

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

ISABELLE FERREIRA

**SEGURANÇA EM ATMOSFERAS EXPLOSIVAS NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA:
UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DAS NORMAS TÉCNICAS E DA NR-10 COM
ESTUDO DE CASO APLICADO**

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

ISABELLE FERREIRA

**SEGURANÇA EM ATMOSFERAS EXPLOSIVAS NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA:
UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DAS NORMAS TÉCNICAS E DA NR-10 COM
ESTUDO DE CASO APLICADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Química, pela
Universidade Federal de Alfenas.
Orientador: Prof. Dr. Leandro Lodi

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Ferreira, Isabelle.

Segurança em atmosferas explosivas na indústria alimentícia : uma revisão bibliográfica das normas técnicas e da NR-10 com estudo de caso aplicado / Isabelle Ferreira. - Poços de Caldas, MG, 2025.

71 f. : il. -

Orientador(a): Leandro Lodi.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. Atmosferas explosivas. 2. Poeiras combustíveis. 3. Segurança elétrica.
I. Lodi, Leandro, orient. II. Título.

ISABELLE FERREIRA

**SEGURANÇA EM ATMOSFERAS EXPLOSIVAS NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA:
UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DAS NORMAS TÉCNICAS E DA NR-10 COM
ESTUDO DE CASO APLICADO**

A banca examinadora abaixo-assinada aprova o Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Engenharia Química.

Aprovada em: 03 de dezembro de 2025

Prof. Dr. Leandro Lodi
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Documento assinado digitalmente



LEANDRO LODI

Data: 08/12/2025 08:01:34-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Cláudio Antônio de Andrade Lima
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Documento assinado digitalmente



CLAUDIO ANTONIO DE ANDRADE LIMA

Data: 08/12/2025 11:33:37-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Thiago da Anunciação
Engenheiro de Produção

Assinatura:

Documento assinado digitalmente



THIAGO DA ANUNCIACAO

Data: 08/12/2025 14:13:59-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dedico o presente trabalho aos meus pais Sandro Aurélio Ferreira e Maristela da Hora Ferreira e a minha irmã Cecília Ferreira que foram fonte de apoio e motivação durante toda a graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder a vida, a saúde e a resiliência necessárias para superar os desafios e continuar seguindo em busca dos meus sonhos.

Aos meus pais e à minha irmã, manifesto minha mais profunda gratidão pelo apoio incondicional, pela compreensão e pelo incentivo constante, tanto emocional quanto financeiro, ao longo de toda a graduação. Todo o apoio de vocês tornou o processo mais leve, mesmo nos tempos difíceis.

Agradeço também meu orientador e todos os docentes que contribuíram para minha formação acadêmica e profissional, pela dedicação, paciência, parceria e compromisso em compartilhar conhecimento. Cada ensinamento recebido foi essencial para o início da construção de uma carreira sólida.

Estendo meus agradecimentos ao supervisor do time de manutenção da empresa em que se realizou o estudo de caso, por toda colaboração e apoio na disponibilização dos documentos utilizados, contribuindo significativamente para o desenvolvimento de parte do estudo.

E a todos que, direta ou indiretamente, estiveram presentes durante essa jornada, oferecendo aprendizados, lições, apoio e inspiração, deixo meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre as implicações da Norma Regulamentadora nº10 (NR-10) na segurança elétrica de atmosferas explosivas de poeira, com foco no setor alimentício. Foram abordados os fundamentos físico-químicos das explosões, as características das poeiras combustíveis e as normas técnicas aplicáveis, como a série ABNT NBR IEC 60079. Complementarmente, considerando que a segurança em instalações elétricas é fundamental para o adequado funcionamento das indústrias modernas, um estudo de caso foi realizado em uma indústria de leite em pó, analisando a classificação de áreas, a adequação dos equipamentos elétricos “Ex” e as práticas de prevenção adotadas. Os resultados demonstram que a conformidade normativa é essencial para reduzir riscos de explosão, garantindo a integridade dos colaboradores e instalações. O estudo contribui para a formação acadêmica e para a promoção de uma cultura de segurança industrial.

Palavras-chave: atmosferas explosivas; poeiras combustíveis; segurança elétrica.

ABSTRACT

This work presents a literature review on the implications of Regulatory Standard No. 10 (NR-10) for electrical safety in explosive dust atmospheres, focusing on the food industry. The study addressed the physicochemical fundamentals of explosions, the characteristics of combustible dust, and the applicable technical standards, such as ABNT NBR IEC 60079 series. Additionally, considering that safety in electrical installations is essential for the proper functioning of modern industries, a study case was conducted in a powdered milk industry, analyzing area classification, compliance of “Ex” electrical equipment, and preventive practices adopted. The results showed that regulatory compliance is essential to reduce explosion risks, ensuring the integrity of workers and facilities. This research contributes to academic training and promotes a culture of industrial safety.

Keywords: explosive atmospheres; combustible dust; electrical safety.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ILUSTRAÇÃO 1 – Representação ilustrativa do triângulo do fogo.....	25
ILUSTRAÇÃO 2 – Representação ilustrativa do Hexágono da Explosão.....	28
ILUSTRAÇÃO 3 – Representação das explosões primárias, secundárias e reações em cadeia.....	29
ILUSTRAÇÃO 4 – Deflagração em termos de pressão.....	31
ILUSTRAÇÃO 5 – Detonação em termos de pressão.....	32
ILUSTRAÇÃO 6 – Simbologia recomendada para classificação das zonas 20, 21 e 22.....	46
ILUSTRAÇÃO 7 – Exemplos de placas de sinalização para áreas classificadas.....	47
ILUSTRAÇÃO 8 – Primeiro modelo de placa de sinalização “Ex” da empresa Y.....	59
ILUSTRAÇÃO 9 – Segundo modelo de placa de sinalização “Ex” da empresa Y.....	59
ILUSTRAÇÃO 10 – Foto da placa de sinalização presente no silo de pré-mistura da empresa Y.....	60
ILUSTRAÇÃO 11 – Foto da placa de sinalização presente em um dos painéis elétricos “Ex” da empresa Y.....	60
ILUSTRAÇÃO 12 – Simbologia de zoneamento da etapa de pré-mistura da empresa Y.....	61
ILUSTRAÇÃO 13 – Etiqueta com marcações de zona e energia mínima de Ignição.....	63
ILUSTRAÇÃO 14 – Especificações de dispositivo para atmosferas explosivas de poeira.....	63

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Principais normas técnicas sobre atmosferas explosivas.....	20
TABELA 2 - Classe da poeira combustível de acordo com seu K_{ST}	38
TABELA 3 - Grupos de poeiras combustíveis.....	39
TABELA 4 - Exemplo do modelo de marcação para equipamentos Ex conforme INMETRO.....	48
TABELA 5 - Primeiro dígito presente no índice de proteção dos equipamentos.....	52
TABELA 6 - Segundo dígito presente no índice de proteção dos equipamentos.....	53
TABELA 7 - Valores de K_{ST} e tamanho médio de partícula.....	56
TABELA 8 - Valores de energia e temperatura mínima de ignição.....	57
TABELA 9 - Valores de concentração mínima de explosividade, grupos de poeira e temperatura máxima de superfície.....	58

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVOS	14
2.1.1.	Objetivo geral	14
2.1.2.	Objetivos específicos	14
3.	JUSTIFICATIVA	15
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
4.1.	PROBLEMÁTICA DOS RISCOS ENVOLVENDO SISTEMAS ELÉTRICOS	16
4.2.	CONTEXTO HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO DA NR-10	17
4.3.	CONTEXTO HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DAS NORMAS REGULAMENTADORAS SOBRE ATMOSFERAS EXPLOSIVAS NO BRASIL E NO MUNDO	18
4.3.1.	Principais normas regulamentadoras de atmosferas explosivas no brasil	20
4.4.	ASPECTOS FÍSICO-QUÍMICOS DE EXPLOSÕES CONVENCIONAIS	23
4.4.1.	Triângulo do fogo e suas características	24
4.4.1.1.	Combustíveis	25
4.4.1.2.	Comburentes ou Oxidantes	26
4.4.1.3.	Fonte de ignição	26
4.4.2.	Ponto de fulgor	27
4.4.3.	Ponto de combustão	27
4.4.4.	Temperatura de autoignição	27
4.4.5.	Hexágono da explosão	28
4.5.	MECANISMO POR TRÁS DAS EXPLOSÕES DE PÓS/POEIRAS COMBUSTÍVEIS	29
4.5.1.	Explosão primária	30
4.5.2.	Explosão secundária	30
4.5.3.	Deflagração	31
4.5.4.	Detonação	31
4.6.	CARACTERÍSTICAS DOS PÓS/ POEIRAS COMBUSTÍVEIS QUE CORROBORAM PARA EXPLOSÃO	32
4.6.1.	Dimensão da partícula	32
4.6.2.	Teor de umidade	33

4.6.3.	Energia mínima de ignição	34
4.6.3.1.	Temperatura mínima de ignição de nuvens de poeira	34
4.6.3.2.	Temperatura mínima de ignição de camada de poeira	35
4.6.4.	Concentração mínima de explosividade e limites de explosão para poeiras.....	36
4.7.	ÍNDICE DE GRAVIDADE DA EXPLOSÃO.....	37
4.8.	GRUPOS DE POEIRAS E RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	38
4.9.	FONTES DE IGNIÇÃO E MÉTODOS DE PREVENÇÃO	39
4.9.1.	Conglomerados incandescentes	39
4.9.2.	Chamas livres	40
4.9.3.	Superfícies quentes	40
4.9.4.	Impactos mecânicos	41
4.9.5.	Faíscas elétricas e eletrostáticas.....	41
4.9.5.1.	Faíscas elétricas	41
4.9.5.2.	Faíscas eletrostáticas.....	42
4.9.6.	Radiação, ondas de choque e jatos quentes	42
4.10.	ÁREAS CLASSIFICADAS.....	43
4.10.1.	Graus de liberação	43
4.10.2.	Graus e disponibilidade de ventilação	43
4.10.3.	Níveis de limpeza.....	44
4.10.4.	Zonas de classificação	45
4.10.5.	Sinalização de segurança em áreas classificadas	46
4.11.	EQUIPAMENTOS	47
4.11.1.	Tipos de proteção para as diferentes zonas de classificação.....	48
4.11.1.1.	Proteção à prova de explosão (Ex d).....	49
4.11.1.2.	Pressurização (Ex-p)	49
4.11.1.3.	Equipamento imerso em areia (Ex-q)	49
4.11.1.4.	Equipamento imerso em óleo (Ex-o)	49
4.11.1.5.	Segurança aumentada (Ex-e).....	50
4.11.1.6.	Segurança intrínseca [Ex-i (ia ou ib)].....	50
4.11.1.7.	Não acendível [Ex-n (na; nr; nc; nl)]	50
4.11.1.8.	Equipamento encapsulado em resina (Ex-m).....	50
4.11.1.9.	Proteção por invólucro (Ex-t).....	51
4.11.2.	Classe de temperatura	51

4.11.3.	Nível de proteção de equipamentos	51
4.11.4.	Índice de proteção aplicado a equipamentos	51
5.	METODOLOGIA	54
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
6.1.	ÍNDICE DE GRAVIDADE DA EXPLOSÃO E TAMANHO MÉDIO DE PARTÍCULA.....	56
6.2.	ENERGIA E TEMPERATURA MÍNIMA DE IGNIÇÃO	57
6.3.	CONCENTRAÇÃO MÍNIMA DE EXPLOSÃO, GRUPO DE POEIRA E TEMPERATURA MÁXIMA DE SUPERFÍCIE	57
6.4.	PLACAS DE SINALIZAÇÃO DE ÁREA CLASSIFICADA	58
6.5.	CLASSIFICAÇÃO DE ZONAS.....	61
6.6.	EQUIPAMENTOS.....	63
6.7.	LIMPEZA E ORGANIZAÇÃO	64
6.8.	TREINAMENTO, ORIENTAÇÕES E BOAS PRÁTICAS PARA DESEMPENHO DE ATIVIDADES EM ÁREAS CLASSIFICADAS.....	65
7.	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS	67

1. INTRODUÇÃO

A crescente complexidade dos processos industriais e a utilização intensiva de energia elétrica tornam a segurança em instalações industriais um fator crítico para a prevenção de acidentes. No contexto brasileiro, a NR-10 estabelece os requisitos mínimos para garantir a integridade física dos colaboradores que atuam direta, ou indiretamente, com sistemas elétricos (PEREIRA; SOUZA, 2010). Entretanto, em se tratando de atmosferas explosivas formadas por poeiras combustíveis, os riscos assumem proporções ainda mais significativas. Explosões de poeira, embora menos comentadas que as de gases inflamáveis, podem gerar consequências devastadoras, incluindo perdas humanas, materiais e ambientais (ECKHOFF, 2005; ECKHOFF; LI, 2021).

Diante deste cenário, surge o questionamento sobre como garantir a segurança elétrica em atmosferas explosivas de poeira no setor alimentício, considerando normas como a NR-10 e ABNT NBR IEC 60079? Desta forma, a hipótese que norteia este projeto final de curso é a de que a adoção de equipamentos certificados e boas práticas alinhadas às normas, reduz significativamente os riscos de explosões, promovendo ambientes industriais mais seguros.

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica e um estudo de caso acerca das condições de segurança elétrica em atmosferas explosivas de poeira no contexto industrial, analisando os fundamentos e características das explosões de poeira combustíveis, bem como na sua relação com as especificações de equipamentos para áreas classificadas.

A escolha do tema é justificada pela relevância social e profissional da prevenção de acidentes em ambientes industriais, especialmente aqueles que manipulam pós com características combustíveis, como indústrias de produtos infantis. Além de atender às exigências legais, compreender os mecanismos que levam à formação e ignição dessas atmosferas é essencial implementar medidas preventivas eficazes. Complementarmente, este estudo contribui como material para as aulas de instalações industriais, fornecendo subsídios teóricos práticos que reforçam a cultura de segurança e responsabilidade profissional.

Frente ao exposto, o estudo está organizado em capítulos que abordam a fundamentação teórica, normas aplicáveis, análises dos riscos e um estudo de caso em indústria alimentícia.

2. OBJETIVOS

2.1.1. Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica e um estudo de caso acerca das condições de segurança elétrica em atmosferas explosivas de poeira no contexto industrial, além de contribuir como material complementar para a disciplina de Instalações Industriais.

2.1.2. Objetivos específicos

- a) Estudar os fundamentos teóricos das explosões de poeira, abordando suas condições de ocorrência, parâmetros críticos e características físico-químicas;
- b) Revisar a literatura técnica e normativa relacionada à segurança elétrica, atmosferas explosivas e classificação de áreas conforme a NR-10 e as normas da série ABNT NBR IEC 60079;
- c) Identificar os principais riscos e causas potenciais de explosões de poeira em processos industriais, com ênfase no setor alimentício;
- d) Analisar os critérios de especificação de equipamentos elétricos destinados a áreas classificadas, considerando a prevenção de ignição e propagação de explosões;
- e) Aplicar os conhecimentos obtidos na revisão bibliográfica em um estudo de caso representativo, observando a aplicação prática das medidas de segurança e a conformidade com as normas vigentes;
- f) Produzir um material que venha a servir de apoio para a disciplina de Instalações Industriais, com enfoque didático na compreensão dos fenômenos explosivos e na importância da gestão de riscos em atmosferas com poeiras combustíveis.

