

FONTES DE IGNIÇÃO EM EXPLOSÕES DE POEIRAS COMBUSTÍVEIS: UMA ANÁLISE ESTATÍSTICA APLICADA À ATIVIDADE PERICIAL

João Pedro Koerig Schuster¹

<https://orcid.org/0009-0007-0675-3723>

Mateus Henrique Schumacher Valério²

<https://orcid.org/0009-0000-01357-5021>

RESUMO

Explosões por poeiras combustíveis configuram eventos de elevado potencial destrutivo e alta complexidade investigativa, especialmente em setores como o alimentício, madeireiro e químico. Este estudo identifica e analisa as principais fontes de ignição envolvidas nesses eventos, correlacionando-as aos setores industriais mais afetados, com base em dados estatísticos históricos e contemporâneos, literatura técnica especializada e normas da NFPA. A relação entre setor produtivo e padrão de ignição contribui para a formulação de hipóteses periciais mais direcionadas. A análise estatística, nesse contexto, se consolida como ferramenta complementar valiosa, reforçando a importância da capacitação técnica contínua e da criação de uma base de dados sobre explosões por poeira.

Palavras-chave: Explosões de poeira; Fontes de ignição; Perícia de incêndios; Análise estatística; Setor produtivo.

¹Oficial do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina– CBMSC; Especialista em Perícia de Incêndio.

²Oficial do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina– CBMSC; Especialista em Perícia de Incêndio.

IGNITION SOURCES IN COMBUSTIBLE DUST EXPLOSIONS: A STATISTICAL ANALYSIS APPLIED TO FORENSIC ACTIVITY

ABSTRACT

Combustible dust explosions are events with high destructive potential and high investigative complexity, especially in sectors such as the food, timber and chemical industries. This study identifies and analyzes the main ignition sources involved in these events, correlating them to the most affected industrial sectors, based on historical and contemporary statistical data, specialized technical literature and NFPA standards. The relationship between the production sector and the ignition pattern contributes to the formulation of more targeted expert hypotheses. In this context, statistical analysis is consolidated as a valuable complementary tool, reinforcing the importance of continuous technical training and the creation of a database on dust explosions.

Keywords: Dust explosions; Ignition sources; Fire expertise; Statistical analysis; Production sector.

Artigo Recebido em 13/05/2025

Aceito em 02/07/2025

Publicado em 30/12/2025

1. INTRODUÇÃO

Explosões constituem fenômenos de alta energia e curta duração, capazes de causar significativos danos materiais, vítimas mortais e impactos operacionais severos. Entre as diversas variedades deste fenômeno, as explosões por poeiras combustíveis merecem atenção especial quando o contexto é a engenharia de segurança e, particularmente, a atividade pericial, dado seu elevado potencial destrutivo e sua recorrência em ambientes industriais e agroindustriais no Brasil e no mundo.

Embora documentadas desde o século XVIII, explosões envolvendo poeiras finamente particuladas ainda representam desafios substanciais à investigação pericial. Fatores como a complexidade dos cenários, a volatilidade dos vestígios (que podem ser completamente destruídos pelo fenômeno) e a multiplicidade de fontes potenciais de ignição contribuem para a dificuldade na reconstituição da dinâmica do evento e a subsequente indefinição das causas de muitas destas explosões.

A atuação do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, tanto na fase de prevenção (por meio de análise de projetos e vistorias técnicas), quanto na atividade pericial posterior à ocorrência, demanda domínio teórico e familiaridade com os mecanismos que envolvem esse tipo específico de explosão.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo identificar, caracterizar e analisar as principais fontes de ignição envolvidas em explosões de poeiras combustíveis, com base em evidências estatísticas, descrições técnicas consolidadas na literatura e normas de segurança vigentes, em especial as da National Fire Protection Association (NFPA). A ênfase será direcionada à

