1,554 | 2,12 | 9,35 | - | - |
| Sulfuro de carbono | 76,13 | 1,263 | 1,25 | 50 | 20 | 60 |
| Tetracloruro de carbono | 153,84 | 1,595 | Não inflamável | - | 10 | 65 |
| Tolueno | 93,12 | 0,866 | 1,27 | 6,75 | 100 | 375 |
| Tricloroetileno | 131,4 | 1,466 | Não inflamável | - | 100 | 535 |
| Xileno | 106,16 | 0,881 | 1 | 6 | 100 | 435 |