3. JUSTIFICATIVA

A segurança em instalações elétricas é fundamental para que as indústrias modernas funcionem adequadamente. No contexto brasileiro, a Norma Regulamentadora nº 10 (NR-10) estabelece requisitos e condições mínimas para garantir a saúde e segurança dos colaboradores que trabalham com eletricidade. No entanto, quando se trata de atmosferas explosivas, especialmente aquelas formadas por poeiras combustíveis em setores como o alimentício, o cumprimento das exigências normativas é considerado ainda mais crítico.

As explosões de poeira são configuradas como um dos fenômenos mais perigosos e, ao mesmo tempo, subestimados no ambiente industrial. Apesar de sua ocorrência não ser tão discutida quanto as explosões por gases inflamáveis, seus efeitos podem ser igualmente devastadores, resultando em perdas humanas, materiais e ambientais. Compreender os fundamentos físicos e químicos que levam à formação e à ignição dessas atmosferas é essencial para a implementação de medidas preventivas eficazes e para a correta especificação de equipamentos elétricos em áreas classificadas.

Desta forma, a realização de uma revisão bibliográfica permite reunir e analisar criticamente o conhecimento técnico e normativo disponível, fornecendo a base teórica necessária para o entendimento das causas, consequências e formas de mitigação das explosões de poeira. Complementarmente, o estudo de caso possibilita observar a aplicação prática dos conceitos estudados, identificando boas práticas e desafios enfrentados pelas indústrias no atendimento à NR-10 e às normas da série ABNT NBR IEC 60079.

Frente ao pressuposto, além do que fora mencionado anteriormente, este trabalho busca contribuir com a formação acadêmica dos alunos de engenharia da Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, servindo como material complementar para a disciplina de instalações industriais. Dessa forma, o estudo não apenas aprofunda a compreensão dos riscos elétricos e das atmosferas explosivas, mas também estimula uma cultura de segurança, prevenção e responsabilidade profissional dentro do ambiente industrial.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo a ABNT NBR IEC 60079-10-1:2009 *apud* Rosa (2024), atmosferas explosivas são uma mistura de substâncias inflamáveis na forma de gás, vapor, névoa ou poeira com o ar, que sob condições atmosféricas, ao sofrer ignição ocasionam uma combustão autossustentada do restante da mistura.

Alinhado à temática do presente trabalho, ainda segundo Rosa (2024), atmosferas explosivas de poeira são caracterizadas pela presença de uma mistura de partículas combustíveis e o oxigênio do ar que quando acionada por uma fonte de ignição, sob condições atmosféricas e em concentrações específicas, entram em combustão resultando em uma explosão que se propaga rapidamente.

Conforme o exposto, após caracterizadas as atmosferas explosivas, é de suma importância compreender quais são as condições que podem desencadear uma possível explosão e quais são as normas técnicas e regulamentações vigentes além dos mecanismos de proteção existentes para prevenir ou mitigar estes eventos. Mas, antes, é fundamental conhecer um pouco do histórico por trás destes estudos.

4.1. PROBLEMÁTICA DOS RISCOS ENVOLVENDO SISTEMAS ELÉTRICOS

A descoberta e utilização da energia elétrica foram cruciais para o desenvolvimento das indústrias contemporâneas. Isso, é decorrente do fato de que esta é facilmente convertida em outras formas de energia, como mecânica, térmica ou luminosa, por exemplo, além de ser facilmente transportada dos pontos de geração até os pontos de consumo. No entanto, considerando que a eletricidade é praticamente invisível sob observação direta, sua percepção e controle são comprometidos, corroborando em um aumento nos perigos à segurança e integridade humanas (RODRIGUES; SIMÕES; MOREIRA, 2024).

Desta forma, a segurança em ambientes de trabalho com instalações elétricas é extremamente relevante, tendo em vista os elevados índices de acidentes e fatalidades registrados ao longo dos anos (BARROS; NASCIMENTO, 2024). Uma avaliação quantitativa da informação previamente exposta pode ser observada em um estudo conduzido por Costa, Pinto e Alves (2019), no qual é relatado que entre os anos de 2013 e 2015, foram registrados em média, 830 casos por ano, dos quais 36% resultaram em morte. Em seguida, no ano de 2016, foram registrados uma média de

749 acidentes que ocasionaram 250 óbitos. Já em outro levantamento, ainda segundo autores, em 2016 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) registrou 209 mortes envolvendo apenas a rede elétrica, além de 605 mortes corroboradas por outros tipos de acidentes envolvendo eletricidade.

Frente ao pressuposto, considerando o cenário de estudo do presente trabalho, atmosferas explosivas, o desafio enquanto a segurança ocupacional é ainda maior, sendo, portanto, necessário mapear todos os riscos, delimitar corretamente as áreas classificadas além de identificar e implementar as categorias corretas para que os equipamentos adequados operem em cada situação. Este passo a passo é fundamental para a criação de um sistema de trabalho seguro (CARVALHO; CRUZ, 2018).

4.2. CONTEXTO HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO DA NR-10

Com base no que foi escrito por Pereira e Souza (2010) no manual de auxílio na interpretação e aplicação da NR-10, publicado pelo Ministério do Trabalho e Emprego, esta norma regulamentadora (NR), estabelece os requisitos e condições mínimas para a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos que assegurem a segurança e a saúde dos colaboradores que, direta ou indiretamente, atuam em instalações elétricas ou que realizem qualquer outro tipo de serviço que envolva eletricidade.

Tal NR é aplicada desde as fases de geração, transmissão, distribuição e consumo além de incluir etapas de projeto, construção, montagem, operação e manutenção de instalações elétricas, sempre em conformidade com outras normas técnicas oficiais cabíveis estabelecidas pelos órgãos competentes (PEREIRA; SOUZA, 2010).

Apesar de atualmente, as normas serem bem estruturadas, a segurança do trabalho no Brasil, começou a ser sistematizada com a criação da Consolidação das Leis Trabalhista (CLT) em 1943. Com a crescente industrial, o número de acidentes também cresceu, culminando no desenvolvimento, em 1977, do Programa Nacional de Prevenção de Acidentes de Trabalho e em 1978, as primeiras normas regulamentadoras por meio da portaria nº 3.214, incluindo a NR-10 (BARROS; NASCIMENTO, 2024).

Conforme Moreira (2013), durante a década de 1990, frente as privatizações nos setores elétricos e correlatos, houve uma precarização da segurança e saúde ocupacionais, resultando em um intenso aumento no índice de acidentes de trabalho. Além disso, a terceirização de serviços baseados apenas na redução de custo também foi um fator agravante e motivacional para que, a partir da década seguinte, a NR-10 passasse por reformulações.

Desta forma, a partir de 2004, as reformas nas NRs foram essenciais para prevenir e mitigar os riscos de acidentes (BARROS; NASCIMENTO, 2024). Posteriormente, em dezembro do mesmo ano, tal norma regulamentadora foi reformulada pela portaria nº 598 onde foi intitulada como Norma Regulamentadora nº 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade (RODRIGUES; SIMÕES; MOREIRA, 2024).

4.3. CONTEXTO HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DAS NORMAS REGULAMENTADORAS SOBRE ATMOSFERAS EXPLOSIVAS NO BRASIL E NO MUNDO

Em se tratando de atmosferas explosivas, a evolução das normas também levou tempo. Conforme Andris *et al.* (2024), a discussão e conceitualização de locais e atmosferas perigosas, tanto em termos de explosões quanto de incêndio, teve início durante a segunda revolução industrial. Isso devido ao fato de que no final do século XIX, houve uma crescente no uso de substâncias inflamáveis nos processos industriais, devido a descoberta de novas fontes de energia provenientes do desenvolvimento das indústrias elétricas, químicas e automobilísticas.

Frente ao exposto, em 1901, foi fundado o primeiro órgão nacional de normalização do mundo, em Londres, denominado *Engineering Standards Committee* - Comitê de Normas de Engenharia (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2025). Em 1918, esta organização passou a ser denominada *British Engineering Standards Association* (em português - Associação Britânica de Normas de Engenharia) e em 1929, recebeu a Carta Real, tornando-se *British Standards Institution* (BSI ou Instituição Britânica de Normas) (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2025; ANDRIS *et al.*, 2024).

Conforme mencionado por Oliveira (2024), ao longo dos anos, diversos padrões e normas técnicas foram desenvolvidas, sendo destaque as desenvolvidas

pelos grandes padrões internacionais como a IEC (*International Electrotechnical Commission* – Comissão Eletrotécnica Internacional).

A IEC, foi fundada em 1906 em Londres, com o objetivo de desenvolver e publicar normas internacionais para todas as tecnologias elétricas, eletrônicas e relacionadas. Ela reúne mais de 170 países membros e administra quatro sistemas de avaliação de conformidade, dentre eles o esquema IEC para certificação de normas para equipamentos destinados a atmosferas potencialmente explosivas (IECEx). Além da comissão eletrotécnica Internacional (IEC), também há a ISO (*International Organization for Standardization* – Organização Internacional para Normalização), fundada em 1947, em Genebra com o objetivo de desenvolver e publicar normas para todos os campos técnicos e não técnicos, exceto engenharia elétrica e eletrônica (ANDRIS *et al.*, 2024; ISO, 2025).

Ainda em concordância com o que foi estudado por ANDRIS *et al.* (2024), em nível internacional, as normas na temática do presente trabalho são gerenciadas pelo Comitê Técnico TC31 – Equipamentos para atmosferas explosivas, e pelos Subcomitês técnicos SC 31G – Aparelhagem intrinsecamente segura, SC31J - Classificação de áreas perigosas e requisitos de instalação e SC 31M – Equipamentos não elétricos e sistemas de proteção para atmosferas explosivas. Além disso, para facilitar o comércio internacional dos equipamentos destinados a atmosferas explosivas, uma unificação global das normas foi necessária.

No contexto brasileiro, as normas relacionadas a equipamentos e instalações em atmosferas explosivas, vêm sendo publicadas desde o final dos anos 1960. O órgão brasileiro responsável pela normalização técnica é a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), que publicou em 1968 o projeto de norma experimental P-EB-239 - Equipamentos com invólucros à prova de explosão e em 1969 o P NB-158 – Instalações Elétricas em Ambientes com Líquidos, Gases ou Vapores inflamáveis (CARDOSO *et al.*, 2025).

Em 1995, a ABNT publicou com base na IEC 79-14:1984, a Norma Brasileira NBR 5418 que tratava de instalações elétricas em atmosferas explosivas. Logo, a partir dos anos 2000, essa e outras normas foram revogadas, complementadas ou atualizadas por normas da série NBR IEC 60079, com o padrão IEC sendo adotado como referência nacional (OLIVEIRA, 2024).

Com a formalização da NR 10, parte das normas técnicas brasileiras relacionadas à eletricidade se tornaram obrigatórias para garantir a segurança daqueles que

trabalham com instalações e serviços com eletricidade. Recentemente, em 2021, a ABNT atingiu a marca de 100 normas técnicas brasileiras adotadas, publicadas ou revisadas sobre atmosferas explosivas. Estas normas, principalmente as séries ABNT NBR IEC 60079 e ABNT NBR ISO 80079, são semelhantes às normas internacionais correspondentes e, assim como mencionado anteriormente, vêm sendo atualizadas ou elaboradas desde 2005 pelas seis Comissões de Estudo que compõe o Subcomitê SCB 003.031 (Atmosferas explosivas) da ABNT/CB/003 (Eletricidade) (CARDOSO *et al.*, 2025; OLIVEIRA, 2024).

4.3.1. Principais normas regulamentadoras de atmosferas explosivas no brasil

Com base no Guia Abendi: Atmosferas Explosivas, desenvolvido por Cardoso *et al.* (2025), as principais normas técnicas brasileiras adotadas sobre atmosferas explosivas, que estão, de alguma forma, relacionadas ao presente estudo, elaboradas pelas referidas comissões de estudo do subcomitê da Sociedade Criacionista Brasileira (SCB) 003:031 da ABNT/CB/003 e publicadas pela ABNT, seguem na tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Principais normas técnicas sobre atmosferas explosivas

(continua)

Norma	Tema abordado
ABNT NBR IEC 60079-0	Equipamentos – Requisitos Gerais
ABNT NBR IEC 60079-1	Tipo de proteção por invólucros à prova de explosão – Ex “d”
ABNT NBR IEC 60079-2	Tipo de proteção por invólucros pressurizados – Ex “p”
ABNT NBR IEC 60079-5	Tipo de proteção por imersão em areia – Ex “q”
ABNT NBR IEC 60079-6	Tipo de proteção por imersão em líquido – Ex “o”
ABNT NBR IEC 60079-7	Tipo de proteção por segurança aumentada – Ex “e”
ABNT NBR IEC 60079-10-2	Requisitos para a classificação de áreas contendo poeiras combustíveis

Fonte: Adaptado de Carvalho *et al.*, 2025

Tabela 1 – Principais normas técnicas sobre atmosferas explosivas

(continuação)

Norma	Tema abordado
ABNT NBR IEC 60079-11	Tipo de proteção por segurança intrínseca – Ex “i” e Fieldbus Intrinsecamente seguro - FISCO
ABNT NBR IEC 60079-13	Proteção de equipamentos por ambientes pressurizados Ex “p” e por ambientes artificialmente ventilados Ex “v”
ABNT NBR IEC 60079-14	Requisitos de proteção, seleção de equipamentos, montagem e inspeção inicial de instalações “Ex”
ABNT NBR IEC 60079-15	Tipo de proteção por equipamentos não centelhantes – Ex “n”
ABNT NBR IEC 60079-16	Ventilação artificial para proteção de casa de analisadores
ABNT NBR IEC 60079-17	Requisitos de inspeção e manutenção de instalações “Ex”
ABNT NBR IEC 60079-18	Tipo de proteção por encapsulamento em resina – Ex “m”
ABNT NBR IEC 60079-19	Requisitos de reparo, revisão e recuperação de equipamentos “Ex”
ABNT NBR ISO/IEC 80079-20-2	Características dos materiais – Métodos de ensaios de poeiras combustíveis
ABNT NBR IEC 60079-25	Requisitos para sistemas intrinsecamente seguros
ABNT NBR IEC 60079-26	Equipamento com elementos de separação ou níveis de proteção combinados
ABNT NBR IEC 60079-30-1	Traceamento elétrico resistivo “Ex” – Traceamento elétrico resistivo – Requisitos gerais e de ensaios
ABNT NBR IEC 60079-30-2	Traceamento elétrico resistivo “Ex” – Traceamento elétrico resistivo – Procedimento para aplicação em projeto, instalação e manutenção

Fonte: Adaptado de Carvalho *et al.*, 2025

Tabela 1 – Principais normas técnicas sobre atmosferas explosivas

(continuação)

Norma	Tema abordado
ABNT NBR IEC 60079-31	Proteção de equipamentos contra ignição de poeira combustível por invólucros – Ex “t”
ABNT NBR IEC 60079-32-1	Riscos eletrostáticos – Orientações
ABNT NBR IEC 60079-32-2	Riscos eletrostáticos – Ensaio
ABNT NBR IEC 60079-33	Tipo de proteção especial Ex “s”
ABNT NBR ISO/IEC 80079-34	Requisitos de aplicação de sistemas da qualidade para a fabricação de equipamentos elétricos ou mecânicos “Ex”
ABNT NBR ISO 80079-36	Atmosferas explosivas – Parte 36: Equipamentos não elétricos para utilização em atmosferas explosivas – Métodos e requisitos básicos (Ex “h”)
ABNT NBR ISO 80079-37	Equipamentos não elétricos para utilização em atmosferas explosivas – Tipos de proteção não elétricos: segurança construtiva “c”, controle de fonte de ignição “b” e imersão em líquido “k”
ABNT IEC TS 60079-39	Sistemas intrinsecamente seguros com limitações de duração de centelha eletronicamente controlada: “Power i”
ABNT IEC TS 60079-42	Dispositivos elétricos de segurança para o controle de fontes potenciais de ignição de equipamentos “Ex”
ABNT IEC TS 60079-43	Equipamentos em condições adversas de serviço
ABNT IEC TS 60079-44	Competências pessoais “Ex”
ABNT NBR IEC 60079-45	Sistemas elétricos de ignição para motores de combustão interna
ABNT IEC TS 60079-46	Avaliação de montagem de “Skids” de equipamentos “Ex”

Fonte: Adaptado de Carvalho *et al.*, 2025

Tabela 1 – Principais normas técnicas sobre atmosferas explosivas

Norma	Tema abordado
ABNT IEC TS 60079-47	Proteção de equipamentos pelo conceito de Ethernet em 2 fios intrinsecamente segura (2 WISE – <i>2-Wire Intrinsically Safe Ethernet concept</i>)
ABNT IEC TS 60079-48	Equipamento eletrônico portátil ou pessoal – Orientações para utilização de equipamento sem certificação em área classificada
ABNT NBR ISO/IEC 80079-49	Corta-chamas – Requisitos de desempenho, métodos de ensaios e limitações de utilização
ABNT NBR ISO/IEC 80079-50	Dispositivos de alívio de explosão

Fonte: Adaptado de Carvalho *et al.*, 2025

Frente ao que foi discutido, com o intuito de compreender melhor como ocorrem as explosões provenientes de atmosferas explosivas de poeira, inicialmente torna-se útil compreender os mecanismos responsáveis pelas explosões convencionais, ou seja, aquelas explosões não necessariamente relacionadas a poeiras combustíveis.