relação entre fontes de ignição e os setores industriais mais afetados, com especial atenção às implicações periciais desse fenômeno. A justificativa da abordagem adotada se fundamenta na lacuna existente entre os estudos teóricos sobre explosões de poeiras muitas vezes voltados a fenômenos laboratoriais ou normativos e a realidade prática da investigação pericial, que exige um olhar integrado entre estatística de ocorrências e as características setoriais e industriais, cuja relação pode fornecer um direcionamento ao investigador quanto às fontes de ignição mais prováveis nas ocorrências de explosão por poeira que venha periciar. Ao focar nas fontes de ignição e sua distribuição por setor, o trabalho busca além de oferecer uma contribuição aplicada à atividade de campo do perito, fornecer base técnica para o aprimoramento das estratégias de prevenção institucional.

1.2 METODOLOGIA

A metodologia adotada baseou-se em (i) revisão bibliográfica especializada, com consulta a obras técnicas de referência (Eckhoff; Babrauskas; DeHaan & Ilove); (ii) análise de dados estatísticos históricos e contemporâneos—NFPA (EUA, 1900-1956), U.S. Chemical Safety Board (EUA, 1980-2005), Beck (Alemanha Ocidental, 1965-1980) e Cloney/Dust Safety Science (EUA, Canadá e demais países, 2019-2023); e (iii) exame de normativas técnicas, com destaque para NFPA 921 (2021), 652 (2019), 654 (2020) e 61 (2020).

Por fim, procurou-se estabelecer interfaces diretas entre os conceitos e dados analisados e a prática pericial, valorizando a aplicabilidade dos resultados obtidos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 EXPLOSÕES

As explosões são fenômenos complexos, nos quais ocorre uma súbita liberação de energia, que culmina em um rápido aumento de pressão e expansão de volume.

Este processo pode resultar na ruptura de um sistema de contenção de um gás ou vapor e na propagação de uma onda de choque. Fatores como a natureza do combustível, a disponibilidade do comburente, as condições de confinamento e a presença de uma fonte de ignição desempenham papéis cruciais na dinâmica destes eventos. Segundo DeHaan e Icove (2012, p. 488), “uma explosão pode ser definida como a conversão súbita de energia potencial química ou mecânica em energia física cinética sob a forma de pressão, calor e, por vezes, luz, à medida que os gases são gerados muito rapidamente ou liberados”.

DeHaan e Icove (2012, p. 488) classificam as explosões em quatro categorias principais: química, mecânica, elétrica e nuclear. A diferenciação entre estas reside fundamentalmente na origem ou no mecanismo de geração da sobrepressão.

Explosões elétricas são deflagradas por descargas de corrente elétrica de elevada intensidade; explosões mecânicas resultam da falha de um recipiente sob pressão interna excessiva, superando a sua resistência estrutural; e explosões nucleares são originadas por reações descontroladas de fissão ou fusão nuclear, conforme descrito por Silva (2007, p. 19).

As explosões químicas categoria que engloba as explosões de poeiras e, portanto, constitui um componente central do objeto do presente estudo serão, por conseguinte, analisadas em maior profundidade na seção subsequente.

2.1.1 Explosões químicas

Explosões químicas ocorrem quando uma reação físico-química exotérmica e com velocidade de reação extremamente alta gera, a partir dos produtos resultantes, uma elevação rápida e significativa da pressão, em relação à pressão inicial dos reagentes. Nesses fenômenos, a energia química é convertida em energia cinética, manifestando-se com uma ampla gama de efeitos e gerando subdivisões quanto à sua classificação, como as explosões por explosivos e as explosões por combustão, sendo esta última analisada em detalhe a seguir.