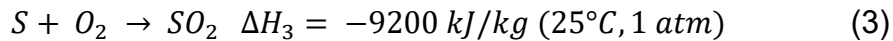
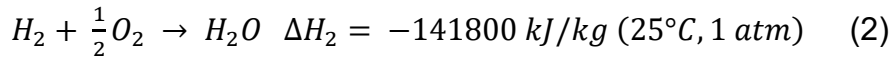
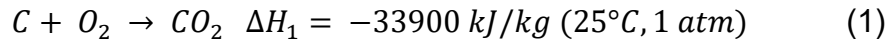
4.4. ASPECTOS FÍSICO-QUÍMICOS DE EXPLOSÕES CONVENCIONAIS

Inicialmente, de modo a compreender o mecanismo por trás das explosões, torna-se necessário compreender as condições inerentes, ou não, do processo industrial, que favorecem a ocorrência de tais eventos.

Frente ao pressuposto, de modo geral, fogo é definido como uma reação química exotérmica, denominada combustão, onde há liberação de energia na forma de calor e luz, como resultado da combinação entre um combustível, um comburente e uma fonte de ignição. Este processo ocorre de forma rápida, e em sua forma ideal, todo carbono consumido é transformado em dióxido de carbono (CO_2), todo hidrogênio em água (H_2O), e todo o enxofre em dióxido de enxofre (SO_2) (PIMENTA, 2024; BELTRAMI, STUMM, 2012; CARVALHO JÚNIOR; MCQUAY, 2007).

No entanto, as reações descritas abaixo, são simplificações de processos de oxidação e decomposição mais complexos quando abordados em condições reais.

Segundo Pimenta (2024), as reações 1, 2 e 3, apenas seriam possíveis em condições ideais onde haveria oxigênio suficiente para reagir completamente com as moléculas do combustível:



Em condições reais, a combustão ocorre de forma incompleta devido a presença de substâncias combustíveis junto aos produtos, como o carbono presente nas cinzas, escórias e/ ou fuligem além de gases combustíveis como o hidrogênio, ou fatores como mistura inadequada ou rápida taxa de reação (PIMENTA, 2024).

Após o início do fogo, para que a combustão continue acontecendo, ou seja, para dar continuidade às reações químicas, é necessário que as ligações entre as moléculas dos reagentes sejam rompidas de modo que seus átomos e elétrons se reorganizem formando os produtos citados anteriormente, em maiores ou menores proporções (PIMENTA, 2024).

À medida que o material combustível é oxidado/consumido, a liberação de energia aumenta e as moléculas que estavam, até então, preservadas entram, sucessivamente, em combustão, ocasionando uma reação em cadeia e conseqüentemente uma explosão. Ainda durante as sucessivas transformações, há a formação de mais gases ou vapores dos combustíveis contribuindo para o desenvolvimento da reação em cadeia, tornando a mistura mais inflamável (BRENTANO, 2005, *apud* BELTRAMI; STUMM, 2012).

4.4.1. Triângulo do fogo e suas características

Desta forma, combinando simultaneamente os três pilares mencionados: combustível, comburente e fonte de ignição, há a formação do triângulo do fogo, conforme ilustrado na Ilustração 1.

Ilustração 1 – Representação ilustrativa do triângulo do fogo



Fonte: Desenvolvida pelos autores com auxílio de inteligência artificial - Chat GPT (2025).

4.4.1.1. Combustíveis

Segundo Carvalho Júnior e McQuay (2007), combustíveis são todos aqueles materiais que quando em contato com um comburente, ou oxidante, reagem de forma exotérmica, ou seja, é adequado dizer que são todos aqueles materiais suscetíveis à queima. Compostos que contenham carbono e hidrogênio são considerados bons combustíveis, mesmo que acompanhados de outros elementos como enxofre, nitrogênio, oxigênio e metais como sódio, por exemplo. Além disso, ele pode conter uma porção incombustível, normalmente composta de umidade e cinzas, não fornecendo calor durante a combustão.

Ainda segundo os referidos autores, uma substância é considerada um bom combustível quando ela existe em grande quantidade, possui baixo custo e pode ser aplicada no processo industrial considerado.

Os combustíveis podem ser sólidos, líquidos ou gasosos:

- a) Combustíveis sólidos: possuem em sua maioria, um mecanismo sequencial para sua ignição. Neste caso, para que entre em combustão necessitam que uma fonte de calor provoque a liberação de vapores combustíveis que, quando em contato com oxigênio do ar, gerem uma mistura inflamável;
- b) Combustíveis líquidos: formam uma mistura inflamável, possibilitando a combustão por meio de sua vaporização na presença de uma fonte de calor, quando misturados com o oxigênio do ar;

- c) Combustíveis gasosos: ao serem misturados com o oxigênio do ar, são ditos inflamáveis apenas dentro de uma faixa ideal de concentração.

Em suma, os dois primeiros tipos de combustível entram em combustão apenas após serem aquecidos e liberarem gases/ vapores que se combinam com o comburente formando misturas inflamáveis (BRENTANO, 2005, *apud* BELTRAMI; STUMM, 2012).

4.4.1.2. Comburentes ou Oxidantes

Assim como visto anteriormente, o comburente, também denominado oxidante por alguns autores, é o elemento que ativa o fogo e conserva a combustão. Trata-se de um agente químico que quando combinado com um combustível formam uma mistura inflamável (BELTRAMI; STUMM, 2012).

O comburente mais conhecido e utilizado é o ar atmosférico, composto por aproximadamente 78,08% de nitrogênio, 20,95% de oxigênio, 0,93% de argônio, 0,03% de dióxido de carbono e 0,015 de outros gases como neônio, hélio, metano, dentre outros. Porém, a título de simplificação, durante os cálculos envolvendo balanços entre reagentes e produtos, é adequado considerar que o ar contém, aproximadamente, 21% do volume de oxigênio e 79% de nitrogênio. (PERRY; CHILTON, 1973 *apud* CARVALHO JÚNIOR; MCQUAY, 2007).

4.4.1.3. Fonte de ignição

Para fechar o triângulo do fogo, há a fonte de ignição, caracterizada por ser uma fonte de calor que dá início à reação química entre os dois outros pilares mencionados anteriormente, combustível e comburente. São exemplos: atrito, faíscas elétricas, superaquecimento de equipamentos elétricos, chama, dentre outros (BRENTANO, 2005, *apud* BELTRAMI; STUMM, 2012).

Existem diferentes fontes de ignição potenciais e muitas dessas fontes podem ser controladas ou minimizadas através do layout da planta, gerenciamento e controle de riscos. Os próprios equipamentos e instrumentos industriais são potenciais fontes de ignição como bombas, válvulas, lâmpadas, dentre outros. Desta forma, é importante que estes sejam certificados e sigam as especificações adequadas às

diferentes zonas e áreas classificadas, conforme mencionado no tópico “Equipamentos” (FORTUNA, 2018).

Complementar ao tópico de fonte de ignição é importante ressaltar as definições de ponto de fulgor, ponto de combustão e temperatura de autoignição como seguem abaixo.

4.4.2. Ponto de fulgor

Segundo Nichetti (2010), o ponto de fulgor pode ser definido como a menor temperatura necessária para que o combustível comece a gerar vapores ou gases inflamáveis. Porém, a quantidade de gases/ vapores produzidos pela temperatura do ponto de fulgor não é suficiente para manter a combustão.

4.4.3. Ponto de combustão

O ponto de combustão é caracterizado como a mínima temperatura necessária para que um combustível libere gases/ vapores inflamáveis, que misturados ao oxigênio do ar e aquecidos por uma fonte externa de calor, entram em ignição. Porém, diferente do ponto de fulgor, quando a fonte de calor é removida, a quantidade de gases produzidos é capaz de autoalimentar a combustão, que continua, mesmo sem o fornecimento externo de energia (PIMENTA, 2024; BELTRAMI; STUMM, 2012).

4.4.4. Temperatura de autoignição

Temperatura de autoignição, ou de ignição espontânea é a temperatura em que os gases liberados pelo combustível, quando em contato com o comburente, são suficientes para que o processo de combustão seja autossuficiente e se mantenha sem a interferência de qualquer fonte de calor externa (SANTOS, 2020). Para combustíveis gasosos, estando dentro de sua faixa de inflamabilidade, é nesta temperatura que ocorre a combustão sem qualquer fonte de ignição externa (PIMENTA, 2024).

4.4.5. Hexágono da explosão

Além das condições iniciais mencionadas de início do fogo, em se tratando de atmosferas explosivas formadas por pós/ poeiras combustíveis, torna-se necessário adicionar outros três elementos essenciais, que são dispersão das partículas de poeira, concentração da mistura e o confinamento. A junção destas seis condições, formam o hexágono da explosão, ilustrado na Ilustração 2 (CARVALHO FILHO, 2023).

Ilustração 2 - Representação ilustrativa do Hexágono da Explosão



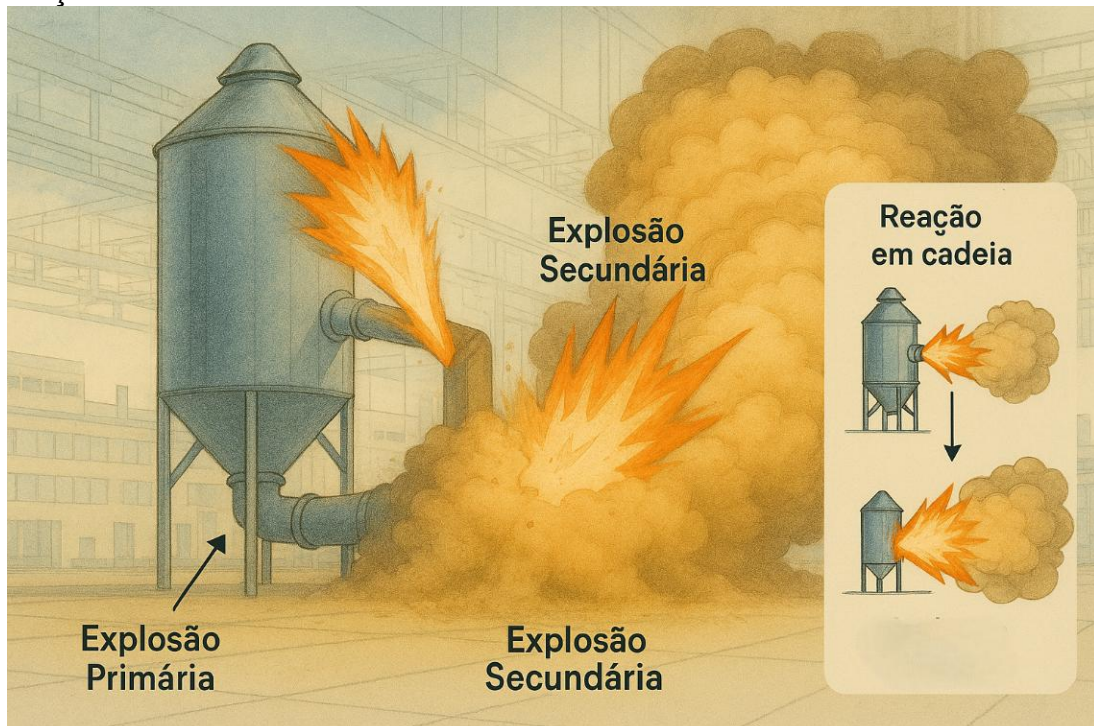
Fonte: Desenvolvida pelos autores com auxílio de inteligência artificial - Chat GPT (2025).

Estes três pilares adicionais são cruciais para a ocorrência ou não da explosão. Com base em Eckhoff e Li, 2021 *apud* Carvalho Filho, 2023, existem dois momentos específicos que caracterizam a explosão de poeira. No primeiro, todas as partículas combustíveis em suspensão são utilizadas causando uma onda de choque que suspende grande parte da poeira. Na sequência há uma deflagração ainda maior em decorrência do aumento da concentração de partículas em dispersão. Com base nestes conceitos, torna-se necessário verificar e compreender quais as características intrínsecas das explosões envolvendo poeiras combustíveis.

4.5. MECANISMO POR TRÁS DAS EXPLOSÕES DE PÓS/POEIRAS COMBUSTÍVEIS

Para as explosões com poeiras, foco do presente trabalho, normalmente, o princípio de explosão ocorre em ambientes confinados, como silos, tubos ou demais regiões enclausuradas do processo. Após a primeira onda de choque, as paredes do equipamento podem ser rompidas, possibilitando que as chamas e a poeira em suspensão sejam expelidas para as demais regiões. Após a perturbação inicial, ocorre a explosão secundária, com escala maior que a anterior devido à mistura do pó em suspensão, combustível, com o ar, comburente. Estas explosões quando em larga escala resultam nas reações em cadeia, conforme diagrama ilustrativo representado na Ilustração 3 (FORTUNA, 2018).

Ilustração 3 – Representação das explosões primárias, secundárias e reações em cadeia



Fonte: Desenvolvida pelos autores com auxílio de inteligência artificial – Copilot (2025).

Assim como demonstrado na ilustração 3 acima, para Eckhoff (2005) e Eckhoff e Li (2021), as explosões são divididas em primária e secundária e sua intensidade depende de fatores como natureza da poeira combustível, grau de dispersão, geometria do ambiente e energia de ignição.

4.5.1. Explosão primária

De modo a ocorrer a explosão de poeira, partindo de uma camada ou depósito de poeira, o mesmo deve ser exposto a um processo no qual haja formação de nuvem de poeira, ou seja, para que a explosão ocorra é necessário que o pó disperso/ em suspensão no ar. Tal nuvem pode ser formada em decorrência do processamento em equipamentos como silos, moinhos, filtros, ciclones, secadores, dutos, dentre outros (ECKHOFF, 2005; LIBERMAN *et al.*, 2017).

Durante a explosão inicial, uma onda de choque que se propaga pelo interior do equipamento podendo romper painéis, tampas e paredes é formada. Esta onda, além de ser capaz de destruir os equipamentos, também é responsável por expelir partículas incandescentes e gases quentes para o ambiente, corroborando para a formação de possíveis explosões subsequentes, uma vez que pode inflamar camadas de poeira depositadas (ECKHOFF, 2005; ECKHOFF; LI, 2021; BUSCHART, 1999).

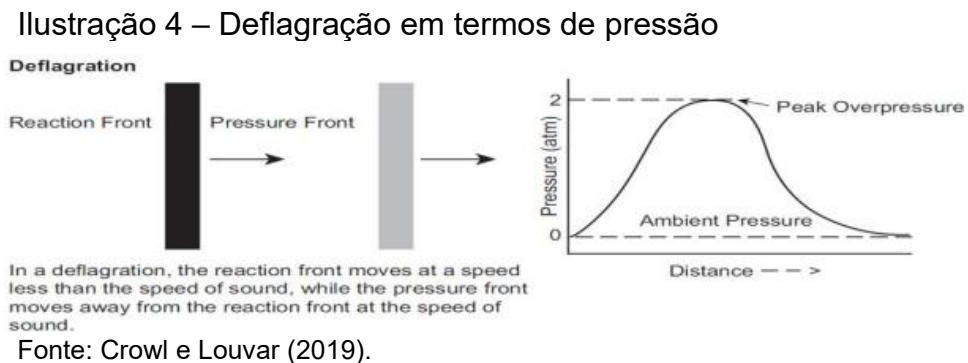
4.5.2. Explosão secundária

Ainda com base em Eckhoff (2005) e Eckhoff e Li (2021), na explosão secundária a intensidade da explosão é maior do que na fase inicial. Nesta etapa, o deslocamento de ar e a onda de choque/pressão dispersam a camada de poeira depositada formando nuvens de poeira. Quando estas partículas são atingidas pela chama, ou por gases quentes, ocorre uma nova ignição mais intensa e extensa que a inicial. Este processo de ressuspensão e ignição sucessiva amplia o volume da mistura inflamável e multiplica o número de frentes de chama ativas.

Segundo Crowl e Louvar (2019), para estimar o potencial destrutivo de uma explosão, é necessário compreender a magnitude da sobrepressão, a qual depende da energia liberada, grau de confinamento e da distância do ponto de ignição. Desta forma, quando uma explosão ocorre, uma onda de sobrepressão é propagada a partir da fonte de ignição. No momento inicial, ocorre a ignição e após um breve intervalo, a onda de choque atinge o pico de sobrepressão máxima. Posteriormente, a pressão retorna ao valor atmosférico, podendo cair abaixo dela, retornando à origem da explosão. Desta forma, outros conceitos importantes de serem conhecidos no estudo de atmosferas explosivas de poeira são os de detonação e deflagração.

4.5.3. Deflagração

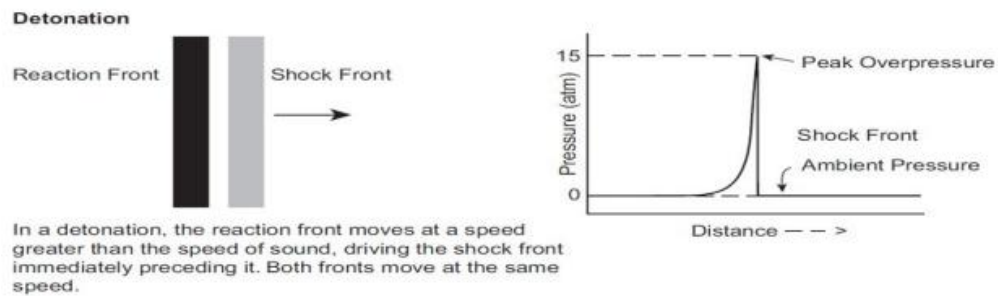
Ainda conforme Crowl e Louvar (2019), na deflagração, a frente de chama avança a velocidades inferiores à do som (aprox. 344 m/s a 20°C) e a propagação ocorre por transferência de calor e difusão molecular entre as zonas reagidas e não reagidas culminando num aumento substancial de pressão e temperatura em espaços confinados, conforme pode ser observado na ilustração 4. As frentes de pressão são amplas e menos abruptas, durando alguns milissegundos, com picos variando de 6 a 10 vezes a pressão inicial, dependendo da reatividade do material.



4.5.4. Detonação

Já a detonação é a forma extrema da combustão, que se propaga com velocidades iguais ou inferiores à do som. Neste cenário, a reação impulsionada pela onda de choque supersônica, comprime a poeira não reagida à frente da chama, elevando sua temperatura acima do ponto de autoignição. Essa rápida compressão corrobora em uma mudança abrupta de pressão, geralmente superior a 10 atmosferas com duração inferior a 1 milissegundo. Esta detonação é acompanhada de uma frente de choque intensa e curta capaz de causar destruições mecânicas imediatas. Tal mecanismo está de acordo com o que foi demonstrado na ilustração 5.

Ilustração 5 – Detonação em termos de pressão



Fonte: Crowl e Louvar (2019).

Compreendido os mecanismos das explosões de poeiras, revisar-se-á a bibliografia acerca das características das poeiras combustíveis bem como outros fatores sustentam as explosões de poeira.

4.6. CARACTERÍSTICAS DOS PÓS/ POEIRAS COMBUSTÍVEIS QUE CORROBORAM PARA EXPLOSÃO

Assim como mencionado anteriormente, uma explosão de pó depende das 6 condições abordadas dentro do hexágono da explosão. Porém, diferente dos casos envolvendo combustíveis líquidos ou gasosos, há evidências de que, alguns materiais sólidos, precisam vaporizar para que ocorra a explosão, ou seja, a produção de calor deve ser suficiente para vaporizar a superfície da partícula como parte da explosão (CROSS; FARRER, 1982).

Além disso, segundo Cross e Farrer (1982), as partículas de poeira também devem estar próximas o suficiente para que o calor de uma possa iniciar a reação em outra, porém suficientemente distantes para permitir que o oxigênio flua livremente. Juntamente à proximidade das partículas, outros fatores são essenciais para uma possível ocorrência de explosão como as características da partícula do material combustível, e condições do ambiente em que estão como: umidade, concentração, disponibilidade de oxigênio, potência das fontes de ignição, dentre outros (COSTELLA; PILZ; BET, 2016).

4.6.1. Dimensão da partícula

Sabe-se que há uma forte relação entre a rápida ignição e o tamanho da superfície da partícula. O diâmetro geométrico médio da partícula, é utilizado para

determinar o tamanho dos grânulos de um material moído (ROSA, 2024). Esse cálculo pode ser calculado por diferentes métodos, os quais não serão aprofundados no presente trabalho.

Porém, algumas destas partículas possuem tamanho nominal igual ou inferior a 500 μm , sendo que para testes de explosividade são consideradas amostras com dimensão inferior a 63 μm . Proporção que, apesar de ser considerada conservadora, abrange os possíveis acúmulos de pós em filtros, por exemplo (ABNT *apud* ROSA, 2024).

Frente ao pressuposto, quanto mais finamente dividida a partícula estiver, ou seja, quanto menor for sua dimensão mais fácil sofrer ignição e maior a magnitude da explosão, uma vez que a superfície exposta é maior por unidade de peso da matéria (superfície específica) (ECKHOFF, LI, 2021; COSTELLA; PILZ; BET, 2016; CROSS; FARRER, 1982).

A magnitude da explosão aumenta pois, conforme Moraes (2019), o tamanho da partícula está diretamente relacionado a velocidade de aumento da pressão, devido à sua baixa densidade. O autor menciona que ensaios laboratoriais demonstram que para partículas maiores, as velocidades de aumento de pressão obtidas são menores e maior a dificuldade de ignição, quando comparadas às partículas menores na mesma quantidade, em peso, provenientes de um mesmo material. As influências do tamanho da partícula na magnitude da explosão serão mais bem discutidas no tópico “Índice de gravidade de explosão”.

No entanto, Cross e Farrer (1982), alegam que pós cujo tamanho esteja acima do limite explosivo podem queimar se forem inflamados por uma fonte de alta energia e, portanto, agir como uma fonte de ignição para as partículas finamente dividida, presentes em outras partes da planta.

4.6.2. Teor de umidade

A umidade contida nas partículas de pó influencia na quantidade de calor absorvido para a vaporização da água contida nelas, tornando necessário o aumento da temperatura de ignição (ABNT *apud* ROSA, 2024).

A título de exemplificação, Moraes (2019) menciona que a temperatura de ignição de uma nuvem de poeira, originada do amido de milho, por exemplo, pode aumentar até 50°C, variando com a umidade presente. Desta forma, nas unidades de

beneficiamento e armazenamento, há um controle rigoroso da umidade, onde o grão passa por uma etapa de secagem antes do armazenamento final. Mesmo assim, quando a umidade dos grãos está acima de 20%, pode-se dar início à decomposição, responsável pela emissão de gases inflamáveis como metanol, propanol e butanol, por exemplo.

4.6.3. Energia mínima de ignição

Com base em Siwek e Cesana (1995), a energia mínima de ignição (EMI) de uma substância combustível, pode ser definida como a menor quantidade de energia fornecida, seja por um capacitor, fagulha, chama ou outra fonte de calor, que sob condições normais de temperatura e pressão é suficiente para inflamar a mistura poeira-ar e propagar a combustão (ABNT *apud* ROSA, 2024).

Os pós combustíveis, em sua maioria, apresentam uma ampla faixa de sensibilidade à ignição, necessitando de uma fonte de ignição muito energética (WEIDMÜLLER, 2011). Conforme experimentos conduzidos por Lin *et al.* (2020), a energia mínima de ignição é observada entre o menor valor de energia em que ocorre a ignição e a energia em que nenhuma ignição é observada.

4.6.3.1. Temperatura mínima de ignição de nuvens de poeira

De acordo com Cross e Farrer (1982) e Rosa (2024), a temperatura mínima de ignição (TMI) de uma nuvem de poeira diz respeito a menor temperatura na qual uma nuvem de partículas suspensas no ar se inflama espontaneamente, sem a necessidade de uma faísca, chama, arco elétrico ou qualquer outra fonte de ignição externa, bastando apenas o contato com uma superfície aquecida acima deste valor.

Ainda conforme Rosa (2024), esta característica é utilizada para determinar a temperatura máxima permitida para as superfícies dos equipamentos elétricos e mecânicos instalados em áreas classificadas, de modo a evitar que o aquecimento dos componentes seja capaz de iniciar a combustão da nuvem. No entanto, Buschart (1999) complementa que, no geral, a temperatura de ignição das nuvens de poeira é bem maior do que do que as temperaturas de operação típicas dos equipamentos industriais, embora tal fato não elimine o risco de ignição quando há o cúmulo de poeira em superfícies superaquecidas.

Conforme ABNT NBR IEC 60079-14 *apud* Cardoso *et al.* (2025), a temperatura de equipamentos “Ex” para poeiras combustíveis deve ser 2/3 TMI nuvem. Os tipos e possíveis fontes de ignição são abordados no tópico “Fontes de ignição e métodos de prevenção”.

4.6.3.2. Temperatura mínima de ignição de camada de poeira

A temperatura mínima de ignição da camada de poeira pode ser definida como a menor temperatura em que a camada de poeira combustível, com espessura determinada, entre em ignição através do contato com uma superfície aquecida acima desse valor limite, ou seja, sem a presença de uma fonte externa (ROSA, 2024).

De acordo com Cardoso *et al.* (2025), conforme descrito pela ABNT NBR ISO/IEC 80079-20-2, o ensaio para determinação desta TMI é realizado utilizando uma placa aquecida sobre a qual é depositada uma camada de poeira contida em um anel metálico. O valor obtido corresponde a menor temperatura de ignição visível da amostra. Além disso, conforme estabelecido pela norma complementar ABNT NBR IEC 60079-14, a temperatura máxima da superfície dos equipamentos “Ex” deve ser, no mínimo, 75 K inferior à TMI de camada de poeira.

Estudos clássicos como os descritos por Cross e Farrer (1982), demonstram que a ignição de uma camada de poeira depende de variáveis como espessura, condutividade térmica, fluxo de ar e tempo de exposição ao calor. Sendo que quanto maior o acúmulo de poeira sobre uma superfície aquecida, menor tende a ser a temperatura de ignição. Os autores observaram, em estudos muito semelhantes que a temperatura mínima de ignição de uma camada de serragem, diminuiu de 310 °C para 120 °C quando a espessura aumentou de 1,2 cm para 18 cm, evidenciando que o efeito isolante térmico da poeira acumulada retém o calor, facilitando a autoignição (CROSS; FARRER, 1982).

Além disso, Buschart (1999), também relata que a exposição prolongada da camada a elevadas temperaturas, normalmente, reduz a temperatura mínima de ignição. Ele observou este comportamento quando uma camada de amido de milho apresentou uma redução de TMI de 500 °C por 3 horas para 150 °C quando exposto por 70 horas.

Fatores como a ventilação de ar, podem aumentar a TMI ao favorecer o resfriamento da camada de poeira, quanto diminuí-la, considerando que o oxigênio

adicional poderia acelerar as reações de oxidação do material (CROSS; FARRER, 1982).

4.6.4. Concentração mínima de explosividade e limites de explosão para poeiras

Para que a explosão ocorra e consiga se propagar, a nuvem de poeira deve exceder uma concentração mínima, uma vez que, assim como mencionado anteriormente, as partículas devem estar próximas o suficiente uma das outras para exercer uma influência umas nas outras. (CROSS; FARRER, 1982).

Conforme Morais (2019), as poeiras seguem o mesmo princípio dos gases no que diz respeito a concentração. Portanto são definidos os limites inferior (LIE) e superior de explosividade (LSE). Tais limites são definidos como a concentração mínima de poeira necessária para a propagação sustentada da chama (aprox. 20 a 60 g/m^3) e a concentração acima da qual a propagação da chama não ocorre (aprox. 2 a 60 kg/m^3), respectivamente (MITTAL, 1997; ABNT *apud* ROSA, 2024). Além disso, o LIE varia de acordo com a composição e o tamanho das partículas (BUSCHART, 1999).

Mittal (1997) menciona que a ocorrência da explosão requer que a concentração de poeira esteja dentro dos limites especificados. Se for muito baixa, o calor gerado não será suficiente para propagar a reação entre as partículas. Em contrapartida, quando a concentração é muito alta, o efeito de resfriamento das partículas também impedirá a propagação da explosão.

No último cenário mencionado, apesar de a explosão não acontecer devido a insuficiência de espaço entre as partículas, um incêndio pode ser iniciado. Portanto, deve-se ter atenção com a forma de extinção do mesmo, pois em caso de formação de nuvem de poeira, o incêndio poderá evoluir para uma explosão (MORAIS, 2019).