2.1.2 Explosões por combustão

O subtipo mais comum de explosões químicas compreende as explosões de combustão, também referidas como explosões de fase difusa. Estas são caracterizadas por, além da presença de um combustível (frequentemente hidrocarboneto), utilizar o ar atmosférico como comburente, podendo, também, envolver materiais particulados, a combinação destes elementos forma o que é chamado de mistura explosiva. Nestes eventos, a geração de sobrepressão é atribuída à rápida expansão volumétrica dos produtos da combustão aquecidos pela queima do combustível. “Seus efeitos dependem do tipo de combustível, concentração, mecanismo de ignição e grau de confinamento.”, DeHaan e Icove (2012, p. 490)

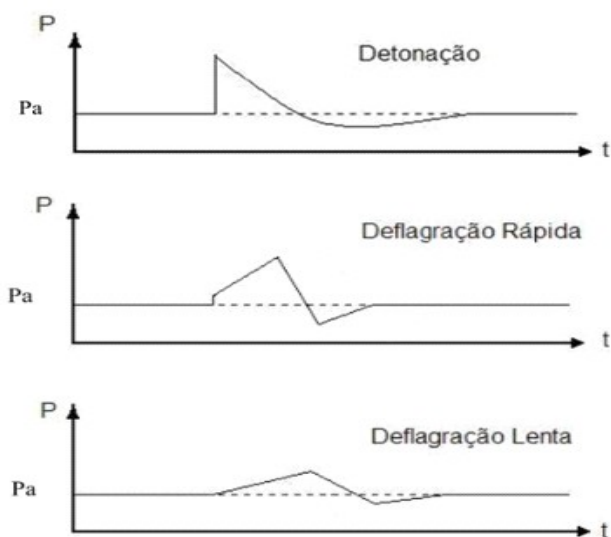
Segundo a NFPA 921 (2021, p. 248) nessas reações, designadas como de propagação, o processo de combustão ocorre de forma sequencial e utilizando o combustível como canal, estabelecendo uma zona de reação com uma frente de chama que separa o material consumido daquele que permanece intacto.

Ainda dentro do escopo das explosões de combustão, encontra-se uma classificação importante de se destacar, que engloba as deflagrações e detonações, categorizadas com base na velocidade de propagação da frente

de chama através da mistura explosiva. As detonações representam reações de combustão nas quais a velocidade da zona de reação em relação aos materiais inflamáveis não reagidos é supersônica, enquanto as deflagrações possuem propagação na velocidade do som ou abaixo dela. Ainda nesse contexto, é destacado por Silva (2007, p. 33) que a propagação da reação nas deflagrações se dá pela transmissão de calor da parte já reagida para aquela que ainda não sofreu este processo, enquanto que a propagação das detonações ocorre pela passagem da onda de choque pela parte não reagida, o que ocorre antes da chegada do calor.

Os efeitos práticos quanto às diferenças de comportamento da pressão de uma deflagração para uma detonação podem ser observados na Figura 1.

Figura 1- Diferença entre curvas de pressão versus tempo de detonação e deflagrações



Fonte: Silva (2007)

Por fim, de acordo com a NFPA 921 (2021, p. 248-249), ainda existem subclassificações quanto ao tipo de combustível envolvido quando se trata

de explosões por combustão, sendo eles: gases inflamáveis, vapores de líquidos inflamáveis (inflamáveis e combustíveis), fumaça e produtos inflamáveis de combustão incompleta (explosões de refluxo), aerossóis e poeiras combustíveis, a qual será tratada com maior profundidade na seção subsequente.

2.1.3. Explosões de poeiras

Com base na NFPA 921 (2021, p. 260) explosões de poeira ocorrem quando materiais sólidos finamente divididos e dispersos no ar originam explosões, as quais podem ter características particularmente violentas e destrutivas. Exemplos destes materiais incluem poeiras de grãos, poeiras de madeira e poeiras metálicas, sendo que as primeiras são as principais causas de explosões em silos agrícolas.