A título de exemplificação Costella, Pilz e Bet (2016), realizou um estudo de caso, em uma unidade de armazenamento de grãos como milho, soja e trigo. Neste estudo, ele observou que em locais mais arejados e cuja descarga de material ocorria de forma lenta, as concentrações de poeira deram abaixo da faixa de explosividade, sendo indicado o treinamento dos colaboradores e limpeza regular. Já em locais confinados como o túnel subterrâneo, as concentrações deram entre 21,43 e 41,25 g/m^3 , estando dentro da faixa de concentração mínima de explosividade. Contudo, para os casos em que havia a presença de faíscas e manutenções com solda, como

o redler de transporte, os autores obtiveram concentrações dentro da faixa de explosividade (98,76 e 113,39 g/m^3), acendendo um alerta para medidas de controle como instalação de janelas de alívio para descarga de pressão, motores à prova de explosão, dentre outros.

4.7. ÍNDICE DE GRAVIDADE DA EXPLOSÃO

Durante o estudo das atmosferas explosivas, em um cenário industrial, por exemplo, deve-se considerar o valor da taxa de deflagração (K_{ST}). Este parâmetro representa a magnitude da explosão de poeira, em outras palavras, seria a taxa máxima de aumento de pressão, também influenciada pelo tamanho da partícula, durante uma explosão em um recipiente padrão (FORTUNA, 2018).

Desta forma, os resultados da ignição de uma poeira são caracterizados pela forma do pulso de pressão gerado quando a poeira é inflamada dentro de um recipiente teste. Esta pressão é registrada em função do tempo e são registradas a pressão máxima e a taxa máxima de aumento da pressão.

Quando se amplia os testes para a escala industrial, a pressão máxima define a resistência necessária para suportar a pressão, enquanto a taxa máxima de aumento de pressão determina a velocidade com a qual os sistemas de alívio ou proteção devem agir.

Wolfgang Bartknecht conduziu, em 1981, na Suíça experimentos abrangentes que investigavam o tamanho do recipiente de teste sobre a pressão e a taxa de aumento da pressão. Neste contexto, ele constatou que uma lei cúbica se a taxa máxima de aumento de pressão medida em qualquer recipiente for multiplicada pela raiz cúbica do volume (CROSS; FARRER, 1982).

Portanto, a pressão de deflagração ($P_{m\acute{a}x}$), a máxima taxa de crescimento da pressão $[(\frac{dP}{dt})_{m\acute{a}x}]$ e o volume do vaso fechado, contribuem para o cálculo da taxa conforme arranjo observado na equação 4 abaixo:

$$K_{ST} = (\frac{dP}{dt})_{m\acute{a}x} * V^{1/3} \quad (4)$$

Tanto a taxa de deflagração máxima, cerca de 6 a 10 vezes maior que a pressão absoluta durante a ignição, quanto a máxima taxa de crescimento da pressão, são

obtidas mediante testes com variadas concentrações de pó combustível (NFPA 68 *apud* FORTUNA, 2018).

O valor do K_{ST} é utilizado para classificar os pós em grupos. Desta forma, com base nos valores obtidos mediante o referido cálculo, os pós são segmentados em diferentes classes de perigo, conforme tabela 2 abaixo:

Tabela 2 – Classe da poeira combustível de acordo com seu K_{ST}

Classe de explosão	K_{ST} ($bar * m/seg$)	Classificação da Poeira
St-0	0	Não Explosível
St-1	$0 < K_{ST} < 200$	Fraco a moderadamente explosível
St-2	$200 < K_{ST} < 300$	Fortemente explosível
St-3	> 300	Muito fortemente explosível

Fonte: Autores (2025) adaptado de NFPA *apud* Fortuna, 2018 e ABNT 2016 *apud* ROSA, 2024.

4.8. GRUPOS DE POEIRAS E RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A resistividade elétrica de um pó ou poeira é importante tanto eletrostaticamente quanto para efeitos de faíscas elétricas. Do ponto de vista eletrostático, quanto mais condutivo for o pó, menor é a probabilidade de ele armazenar carga e conseqüentemente, causar danos relacionados à eletricidade estática. No entanto, pós condutivos são mais perigosos e aumentam as chances de ocorrência de curtos-circuitos próximos aos equipamentos elétricos (CROSS; FARRER, 1982).

Com base no que foi mencionado, segundo ABNT NBR IEC 60079-10-2 *apud* Fortuna (2018), existem três grupos nos quais as substâncias inflamáveis são classificadas, sendo eles:

- a) Grupo I - minas suscetíveis à exalação de grisú (mineração subterrânea);
- b) Grupo II - gases combustíveis;
- c) Grupo III - poeiras combustíveis.

Segundo Rosa (2024), o terceiro grupo trata especificamente da utilização de equipamentos em locais com atmosferas explosivas envolvendo poeira exceto minas suscetíveis a grisú e é subdividida conforme pode ser observado na tabela 3 abaixo:

Tabela 3 – Grupos de poeiras combustíveis

Grupo	Tipo de material
IIIA	Fibras combustíveis
IIIB	Pós combustíveis não condutores de eletricidade
IIIC	Pós combustíveis condutores de eletricidade

Fonte: Autores adaptado de NFPA *apud* Fortuna, 2018.

O Grupo IIIA, é composto em sua maioria por fibras combustíveis, de granulometria maior que 500 μm , como cacau, leite, serragem, materiais plásticos, trigo, soja, dentre outros.

Já as poeiras combustíveis não condutoras de eletricidade, cuja resistividade elétrica é superior a $10^3 \Omega\cdot\text{m}$, estão inseridas no Grupo IIIB. São exemplos, pó de leite, poeira de carvão vegetal e mineral, maltodextrina, lactose, dentre outros.

E, para o Grupo IIIC, tem-se as poeiras combustíveis condutoras de eletricidade, as quais possuem resistividade menor que $10^3 \Omega\cdot\text{m}$, como é o caso das partículas metálicas. Estas, a depender da tensão presente no equipamento, podem causar curtos-circuitos. (ABNT *apud* ROSA, 2024; FORTUNA, 2018).

4.9. FONTES DE IGNIÇÃO E MÉTODOS DE PREVENÇÃO

Apesar de este tópico já ter sido previamente discutido no presente trabalho, Eckhoff e Li (2021) e Cross e Farrer (1982), especificam algumas das fontes “comuns” de ignição que podem ocasionar uma explosão de poeira. Complementar a isso, a extinção da ignição pode ser atingida eliminando ou limitando a capacidade de ignição (ANDRIS *et al.*, 2024).

4.9.1. Conglomerados incandescentes

São depósitos de poeira que podem desenvolver zonas internas de combustão lenta e quente. Em alguns casos, os materiais podem entrar em combustão espontânea devido atividade bioquímica como é o caso dos materiais vegetais, por exemplo. Se estas zonas entrarem em contato com nuvens de poeira combustível,

pode-se iniciar uma combustão. Desta forma, o acúmulo de poeira deve ser evitado, de modo a extinguir tal possibilidade de ignição (ECKHOFF; LI, 2021).

Cross e Farrer (1982), também escrevem sobre a ação de microrganismos corroborarem para aumentos significativos da temperatura, já que, apesar de maioria ser extinta em temperaturas superiores a 70°C, bem abaixo da temperatura de ignição, o calor produzido pode ser suficiente para iniciar reações químicas, exotérmicas, e evoluir para uma possível ignição.

4.9.2. Chamas livres

Algumas fontes mais óbvias como as chamas de um maçarico de solda e corte são suficientes para iniciar uma explosão (ECKHOFF; LI, 2021).

Para Cross e Farrer (1982), essas operações geram energia mais que suficientes para inflamar pós, seja em forma de nuvem ou camada. Os acidentes podem acontecer em forma de erro de procedimento, caso haja uma comunicação ineficiente e um equipamento em manutenção seja ligado ou devido à uma limpeza mal realizada, onde os pontos de manutenção podem resultar em poeira pegando fogo a certa distância do ponto de soldagem. Ainda segundo autores, apenas limpar a área não é suficiente, as camadas de poeira dentro dos equipamentos também ser removidas, uma vez que as camadas de pó em combustão lenta podem permanecer dentro dos mesmos por vários dias até que a planta seja reiniciada.

4.9.3. Superfícies quentes

Superfícies com quentes, com temperaturas suficientemente elevadas, como mancais superaquecidos, aquecedores, lâmpadas dentre outros, também podem desencadear uma explosão quando em contato com a nuvem de poeira explosão (ECKHOFF; LI, 2021).

Assim como mencionado anteriormente neste trabalho, as camadas de poeira não são bons condutores térmicos, então, neste caso, os depósitos de pó podem ocasionar um superaquecimento das superfícies ao impedir seu resfriamento normal. Desta forma, é esperado que motores elétricos ou demais superfícies quentes sejam mantidas limpas e vedados contra poeiras. Além destas, correias transportadoras ou

outras fontes de fricção, também podem se tornar fontes de ignição por superaquecimento (CROSS; FARRER, 1982).

4.9.4. Impactos mecânicos

Apesar de serem interações de curta duração entre dois sólidos, se um deles for duro o suficiente, pequenos fragmentos podem se desprender e devido ao calor absorvido durante o impacto, podem começar a queimar no ar. Outro cenário, inclui o aquecimento da superfície de atrito devido aos repetidos impactos, ocasionando uma situação propícia a explosão (ECKHOFF; LI, 2021).

Faíscas geradas por impacto, na verdade, não são faíscas, na verdade são pequenos pontos quentes criados quando a energia do impacto é dissipada como calor no ponto de contato. Não é possível definir a energia de uma faísca por impacto em termos de corrente e tensão, como no caso das faíscas elétricas. O impacto causa transferência direta de energia cinética do impacto para calor no ponto de contato podendo dar início a oxidação exotérmica da superfície (CROSS; FARRER, 1982).

4.9.5. Faíscas elétricas e eletrostáticas

Faíscas indutivas (de circuitos elétricos interrompidos) e capacitivas (descargas eletrostáticas entre objetos condutores) podem gerar energia suficiente para inflamar poeira. Descargas de escova propagante e ao longo da superfície de poeira em massa são especialmente perigosos também (ECKHOFF; LI, 2021).

4.9.5.1. Faíscas elétricas

Um arco transitório é formado quando um circuito que conduz corrente elétrica é interrompido e há uma pequena lacuna no circuito. Uma faísca de apenas alguns milijoules é suficiente para inflamar nuvens de poeira, porém um arco elétrico é capaz, não apenas de inflamar uma nuvem, mas também uma camada de poeira. Este tipo de faísca pode ser gerado por interruptores, relés de contato, cabo condutores de corrente, motores e outras máquinas elétricas, por isso devem ser protegidos com vedação contra poeira, serem a prova de chamas, intrinsecamente seguros ou

mantidos longe de áreas nas quais as poeiras podem acumular, conforme será discutido no tópico “Equipamentos” (CROSS; FARRER, 1982).

4.9.5.2. Faíscas eletrostáticas

Este tipo de faísca ocorre quando há acúmulo de carga elétrica em superfícies isolantes ou partículas de pó, seguido de uma descarga súbita que pode liberar energia suficiente para inflamar uma nuvem de poeira. As partículas de poeira podem adquirir por fricção ou indução durante transporte pneumático, peneiramento ou atrito com superfícies. As faíscas eletrostáticas podem ultrapassar a energia mínima de ignição, especialmente em ambientes com alta dispersão de partículas e baixa umidade (CROSS; FARRER, 1982).

Diversos casos de acidentes já foram registrados em atmosferas explosivas decorrentes de falhas de aterramento ou equipotencialização de equipamentos móveis ou fixos, sejam eles metálicos ou não. Desta forma, o tópico é amplamente estudado por diversos autores. No entanto, apenas a título de conhecimento, como forma de tratar adequadamente os riscos e respectivas medidas de controle mitigadores da eletricidade estática em atmosferas explosivas, foram desenvolvidas as ABNT IEC TS 60079-32-1 (Atmosferas explosivas – Parte 32-1: Riscos eletrostáticos – Orientações) e ABNT NBR IEC 60079-32-2 (Atmosferas explosivas – Parte 32-2: Riscos eletrostáticos – Ensaio) (CARDOSO *et al.*, 2025).

4.9.6. Radiação, ondas de choque e jatos quentes

Ondas de choque e radiação luminosa intensa, como feixes de luz laser transmitidos por fibras ópticas, podem inflamar nuvens de poeira (ECKHOFF; LI, 2021).

Após compreender os conceitos intrínsecos das explosões de poeiras, torna-se necessário conhecer os aspectos construtivos que visam prevenir ou mitigar os riscos de explosões.

4.10. ÁREAS CLASSIFICADAS

São áreas nas quais está presente uma atmosfera explosiva, como uma nuvem de poeira combustível, por exemplo, em concentrações que exigem precauções especiais quanto aos aspectos construtivos, de instalação e uso dos equipamentos presentes (ROSA, 2024; FORTUNA, 2018; SOARES; GOMES, 2015).

O tipo de classificação de área dentro do equipamento pode ser relacionado com a grau de emissão e às condições de ventilação (GENG *et al.*, 2020). Esta classificação é realizada nas etapas iniciais de um projeto industrial levando em consideração o tipo e a probabilidade de presença de materiais inflamáveis ou combustíveis em concentrações de risco (CARDOSO *et al.*, 2025).

Desta forma, a classificação de área tem como objetivo identificar e delimitar zonas onde podem ocorrer atmosferas explosivas, auxiliando na escolha adequada de equipamentos elétricos ou mecânicos com base no tipo de proteção “Ex”, o grupo de gases, ou no caso do presente trabalho, poeira, a classe de temperatura e o EPL (*Equipment Protection Level* – Nível de proteção do equipamento) que define o nível de proteção adequado para que o mesmo opere de forma segura em uma atmosfera explosiva, como destacado nos subtópicos a seguir (CARDOSO *et al.*, 2025).

4.10.1. Graus de liberação

Com base na probabilidade de formação das atmosferas explosivas, as fontes são classificadas quanto ao seu grau de liberação. Desta forma, tem-se:

- a) Grau Contínuo: liberação que pode ocorrer por longos ou curtos períodos, com presença frequente de nuvem de poeira (ROSA, 2024);
- b) Grau Primário: liberação em que se espera ocorrer de forma periódica ou ocasionalmente durante operação normal (WEIDMÜLLER, 2011);
- c) Grau Secundário: liberação por curtos períodos, pouco frequente e que não se espera que ocorra em operação normal (FORTUNA, 2018).

4.10.2. Graus e disponibilidade de ventilação

Conforme ABNT NBR 60079-10-2 apud Fortuna (2018), a ventilação pode ocorrer naturalmente, através do vento, gradientes de temperatura ou convecção

natural, ou artificialmente, por meio de ventiladores, exaustores ou sistemas de extração forçada. Estes são os principais meios de reduzir a concentração de poeira (abaixo do limite inferior de explosividade), contribuindo para a diminuição do risco de formação de atmosferas explosivas.

Desta forma, conforme o documento “*Hazardous Areas – Technical Guide*” desenvolvido por Weidmüller (2011), tem-se três graus e três disponibilidade de ventilação, sendo:

- a) Ventilação alta – pode reduzir quase que instantaneamente a concentração na fonte de emissão abaixo do limite inferior de explosividade, resultando em uma zona de extensão desprezível;
- b) Ventilação média – pode controlar a concentração, resultando uma fronteira de zona estável durante a liberação. A extensão e o tipo da zona irão depender dos parâmetros do projeto, já que a atmosfera explosiva não persiste excessivamente;
- c) Ventilação baixa – não consegue controlar a concentração durante a liberação;
- d) Ventilação boa – presente de forma contínua. A ventilação natural, geralmente obtida em ambientes externos, é considerada boa quando a velocidade do vento é superior a 0,5 metro por segundo;
- e) Ventilação razoável – ventilação esperada durante a operação normal, com interrupções permitidas desde que ocorram raramente e por curtos períodos;
- f) Ventilação ruim – não atende aos critérios de boa ou razoável, mas não devem ocorrer interrupções por longos períodos. Ventilações inferiores à esta categoria são desprezadas.

4.10.3. Níveis de limpeza

Conforme ABNT NBR IEC 60079-10-2 *apud* Fortuna (2018), os níveis de limpeza, são definidos como:

- a) Bom – as camadas de poeira são mantidas em camadas desprezíveis ou inexistentes, independente do grau de liberação;
- b) Regular – as camadas de poeira não são desprezíveis, mas possuem curta duração, pois são removidas antes que um incêndio possa ser iniciado;

- c) Pobre – as camadas não são desprezíveis e persistem por períodos prolongados.

4.10.4. Zonas de classificação

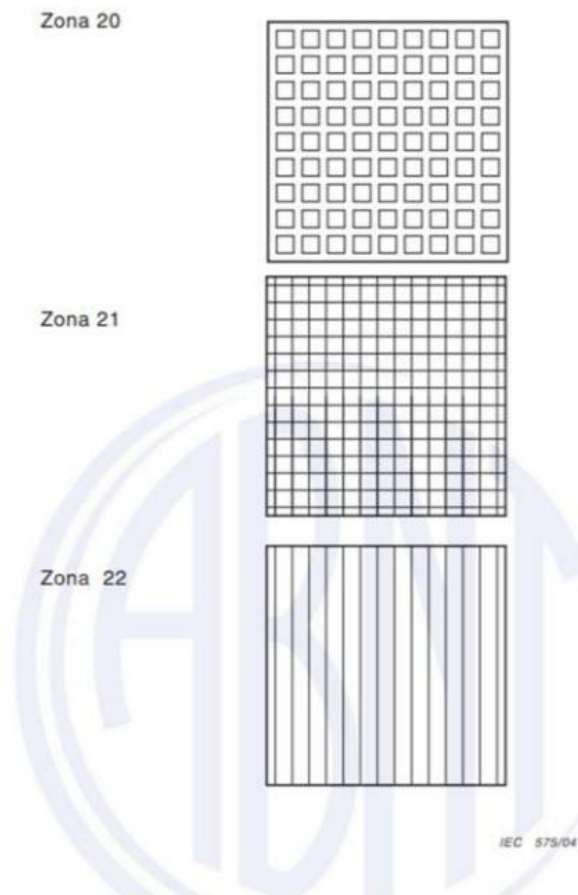
Com base nos parâmetros mencionados anteriormente, a classificação das áreas em zonas é realizada a depender do tipo de substância inflamável/ combustível, na frequência e duração da ocorrência, do grau e taxa de liberação e do tipo e grau de ventilação utilizada para diluir a concentração da substância (CARDOSO *et al.*, 2025).

Desta forma, para regiões onde se tem a presença de poeiras/ fibras combustíveis, são definidas as seguintes zonas, conforme os documentos: “Parecer técnico de estudo de áreas classificadas” desenvolvido por Ambrapa Engenharia e segurança do trabalho (2023) e o “Guia Abendi – Atmosferas Explosivas”, desenvolvido por Cardoso *et al.* (2025).

- a) Zona 20 – área cuja presença de atmosfera explosiva de poeira combustível está presente ou continuamente ou frequentemente ou por longos períodos;
- b) Zona 21 – local onde a ocorrência de uma atmosfera explosiva de poeira combustível pode ocorrer em condições normais de operação;
- c) Zona 22 – área na qual uma atmosfera explosiva de poeira combustível não é prevista de ocorrer em condições normais de operação. Porém sua ocorrência, caso existente, persistirá por um curto período.

Segundo, ABNT NBR IEC 60079-10-2 *apud* Fortuna (2018), a simbologia recomendada de classificação de áreas, pode ser observada na ilustração 6, além disso a representação da área deve vir acompanhada de uma legenda.

Ilustração 6 – Simbologia recomendada para classificação das zonas 20, 21 e 22



Fonte: ABNT NBR IEC 60079-10-2 *apud* Fortuna (2018).

Ainda em conformidade com Fortuna (2018), a norma realiza recomendações de extensão da zona classificada, desta forma, para a zona 20, é recomendado incluir o interior de dutos e equipamentos onde a atmosfera explosiva segue as mesmas especificações da zona em questão. Para a zona 21, recomenda-se a inclusão de regiões presentes a uma distância relativa de um metro em torno da fonte de liberação e para a zona 22, há uma recomendação de inclusão de regiões a uma distância de três metros adjacentes externamente à zona 21, em volta da fonte de liberação.

4.10.5. Sinalização de segurança em áreas classificadas

Conforme mencionado por Cardoso *et al.*, 2025, sob o ponto de vista normativo, isto é, ANBNT NBR IEC 60079-14 (Instalações elétricas terrestres “Ex”) e ABNT NBR IEC 61892-7 (Instalações elétricas marítimas “Ex”) e sob o ponto de legal, a NR-37

(Segurança e saúde em plataformas de petróleo) especificam que as áreas classificadas devem conter sinalização de segurança visível e legível, indicando a proibição da presença de fontes de ignição. Na ilustração 7, estão representados exemplos de placas de sinalização em conformidade com as referidas normas.

Ilustração 7 – Exemplos de placas de sinalização para áreas classificadas



Fonte: Cardoso *et al.* (2025).

Ainda, segundo autor, a padronização do formato, cor e conteúdo especificadas nas normas, tem como objetivo alertar os colaboradores quanto ao risco de formação de atmosferas explosivas no local de trabalho, para que possam seguir os procedimentos de segurança e de trabalho, bem como os requisitos das respectivas permissões de trabalho.

4.11. EQUIPAMENTOS

De modo a mitigar quaisquer possibilidades de explosão, torna-se necessário eliminar ou controlar as fontes de ignição presentes nas atmosferas explosivas. Desta forma, os equipamentos devem respeitar as especificações implicadas pelas áreas em que operam.

Segundo Soares e Gomes (2015), a portaria nº 179 do INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia), torna compulsória a certificação de quaisquer equipamentos elétricos empregados em atmosferas explosivas. Além disso,

o equipamento deve ter em seu corpo, uma marcação que identifica sob quais condições ele pode ser instalado. Um exemplo do modelo pode ser observado na tabela 4 abaixo:

Tabela 4 – Exemplo do modelo de marcação para equipamentos Ex conforme INMETRO

Exemplo de marcação para equipamentos Ex				
Ex	t	IIIC	T4	EPL
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)

Fonte: Autores (2025) adaptado de Soncini e Alves (2018) e Soares & Gomes, (2015).

De forma geral, o primeiro item, identificado como “(a)”, indica que o equipamento possui algum nível de proteção para área classificadas, ou seja, com atmosferas potencialmente explosivas. O segundo elemento, identificado como “(b)”, especifica o tipo de proteção que este equipamento possui. O item “(c)”, diz respeito ao grupo de substância para o qual este equipamento. O item “(d)” especifica a classe de temperatura de superfície do equipamento e por fim, o item “(e)”, que identifica o *Equipment Protection Level* (EPL ou Nível de Proteção do Equipamento) que designa em qual zona o equipamento pode ser instalado (SONCINI; ALVES, 2018; SOARES; GOMES, 2015).

Todos os itens descritos acima serão especificados nas próximas seções, exceto o item identificado como “(c)” que já foi demonstrado no subtópico “Grupos de poeiras e resistividade elétrica”.

4.11.1. Tipos de proteção para as diferentes zonas de classificação

Os nove tipos de proteção “Ex” descritos neste trabalho, terão seus fundamentos baseados nos estudos realizados por Ahirwal, Singh e Vishwakarma (2015) e Soares e Gomes (2015).

4.11.1.1. Proteção à prova de explosão (Ex d)

Conforme ABNT NBR IEC 60079-1, são equipamentos que contêm um invólucro capaz de suportar a pressão de uma explosão interna, impedindo sua propagação para o ambiente externo. Aplicável às zonas 1 e 2.

4.11.1.2. Pressurização (Ex-p)

Esta marcação diz respeito àqueles equipamentos que são fabricados para operar sob pressões internas positivas de modo a evitar a penetração de misturas explosivas no interior do invólucro. Aplicável às zonas 1 ou 21 e zona 2 ou 22. Sua norma regente no Brasil é a ABNT NBR IEC 60079-2.

4.11.1.3. Equipamento imerso em areia (Ex-q)

Sua norma vigente no Brasil é a ABNT NBR IEC 60079-5. Segundo autores, as partes que podem causar ignição, por centelhas ou altas temperaturas são imersas em quartzo ou pó semelhante. A areia de quartzo é eficaz na supressão de arcos e faíscas, sendo amplamente utilizada na prevenção de riscos de explosões. Com isso, foi determinado que a altura mínima segura de enchimento deve ser 15% maior do que a altura em que pode ocorrer a ignição. Aplicável às zonas 1 e 2.

4.11.1.4. Equipamento imerso em óleo (Ex-o)

Em concordância com a ABNT NBR IEC 60079-6, são equipamentos fabricados de modo que as partes que podem gerar centelhas ou altas temperaturas são instaladas em imersão com óleo. Desta forma, o óleo deve possuir alta rigidez dielétrica e boa condutividade térmica, baixa inflamabilidade e não formar partículas de carbono durante a extinção de arcos elétricos. Além disso, o invólucro deve ser protegido contra impactos, entrada de sujeira e umidade. Aplicável às zonas 1 e 2.

4.11.1.5. Segurança aumentada (Ex-e)

O conceito de segurança aumentada é destinado a áreas menos perigosas. Seu tipo de proteção é aplicado a equipamentos elétricos nos quais medidas adicionais são adotadas de modo a proporcionar maior segurança contra a possibilidade de temperaturas excessivas e da ocorrência de arcos e faíscas durante seu funcionamento padrão ou sob situações anormais especificadas. Estes equipamentos possuem elevado grau de proteção (IP) e a norma regente no Brasil é a ABNT NBR IEC 60079-7. Aplicável às zonas 1 e 2.

4.11.1.6. Segurança intrínseca [Ex-i (ia ou ib)]

Um sistema intrinsecamente seguro é aquele no qual qualquer faísca gerada, em condições normais ou anormais, não possui energia suficiente para causar ignição. Desta forma, em concordância com a ABNT NBR 60079-11, estes dispositivos possuem energia limitada. Aplicável às zonas 0 ou 20, 1 ou 21, 2 ou 22.

4.11.1.7. Não acendível [Ex-n (na; nr; nc; nl)]

Baseado na ABNT NBR IEC 60079-15, são equipamentos fabricados com dispositivos de circuitos que em condições normais de operação não produzem arcos, centelhas ou alta temperatura. Aplicável a zona 2.

4.11.1.8. Equipamento encapsulado em resina (Ex-m)

Segundo ABNT NBR IEC 60079-18, trata-se de um tipo de proteção em que partes capazes de inflamar uma atmosfera explosiva, seja por faíscas ou elevadas temperaturas, estão dentro de um isolamento com resina. O princípio de funcionamento consiste em submergir o equipamento, que será protegido, em uma substância adequada no estado líquido, a qual será resfriada até que se forme um bloco sólido. Posteriormente, o equipamento é envolvido por uma carcaça rígida de modo que a entrada de atmosferas explosivas no equipamento seja evitada, não sendo aplicável para equipamentos que possuem partes móveis. Aplicável nas zonas 0 ou 20, 1 ou 21, 2 ou 22.

4.11.1.9. Proteção por invólucro (Ex-t)

Equipamento em conformidade com a ABNT NBR 60079-31, onde todas as fontes de ignição são envoltas por um invólucro para evitar a ignição de uma camada ou nuvem de poeira, baseado no grau de proteção, resistência mecânica e máxima temperatura de superfície. Aplicável nas zonas 20, 21 e 22.

4.11.2. Classe de temperatura

Enquanto para os gases a classe de temperatura é determinada entre T1 e T6, conforme ABNT NBR IEC 60079-0 *apud* Soares e Gomes (2015), para equipamentos instalados em atmosferas explosivas de poeiras e fibras combustíveis, será indicado na marcação a temperatura máxima de superfície do equipamento em graus Celsius, ou seja – $T_{m\acute{a}x}$ °C.

Conforme abordado nos tópicos “Temperatura mínima de ignição de camada de poeira” e “Temperatura mínima de ignição de nuvens de poeira” do presente trabalho. Conforme ABNT NBR IEC 60079-14 *apud* Cardoso *et al.* (2025) e Rosa (2024), a temperatura de equipamentos “Ex” para poeiras combustíveis deve ser 2/3 TMI nuvem e, no mínimo, 75 K inferior à TMI de camada de poeira.

4.11.3. Nível de proteção de equipamentos

A identificação do nível de proteção consiste em suas letras. Sendo a primeira maiúscula e a segunda minúscula (EPL Xx). A primeira, diz respeito ao local de instalação do equipamento, sendo “M”, para minas subterrâneas, “G” para atmosferas explosivas de gases ou vapores inflamáveis e “D”, foco do presente trabalho, para atmosferas compostas por poeiras combustíveis (SOARES; GOMES, 2015). Já a segunda letra, é referente ao nível de proteção proporcionado pelo equipamento, sendo “a” para um nível muito alto, “b”, nível alto e “c” para uma proteção elevada/ reforçada.

4.11.4. Índice de proteção aplicado a equipamentos

Além do que já fora mencionado anteriormente, para equipamentos operantes em atmosferas explosivas de poeira combustível, também será indicado na marcação

o índice de proteção ou IP. Este índice tem como objetivo informar se o equipamento foi projetado para impedir a entrada de sólidos e líquidos em seu interior e é constituído pela sigla IP e dois dígitos, onde o primeiro se refere às barreiras de entrada de sólidos e o segundo às de entrada de líquido (SOARES; GOMES, 2015).

Conforme o foco do presente estudo, para poeiras o primeiro dígito pode ser selecionado conforme exibido na tabela 5.

Tabela 5 – Primeiro dígito presente no índice de proteção dos equipamentos

Primeiro dígito do índice de proteção		
Dígito Inicial	Função	Nível de proteção
5	Proteção parcial contra a entrada de poeira e acesso a componentes internos	Não possui vedação completa contra poeira, mas a eventual entrada de partículas não compromete o adequado funcionamento
6	Totalmente isolado contra a entrada de poeira e o acesso a componentes internos	Não se espera que haja entrada de qualquer poeira no interior do invólucro

Fonte: Autores (2025) adaptado de Soares e Gomes (2015).

Já para o segundo dígito, tem-se as definições descritas na tabela 6.