Adotando Eckhoff (2003, p. 01-02), observa-se que a velocidade e a intensidade da combustão de um material sólido no ar são diretamente proporcionais ao grau de subdivisão ao qual ele é submetido. A Figura II demonstra as diferenças dos efeitos da queima de uma mesma massa de madeira, que, quando em um pedaço único queima lentamente e libera seu calor durante um longo período de tempo. Quando dividido em pedaços menores sua taxa de combustão aumenta, uma vez que a área total de superfície de contato entre a madeira e o ar aumentou. Além disso, a ignição da madeira se torna mais fácil. Se esta subdivisão continuar até tamanhos da ordem de 0,1 mm ou menos e estas partículas forem suspensas em um volume de ar suficientemente grande para dar a cada uma delas espaço que possibilite sua queima irrestrita, a taxa de combustão se torna muito rápida e a energia mínima para a ignição desta massa passa a ser muito reduzida. Tal nuvem de poeira em combustão é uma explosão de poeira.

Figura 2 - Como a taxa de combustão de uma determinada massa de um mesmo sólido combustível aumenta com o aumento de sua subdivisão.



Essas explosões manifestam-se com maior frequência em espaços confinados que apresentam uma dispersão significativa de poeiras combustíveis, a exemplo dos silos agrícolas, elevadores de grãos e instalações de processamento de materiais, conforme NFPA 921 (2021, p. 255).

Embora compostas por partículas sólidas, as nuvens de poeira compartilham diversas características de inflamabilidade com as misturas gás/ar, sobretudo no que diz respeito ao comportamento frente à ignição. A dispersão no ar confere à poeira propriedades aerodinâmicas específicas, sendo necessário movimento de ar para que a suspensão ocorra, característica que as distingue das explosões gasosas, que podem se desenvolver mesmo em atmosferas estáticas.

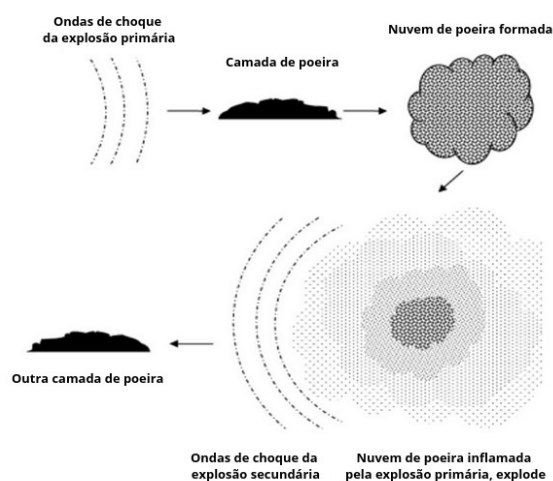
Segundo Babrauskas (2014, p.143), a ocorrência de explosões de poeira exige, via de regra, uma concentração de partículas tal, que o ambiente se torna inabitável sob condições normais. Por isso, é comum que esses eventos ocorram em espaços desocupados no momento da ignição, como depósitos ou áreas técnicas. Contudo, esse fato não deve ser interpretado como indicativo de baixa letalidade: movimentações operacionais, falhas de processo ou mesmo a presença esporádica de trabalhadores durante a ignição são suficientes para expor pessoas ao risco,

especialmente no caso de explosões secundárias ou em ambientes interligados.

Como regra prática, é frequentemente adotado o teste empírico segundo o qual, se não for possível enxergar a própria mão com o braço estendido à frente do corpo, a concentração de poeira no ar já pode representar risco de explosão. Essa simplicidade aparente, contudo, não diminui a complexidade do fenômeno: falhas de maquinário ou movimentações abruptas podem suspender camadas previamente depositadas, criando atmosferas explosivas mesmo em espaços até então considerados seguros.

Como demonstrado na Figura 3, essa dinâmica contribui para a ocorrência de eventos em duas fases: uma ignição inicial deflagra a poeira em suspensão, e a onda de choque resultante lança no ar novas partículas que alimentam uma explosão secundária, potencialmente mais severa. Ainda de acordo com o autor, esse comportamento bifásico é particularmente comum em ambientes como silos, elevadores de grãos e instalações agrícolas, onde a movimentação de materiais favorece tanto a geração quanto o acúmulo de poeira combustível.

Figura 3 - Dupla fase da explosão de poeiras.



Fonte: Acikgöz (2024)

Por fim, Babrauskas (2014, p. 144) ressalta a dificuldade histórica de modelagem teórica precisa para esses eventos. Embora pesquisas experimentais sobre explosões de poeira remontem ao século XVIII, as tentativas de estabelecer equações matemáticas ou modelos computacionais robustos para prever seu comportamento em escala real ainda são limitadas. Isso reforça a importância de abordagens periciais que considerem não apenas os fatores químicos envolvidos, mas também as condições físicas e operacionais dos ambientes analisados.

Compreender o comportamento das nuvens de poeira, contudo, exige também a identificação clara das condições necessárias para que uma explosão ocorra as quais serão abordadas a seguir.

2.1.4 Condições necessárias para a explosão de poeira

Segundo a NFPA 921 (2021, p. 260) e os estudos de Acikgöz (2024, p. 80), a ocorrência de uma explosão de poeira exige a presença simultânea de cinco elementos, representados pelo pentágono da explosão de poeiras (Figura 3), quais sejam: combustível (poeira); comburente (oxigênio do ar); fonte de ignição; suspensão da poeira no ar e confinamento.

Figura 4 - Pentágono da explosão de poeiras.



Fonte: Adaptado de Acikgöz (2024)

O combustível é representado pelas poeiras combustíveis sólidos finamente divididos que, ao se suspenderem em atmosfera oxidante, tornam-se altamente reativos. A granulometria é um fator determinante: quanto menor o diâmetro das partículas, maior a área superficial de reação. Eckhoff (2003, p. 2) aponta que poeiras muito finas, por apresentarem alta razão superfície-volume, favorecem uma reação em cadeia acelerada e intensa.

O comburente, via de regra, é o próprio oxigênio presente no ar atmosférico, cuja concentração ambiental (cerca de 21%) é suficiente para sustentar a combustão na maioria dos casos. Embora frequentemente negligenciado nas medidas de controle operacional, o comburente pode, sim, ser alvo de estratégias de mitigação. A inertização do ambiente por meio da substituição parcial do oxigênio por gases inertes como o nitrogênio ou o dióxido de carbono é capaz de elevar o limite de ignição e reduzir significativamente a severidade da explosão (Eckhoff, 2003, p. 69).

A fonte de ignição pode ser de natureza elétrica, térmica, eletrostática, mecânica ou química. O desafio pericial, nesse ponto, está na identificação das possíveis fontes que coexistiam no cenário ao tempo do evento. A NFPA 921 (2021, p. 270) recomenda a análise das formas de energia presentes, sua intensidade e sua proximidade do combustível. A energia eletrostática acumulada em equipamentos ou partículas em movimento, por exemplo, é uma das causas frequentemente negligenciadas, mas capaz de iniciar uma explosão em atmosferas empoeiradas.

O confinamento é a condição que transforma uma deflagração limitada em um evento com potencial destrutivo. Ao restringir a expansão dos gases, o ambiente confinado permite o acúmulo de sobrepressão e, conseqüentemente, a manifestação de força mecânica significativa. Essa característica é essencial para diferenciar a combustão superficial da explosão enquanto fenômeno físico, inclusive para fins de reconstrução pericial da dinâmica do evento.

A suspensão da poeira é o quinto elemento do pentágono. Quando depositadas, as poeiras podem queimar, mas não explodir. A formação de uma nuvem homogênea de poeira em suspensão, em concentração adequada, é condição crítica para a ocorrência da deflagração. Segundo a NFPA 652 (2019, p. 32), a dispersão da poeira em ar (ou outro oxidante), com concentração igual ou superior à concentração mínima explosiva (MEC), é uma das condições essenciais para que a ocorrência se configure como uma deflagração explosiva.