Tabela 6 – Segundo dígito presente no índice de proteção dos equipamentos
Segundo dígito do índice de proteção

Dígito secundário	Função	Nível de proteção
0	Sem Proteção	O equipamento está totalmente exposto, sem qualquer tipo de vedação contra água
1	Proteção contra gotas de água caindo verticalmente	Gotas que caem diretamente de cima não afeta, o funcionamento do equipamento
2	Proteção contra gotas de água e até 15° da vertical	O equipamento continua funcionando normalmente mesmo com gotas caindo em leve inclinação (até 15°C)
3	Proteção contra água pulverizada	Jatos de água lançados em ângulo de até 60° em relação à vertical não causam danos
4	Proteção contra respingos de água de qualquer direção	O equipamento resiste a projeções de água vindas de qualquer lado, sem prejuízo ao funcionamento
5	Proteção contra jatos de água	Jatos direcionados por bico em qualquer direção não comprometem o desempenho do equipamento
6	Proteção contra jatos fortes e ondas	Mesmo sob exposição a jatos potentes ou ondas, o equipamento permanece funcional
7	Proteção contra imersão temporária	O invólucro impede a entrada de água durante imersões por tempo limitado e sob pressão controlada
8	Proteção contra submersão contínua	Projetado para funcionar submerso continuamente, desde que respeitadas as condições especificadas pelo fabricante

Fonte: Autores (2025) adaptado de Soares e Gomes (2015).

5. METODOLOGIA

O presente trabalho consiste em uma pesquisa qualitativa, de caráter exploratório e descritivo, fundamentada em uma revisão bibliográfica juntamente a um estudo de caso. A escolha desta abordagem é justificada pela necessidade de compreender, de forma teórica e prática, os riscos reais presentes em indústrias do ramo alimentício que operam na presença de poeiras combustíveis, bem como a importância de conhecer e controlar esses riscos visando mitigar e prevenir possíveis explosões. Desta forma, foi possível alinhar o levantamento conceitual e normativo sobre o tema a uma análise palpável, realizada em um cenário industrial real, permitindo uma visão integrada entre a teoria e a prática.

A revisão bibliográfica teve como objetivo investigar os principais fatores de risco relacionados à formação de atmosferas explosivas de poeira e compreender as medidas preventivas previstas nas normas técnicas e regulamentadoras, especialmente NR10 e as normas técnicas da série ABNT NBR IEC 60079. Para obtenção do material de estudo, foram consultados artigos acadêmicos, monografias, guias técnicos, que mencionaram as publicações do Ministério do Trabalho e Emprego, INMETRO e ABNT, por exemplo.

As publicações, selecionados entre 1982 e 2025, abordaram temas como segurança em instalações elétricas, classificação de áreas, especificação de equipamentos Ex, prevenção de explosões, características físico-químicas das poeiras explosivas, dentre outros. Esta análise permitiu a identificação de condições favoráveis à formação de atmosferas explosivas de poeira, os riscos associados e as estratégias voltadas à proteção das instalações e, conseqüentemente, dos trabalhadores.

Com base no referencial teórico, foi realizado um estudo de caso em uma indústria alimentícia que apresenta potencial formação de atmosferas explosivas em determinadas partes do processo. O objetivo foi demonstrar, na prática, os conceitos observados na literatura, analisando a adequação das instalações e dos equipamentos às exigências normativas. A coleta de dados ocorreu por meio de observação direta, análise documental de relatórios técnicos emitidos por empresas especializadas e certificados de equipamentos, além de entrevistas informais com profissionais da área de manutenção. Os dados obtidos foram analisados de forma

descritiva e comparativa, permitindo identificar conformidades, falhas e oportunidades de melhoria em relação às práticas de prevenção de explosões.

Durante todo o processo, foram observados os princípios éticos da pesquisa, garantindo o anonimato da empresa e dos profissionais envolvidos, bem como o uso das informações exclusivamente para fins acadêmicos. Desta forma, a metodologia adotada possibilitou uma compreensão aprofundada sobre a importância da gestão de riscos em atmosferas explosivas de poeira, articulando o conhecimento teórico com a aplicação prática no contexto industrial alimentício.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a revisão de diferentes bibliografias sobre atmosferas explosivas de poeira, normas técnicas e regulamentadoras aplicáveis, é essencial compreender como tais conceitos são aplicados em um contexto real de operação industrial. Desta forma, foi conduzido um estudo de caso em uma indústria de produtos lácteos em pó, dedicada à produção de fórmulas infantis, a qual será denominada de “empresa Y”, para fins de confidencialidade, onde há potencial formação de atmosferas explosivas em virtude das características físico-químicas do material manipulado e das etapas do processo produtivo.

Por se tratar de um ambiente produtivo que lida com produtos de elevada criticidade, além dos rigorosos padrões de qualidade e segurança, torna-se igualmente necessário garantir a segurança das instalações elétricas e dos sistemas industriais, uma vez que a manipulação e o processamento de pós finos podem gerar misturas potencialmente explosivas quando dispersos no ar. Desta forma, a gestão adequada das fontes de ignição e o correto enquadramento das áreas classificadas assumem um importante papel na prevenção de acidentes.

O estudo de caso foi realizado de modo não interventivo, com o objetivo de analisar a aplicação prática das diretrizes de segurança em atmosferas explosivas de poeira, em conformidade com a NR-10 e normas técnicas da série ABNT NBR IEC 60079 e NBR ISO/IEC 80079.

Durante a pesquisa, foram observadas as regiões classificadas da planta industrial, bem como analisados os certificados de conformidade dos equipamentos elétricos “Ex”, o *layout* das instalações, certificados de classificação de áreas, especificações de matéria-prima, dentre outros. Essas informações possibilitaram

avaliar o nível de conformidade normativa e discutir os desafios práticos enfrentados por indústrias que operam em ambientes com potencial de explosão por poeira.

Frente ao exposto, o objetivo da presente seção é apresentar e discutir os resultados obtidos a partir da observação e análise documental do ambiente industrial selecionado, correlacionando-os com o embasamento teórico construídos na revisão bibliográfica. Sendo assim, pretende-se avaliar a conformidade normativa, identificar pontos críticos de risco e principalmente, consolidar os aprendizados teóricos por meio de sua observação prática.

Inicialmente, de modo a compreender um pouco das características físico-químicas das partículas de poeira presentes durante a operação, com base em um relatório técnico realizado por uma empresa certificadora de conformidade em atmosferas explosivas, tem-se as seguintes características das principais matérias primas existentes no processo, como o pó base (ou *Base Powder*), lactose e maltodextrina.

6.1. ÍNDICE DE GRAVIDADE DA EXPLOSÃO E TAMANHO MÉDIO DE PARTÍCULA

Considerando os valores dos parâmetros tamanho de partícula e K_{ST} dos materiais, em análise, na tabela 7, os valores de K_{ST} observados, são maiores que zero e inferiores a 200 ($0 < K_{ST} < 200$).

Tabela 7 – Valores de K_{ST} e tamanho médio de partícula

Produto	K_{ST}	Tamanho médio (μm)
<i>Base Powder</i>	28	83
Lactose	75	10
Maltodextrina	120	63

Fonte: Autores (2025) adaptado do relatório técnico da empresa Y (2025).

Desta forma, conforme demonstrado na tabela 2, todos os produtos acima descritos seriam considerados poeiras fracas ou moderadamente explosivas. No entanto, a maltodextrina é o composto com maior K_{ST} , conforme tabela 6, sendo desta forma, com base no que foi descrito pela literatura, o composto mais explosivo entre os três listados.

6.2. ENERGIA E TEMPERATURA MÍNIMA DE IGNIÇÃO

Conforme observado na tabela 8, todos os três compostos têm seus valores de temperatura mínima de ignição de nuvem maiores que os de camada, indicando que são mais facilmente inflamados quando em nuvem, como é o caso do *Base Powder*, por exemplo. Já no caso na lactose, notou-se que a camada não inflama, porém funde, apresentando menor risco de ignição.

Tabela 8 – Valores de energia e temperatura mínima de ignição

Produto	EMI	TMI
<i>Base Powder</i>	-	Nuvem – 400
		Camada – 340
Lactose	> 10 mJ	Nuvem – 400
		Camada – derrete
Maltodextrina	> 10 mJ	Nuvem - 400

Fonte: Autores (2025) adaptado do relatório técnico da empresa Y (2025).

Já em relação à energia mínima de ignição, observou-se que, apesar de a literatura não abordar profundamente valores para fins de comparação, os valores são relativamente altos, uma vez que não é especificado o quão maior que 10 mJ, o parâmetro é, portanto, foi subentendido que estes materiais não são facilmente inflamáveis por faíscas fracas, ou de baixa energia.

Além disso, conforme mencionado pela literatura, os equipamentos que operarem com esses materiais devem operar com temperaturas de superfície de 2/3 TMI da nuvem e, no mínimo, 75 K inferior à TMI de camada de poeira.

6.3. CONCENTRAÇÃO MÍNIMA DE EXPLOSÃO, GRUPO DE POEIRA E TEMPERATURA MÁXIMA DE SUPERFÍCIE

Sabe-se que para que a poeira seja explosiva, ela deve estar dentro de alguns limites definidos para que haja propagação sustentada da chama (aprox. 20 a 60 g/m^3). Frente ao exposto, conforme os dados demonstrados na tabela 9, observou-se que tanto a lactose quanto a maltodextrina apresentam o valor de 60 g/m^3 ,

confirmando desta forma que são poeiras potencialmente explosivas, com capacidade de sustentar chama.

Tabela 9 – Valores de concentração mínima de explosividade, grupos de poeira e temperatura máxima de superfície

Produto	CME	GP	$T_{m\acute{a}x}$
<i>Base Powder</i>	60	IIIB	T265°C
Lactose	60	IIIB	T293°C
Maltodextrina	-	IIIB	T267°C

Fonte: Autores (2025) adaptado do relatório técnico da empresa Y (2025).

A indicação “IIIB” disponível na coluna GP, indica o grupo de poeira e resistividade elétrica do material. Neste caso, o “III” indica que são substância pertencentes ao grupo das poeiras e o “B”, indica que são pós combustíveis não condutores de eletricidade. Neste caso, em concordância com a literatura as poeiras combustíveis não condutoras de eletricidade possuem resistividade elétrica superior a $10^3 \Omega \cdot m$.

Já a temperatura máxima de superfície, indicada na última coluna da tabela 9, dia respeito a maior temperatura atingida na superfície desses materiais durante os processos. Como pode ser observado, as temperaturas são inferiores às temperaturas de ignição de nuvem/ camada expostas na tabela 8, destacando uma certa dificuldade em atingir a ignição, considerando que estes materiais estão misturados a outros.

6.4. PLACAS DE SINALIZAÇÃO DE ÁREA CLASSIFICADA

Em conformidade com as normas, a empresa Y realiza alguns tipos de sinalização de área classificada e equipamentos/ instalações “Ex”. Neste caso, é possível observar nas ilustrações 8, 9, 10 e 11, os modelos de placas e suas aplicações em equipamentos como o silo de mistura e painel elétrico.

Na ilustração 8 é possível observar a forma triangular amarela, com bordas pretas e texto destacado, neste caso é recomendado que o preenchimento amarelo cubra pelo menos 50% da superfície da placa, conforme relatório técnico da empresa certificadora.

Ilustração 8 – Primeiro modelo de placa de sinalização “Ex” da empresa Y



Fonte: Relatório técnico da empresa Y (2025).

Já na ilustração 9, foi detectada a presença de recomendações mínimas da norma, como “Não fume”, “não use chama exposta”, dentre outros.

Ilustração 9 – Segundo modelo de placa de sinalização “Ex” da empresa Y



Fonte: Relatório técnico da empresa Y (2025).

Tendo em vista que, para instalações onde toda área é classificada, as sinalizações não precisam estar presentes em toda a instalação, sendo instaladas apenas na entrada da instalação ou locais de controle. A ilustração 10, é uma foto tirada da placa presente no misturador, que segue o mesmo padrão exposto pela ilustração 9.

Ilustração 10 – Foto da placa de sinalização presente no silo de pré-mistura da empresa Y



Fonte: Autores (2025).

E por fim, a ilustração 11, é uma foto retirada de um dos painéis “Ex” presentes na área.

Ilustração 11 – Foto da placa de sinalização presente em um dos painéis elétricos “Ex” da empresa Y

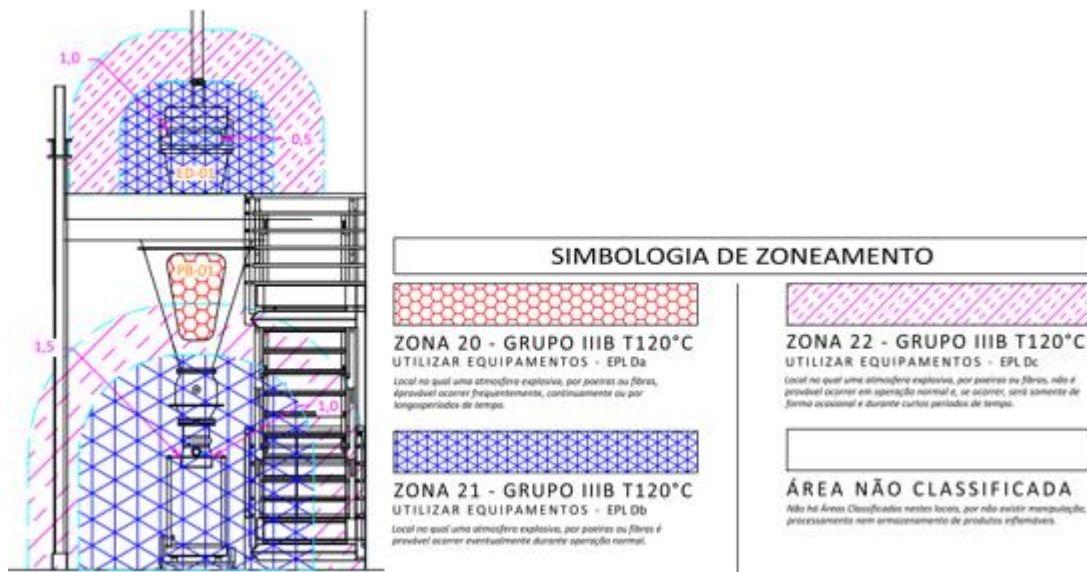


Fonte: Autores (2025).

6.5. CLASSIFICAÇÃO DE ZONAS

Devido a confidencialidade dos processos da empresa Y, a fim de demonstrar como esta empresa realiza a classificação de zonas e áreas em seus *layouts* da planta industrial, na ilustração 12, é possível observar o desenho técnico da etapa de pré-mistura das receitas dos produtos desenvolvidos.

Ilustração 12 – Simbologia de zoneamento da etapa de pré-mistura da empresa Y



Fonte: Relatório técnico da empresa Y (2025).

Neste caso, foi possível observar, que conforme descrito pela literatura, apesar de a representação das zonas 20, 21 e 22, não serem exatamente iguais as descritas pela ABNT, elas são distintas entre si, permitindo uma adequada compreensão sobre as delimitações de cada local.

Notou-se, também, que no silo onde ocorre a pré-mistura, ou seja, onde existe possibilidade de formação de nuvens de poeira, a zona utilizada foi a 20 - destacada em vermelho, já que conforme literatura, trata-se de uma área cuja presença de atmosfera explosiva de poeira combustível está presente ou continuamente ou frequentemente ou por longos períodos.

Na parte superior do silo, há uma estação onde o pó de cada componente da mistura é despejado, caracterizando uma zona 21, destacada em azul no diagrama. Neste caso, há a ocorrência de uma atmosfera explosiva de poeira combustível em condições normais de operação. O mesmo pode ser observado na parte inferior do

silo, onde há um tubo flexível que permite o ensacamento da pré-mistura realizada dentro do silo.

E para as áreas próximas de onde ocorre o despejo ou ensacamento dos pós, a classificação realizada foi a de zona 22 – destacada em rosa. Esta classificação está em total acordo com a literatura uma vez que, são áreas onde a formação de uma atmosfera explosiva de poeira não é prevista de acontecer em condições normais de operação.

Além disso, nota-se que na legenda, adicional ao tipo de zona, foi explicitado o grupo de poeira que atua no local, bem como as temperaturas de operação.

Também, é possível observar que o tipo de proteção de equipamento também está sugerido. Neste caso, para as zonas 20, 21 e 22 nota-se que foi sugerido a utilização que equipamentos com EPL Da, Db e Dc, respectivamente, o que significa que, conforme literatura, os equipamentos são indicados para regiões onde há poeira, enfatizado pela letra “D” na marcação, com níveis de proteção: “a”, para muito alto, “b”, para alto e “c” para uma proteção elevada/ reforçada.

Foi igualmente interessante observar que algumas matérias primas vêm com uma etiqueta costurada nos bags indicando em quais áreas é permitido com qual energia mínima de ignição, conforme ilustração 13.

Ilustração 13 – Etiqueta com marcações de zona e energia mínima de ignição



Fonte: Autores (2025).

6.6. EQUIPAMENTOS

Conforme revisado da literatura, os equipamentos destinados a áreas classificadas devem conter uma marcação indicando suas especificações. Desta forma, a ilustração 14 é uma especificação de um dispositivo para atmosferas explosivas obtido em sua certificação técnica de equipamento industrial.

Ilustração 14 – Especificações de dispositivo para atmosferas explosivas de poeira



Fonte: Bartec (2010).

Neste caso, é possível observar que a marcação foi realizada no padrão europeu, diferentemente do que fora observado no decorrer da revisão bibliográfica. Porém a essência é praticamente a mesma, conforme Khaleel (2024), a marcação “ce”, indica que está conforme os padrões da União Europeia, o símbolo “Ex”, que é aprovado para uso em atmosferas explosivas.

O “II” indica o grupo do equipamento, neste caso, conforme referido autor, indica que é um equipamento não destinado ao uso em minas subterrâneas, o “2D” indica categoria 2, para poeira, por isso o D. O “tD”, indica o tipo de proteção contra poeira, sendo, conforme revisão, o tipo “t” indicativo de que todas as fontes de ignição são envoltas por um invólucro para evitar a ignição de uma camada ou nuvem de poeira, baseado no grau de proteção, resistência mecânica e máxima temperatura de superfície. Em seguida, o A21, representando adequação à zona 21.

Conforme literatura, equipamentos destinados a atmosferas explosivas de poeira contam com uma indicação do índice de proteção, neste caso, foi observado o “IP66”, que conta com proteção totalmente isolado contra entrada de poeira e proteção contra jatos potentes de água. E por fim a indicação referente a temperatura máxima de superfície do equipamento, “T80°C”, demonstrando que sua superfície não excede a temperatura de 80 graus Celsius.

6.7. LIMPEZA E ORGANIZAÇÃO

Para minimizar os riscos de explosão, os padrões de limpeza e organização devem ser mantidos rigorosamente. Desta forma, todas as áreas contam com formulários de limpeza ambiental, o qual deve ser realizado diariamente, de modo a evitar acúmulo de sujidades que causariam tanto perigos de segurança quanto perigos, como contaminações cruzadas para o produto. A limpeza ambiental é realizada pelo time de limpeza da fábrica, porém as limpezas nos equipamentos são realizadas conforme procedimentos por operadores capacitados e treinados.

Existem também algumas rotinas de inspeções e procedimentos. Desta forma, em caso de queda de pó, eles devem realizar a sucção imediata nos equipamentos e no ambiente com aspiradores dedicados. Além de acionar a equipe fixa de limpeza para remover os resíduos do piso e plataformas. Para vazamentos, está procedimentada a parada imediata da produção e informação da liderança sobre o ocorrido.

Em se tratando do quesito organização, os materiais inflamáveis devem ser armazenados em locais adequados, como contenções e armários corta-fogo, por exemplo, de modo a evitar que os mesmos atuem como combustível. Itens que não estão sob uso rotineiro devem ser removidos, eliminando o acúmulo de pó. Além disso, os contentores de resíduos devem permanecer com suas tampas fechadas, para evitar uma possível dispersão e formação de nuvem de poeira. E por fim, a gestão da limpeza dos aspiradores, deve ser mantida conforme, para evitar além de contaminações, possíveis combustões.

6.8. TREINAMENTO, ORIENTAÇÕES E BOAS PRÁTICAS PARA DESEMPENHO DE ATIVIDADES EM ÁREAS CLASSIFICADAS

Alguns documentos da empresa Y, como procedimentos operacionais padrão e permissões de trabalho, também são extremamente importantes. Neste caso, para realizar atividades em áreas classificadas, ter treinamento e possuir obrigatoriamente uma permissão de trabalho assinada e, conseqüentemente, autorizada pelo dono de área e pelo time de segurança.

Concomitante a isso, trabalhos com chama aberta, fonte de calor ou centelhas em áreas classificadas exigem permissão de trabalho específica para atmosferas explosivas e são liberadas apenas em dias em que não há produção e quando o ambiente estiver limpo e com ausência de poeira suspensa. As manutenções preventivas também devem ocorrer com o sistema despressurizado, diminuindo assim os riscos de explosões.

Complementar a isso, também existem boas práticas relacionadas a não substituição de peças de equipamentos “Ex” por peças convencionais, manter os painéis elétricos sempre trancados evitando o acúmulo de pó e garantir que os sistemas de exaustão estejam sempre ligados.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu compreender, por meio da revisão bibliográfica e do estudo de caso realizado em uma indústria alimentícia, a relevância das normas técnicas e regulamentadoras para a prevenção de explosões em atmosferas de poeiras combustíveis. A análise teórica abordou os mecanismos físico-químicos das explosões, os parâmetros críticos das poeiras combustíveis e as exigências normativas aplicáveis, como a NR-10 e as normas da série ABNT NBR IEC 60079.

No estudo de caso, foi possível verificar na prática os conceitos discutidos, observando a classificação das áreas, a adequação dos equipamentos elétricos “Ex”, os procedimentos de limpeza e manutenção, bem como as sinalizações e treinamentos exigidos. Essa correlação entre teoria e prática demonstrou que a conformidade normativa não é apenas um requisito legal, mas uma medida essencial para garantir a segurança dos trabalhadores, a integridade das instalações e a continuidade operacional.

Dessa forma, a hipótese inicial de que a adoção de equipamentos certificados e prática alinhadas às normas técnicas reduz significativamente os riscos de explosões foi confirmada, evidenciando a importância real do estudo para o setor alimentício e para a promoção de uma cultura de segurança industrial. Além disso, o trabalho contribui para a formação acadêmica, oferecendo subsídios teóricos e práticos que podem servir como referência para futuras pesquisas e para a disciplina de Instalações Industriais.

REFERÊNCIAS

AHIRWAL, Bhagirath; SINGH, A. K.; VISHWAKARMA, R. K. **Area classification and types of protection for explosive atmospheres: a review.** TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering, Yogyakarta, v. 16, n. 2, p. 238-243, nov. 2015. DOI: 10.11591/telkomnika.v16i2.8506.

AMBRA ENGENHARIA DE SEGURANÇA DO TRABALHO. **Parecer técnico de estudo de áreas classificadas: corredor de exportação e terminal graneleiro – SC PAR Porto de São Francisco (SC).** São Francisco do Sul: Ambra Treinamentos Ltda., 2023. 41 p.

ANDRIS, Adriana *et al.* **ASPECTS OF THE STANDARDIZATION PROCESS FOR EXPLOSIVE ATMOSPHERES,** Annals Of The University Of Petrosani, Mining Engineering, Edition 25, p. 227-238, Petroșani – România, 2024.

BARROS, Daniel Moraes; NASCIMENTO, Emerson Leão Brito do. **Influência de acidentes e catástrofes na evolução da NR-10.** Revista Contemporânea, v. 4, n. 12, p. 1-21, 2024. DOI: 10.56083/RCV4N12-270.

BELTRAMI, Monica; STUMM, Silvana Bastos. **Controle de riscos e sinistros.** Curitiba: Instituto Federal do Paraná, 2012.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Our history: raising standards for more than a century.** Disponível em: <https://www.bsigroup.com/en-GB/about-bsi/our-history/>. Acesso em: 20 out. 2025.

BUSCHART, Richard J. **Dust explosions in process plants.** IEEE Industry Applications Magazine, New York, v. 5, n. 1, p. 22-27, jan./fev. 1999. DOI: 10.1109/2943.736083.

CARDOSO, André Luiz et al. **Guia “Ex” – Atmosferas explosivas: equipamentos e instalações elétricas e mecânicas.** São Paulo: Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, 2025.

CARVALHO FILHO, José Edson de. **Avaliação de atmosferas explosivas numa indústria corticeira.** 2023. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Segurança e Higiene Ocupacionais) – Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto, 2023.

CARVALHO JÚNIOR, João Andrade de; MCQUAY, Mardson Queiroz. **Princípios de combustão aplicada.** Florianópolis: Editora da UFSC, 2007. 176 p. ISBN 978-85-328-0377-1.

CARVALHO, Daniel Mendes de; CRUZ, Flavio da. **Sistema de segurança para ambientes com atmosfera explosiva.** Revista Brasileira de Mecatrônica, São Caetano do Sul, v. 1, n. 2, p. 14-25, out./dez. 2018.

COSTA, Carynne Santos da; PINTO, Fabiana Rocha; ALVES, Thiago dos Santos. Application of NR-10 regulatory as a method of accident prevention in electricity in two companies from Manaus industrial district in Brazil. **International Journal Of Advanced Engineering Research And Science**, [S.L.], v. 6, n. 11, p. 178-183, 2019. AI Publications. <http://dx.doi.org/10.22161/ijaers.611.27>.

COSTELLA, Marcelo Fabiano; PILZ, Silvio Edmundo; BET, Andrisio. **Método de coleta e análise de amostras de poeira para avaliação de riscos de explosões de pós em suspensão em unidades de recebimento e armazenagem de grãos**. *Gestão & Produção*, São Carlos, v. 23, n. 3, p. 503-514, 2016. DOI: 10.1590/0104-530X1324-15.

CROSS, Jean; FARRER, Donald. **Dust Explosions**. New York: Plenum Press, 1982. 360 p.

CROWL, Daniel A.; LOUVAR, Joseph F.. **Chemical Process Safety: fundamentals with applications**. 4. ed. [S.L.]: Person Education, Inc, 2019. 665 p. (ISBN-13: 978-0-13-485777-0).

ECKHOFF, Rolf K. **Current status and expected future trends in dust explosion research**. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 18, p. 225-237, 2005. DOI: 10.1016/j.jlp.2005.06.012.

ECKHOFF, Rolf K.; LI, Gang. **Industrial dust explosions: a brief review**. *Applied Sciences*, v. 11, n. 4, p. 1669, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11041669>.

FORTUNA, Alice de Britto Pereira. **Classificação de área para poeiras explosivas em uma planta industrial de vedantes**. 2018. 100 f. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2018.

GENG, Jie; MURÈ, Salvina; DEMICHELA, Micaela; BALDISSONE, Gabriele. **ATEX-HOF methodology: innovation driven by human and organizational factors (HOF) in explosive atmosphere risk assessment**. *Safety*, Basel, v. 6, n. 1, p. 1-21, jan. 2020. DOI: 10.3390/safety6010005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **About ISO**. Disponível em: <https://www.iso.org/about>. Acesso em: 14 out. 2025.

KHALEEL, Abdulrahman. **ATEX designing guide**. 2024. 39 f. Thesis (Bachelor of Engineering in Automation Engineering) – Seinäjoki University of Applied Sciences, Seinäjoki, 2024.

LIBERMAN, M. *et al.* **Multipoint Radiation Induced Ignition of Dust Explosions: Turbulent Clustering of Particles and Increased Transparency**. 2017.

LIN, Chendi; QI, Yingquan; GAN, Xiangyang; FENG, Hao; WANG, Yan; JI, Wentao; WEN, Xiaoping. **Investigation into the suppression effects of inert powders on the minimum ignition temperature and the minimum ignition energy of polyethylene dust.** *Processes*, v. 8, n. 3, p. 294, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8030294>.

MITTAL, Manju. **Models for minimum explosible concentration of organic dust clouds handled in industries.** *Chemical Engineering & Technology*, v. 20, n. 7, p. 502-509, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1002/ceat.270200712>.

MORAIS, Hiago Lima de. **PREVENÇÃO DE ACIDENTES POR EXPLOSÕES EM SILOS DE ARMAZENAMENTO DE GRÃOS.** 2019. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2019.

MOREIRA, Alexandre Kascher. **ESTUDO SOBRE A APLICAÇÃO DA NORMA REGULAMENTADORA NÚMERO 10 DO MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO EM LABORATÓRIOS ACADÊMICOS DE ENGENHARIA ELÉTRICA.** 2013. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

NICHETTI, Tatiana. **Atualização do conhecimento científico tecnológico sobre as técnicas de determinação do ponto de fulgor, massa específica de produtos do petróleo e condutividade elétrica do etanol.** 2010. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Química Industrial) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química, Porto Alegre, 2010.

OLIVEIRA, Rodrigo Suzano de. **Atmosferas potencialmente explosivas: prevenindo acidentes na indústria do petróleo.** *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, Ano 09, Ed. 01, Vol. 03, p. 05-27, jan. 2024. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/prevenindo-acidentes>. DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/prevenindo-acidentes. Acesso em: 20 out. 2025.

PEREIRA, Joaquim Gomes; SOUSA, João José Barrico de. **Manual de auxílio na interpretação e aplicação da NR-10: NR-10 comentada.** São Paulo: Ministério do Trabalho e Emprego, Superintendência Regional do Trabalho e Emprego no Estado de São Paulo, 2010. 99 p.

PIMENTA, Thamires Ingrid Lopes. **O estudo da combustão: uma revisão de literatura.** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química Industrial) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2024.

RODRIGUES, Anthony Weygle; SIMÕES, Isael; MOREIRA, Fernanda Silva. **Segurança em instalações elétricas de baixa tensão: uma análise e discussão da NR-10.** *Revista FIMCA*, v. 11, n. 2, p. 20-25, set. 2024. DOI: <https://doi.org/10.37157/fimca.v11i2.1074>.

ROSA, Rafael Oliveira. **Estudo de área classificada por poeira em uma torre de transferência de carvão mineral**. 2024. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2024.

SANTOS, Paulo Pereira dos. **Estudo do hidrogênio quanto à utilização como combustível em motores de combustão interna**. 2020. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Eletrônica Automotiva) – Faculdade de Tecnologia de Santo André, Santo André, 2020.

SIWEK, Richard; CESANA, Christoph. **Ignition behavior of dusts: meaning and interpretation**. *Process Safety Progress*, v. 14, n. 2, p. 107-119, Apr. 1995. DOI: <https://doi.org/10.1002/prs.680140205>.

SOARES, Gonçalo de Jesus; GOMES, Vagner Mendes. **Instalações elétricas em atmosfera explosiva**. Belo Horizonte: Centro Universitário de Belo Horizonte, 2015.

SONCINI, Alessandro Zittlau; ALVES, Anderson. **Processo de certificação de produto eletrônico para atmosfera explosiva por segurança intrínseca**. *Revista Ilha Digital*, Florianópolis, v. 7, p. 31-46, 2018.

WEIDMÜLLER INTERFACE GmbH & Co. KG. **Hazardous Areas Technical Guide: An Introduction to ATEX Terminology & Regulations**. Detmold: Weidmüller, 2011.