2.1.5. Fontes comuns de ignição em explosões de poeiras

As fontes de ignição constituem um dos cinco elementos do pentágono da explosão e representam, na maioria das ocorrências, o ponto inicial de um evento catastrófico. Para a atividade pericial, a identificação das possíveis fontes de ignição é de importância central, pois pode fornecer subsídios técnicos para determinação de responsabilidade, reconstituição da dinâmica do evento e analisar a conformidade das práticas operacionais com as normas vigentes. A NFPA 921 (2021, p. 270) recomenda que, uma vez identificados o combustível e o local de origem, a análise das fontes de ignição deve ser minuciosa, considerando fatores como energia mínima de ignição do combustível, energia e temperatura da fonte potencial, localização relativa entre combustível e fonte, e a simultaneidade de sua presença no momento do evento.

Segundo a literatura técnica, as fontes de ignição mais comuns em ambientes suscetíveis à explosão de poeiras incluem:

Chamas Abertas: São consideradas fontes evidentes de ignição, englobando o uso de maçaricos, soldagem, corte térmico, fogões industriais e até mesmo velas. A NFPA 654 (2020, p. 15) determina que todas as

atividades classificadas como "hot work" estejam sujeitas a um sistema de autorização com medidas de segurança reforçadas.

Superfícies Quentes: Componentes de equipamentos que operam em temperaturas elevadas como motores, mancais, secadores ou tubulações, podem facilmente atingir ou ultrapassar a temperatura mínima de ignição da poeira, especialmente quando esta se acumula em camadas sobre tais superfícies. A NFPA 654 (2020, p. 45) orienta que o equipamento elétrico seja selecionado de forma a manter sua temperatura abaixo da temperatura de ignição por superfície da poeira.

Partículas Incandescentes: Poeiras também podem ser inflamadas por brasas ou partículas incandescentes, originadas por processos como soldagem, lixamento, atrito excessivo ou falhas mecânicas. Babrauskas (2014, p. 153) observa que “a ignição de uma nuvem de poeira pode ocorrer a partir de carvões em brasa, incluindo aqueles gerados por operações de corte e soldagem”.

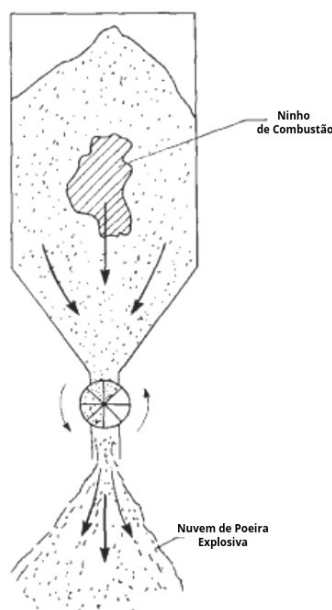
Faíscas Mecânicas: Surgem por atrito, impacto ou falha mecânica, como rolamentos superaquecidos, engrenagens desalinhadas ou queda de objetos metálicos em alta velocidade. Embora nem toda faísca seja capaz de provocar a ignição, Eckhoff (2003, p. 24) indica que tais fontes são estatisticamente relevantes em moinhos, coletores de pó e unidades de moagem.

Descargas Eletrostáticas: Esse tipo de ignição ocorre com frequência em ambientes com poeira fina e baixa umidade relativa. Em sua obra, Babrauskas (2014) lista seis tipos de descargas eletrostáticas (spark, corona discharge, brush discharge, powder heap discharge, Lichtenberg discharge e lightning-like discharge, no original, p. 554), das quais as mais perigosas para poeiras são as descargas por faísca e por acumulação em pilhas de pó. Ele afirma que “As descargas por faísca podem inflamar qualquer poeira

combustível, desde que a energia de ignição mínima (MIE) apropriada seja alcançada” (Babrauskas, 2014)

Autoaquecimento em Ninhos de Combustão: Certas poeiras, quando acumuladas em camadas espessas e pouco ventiladas, podem desenvolver zonas de pirólise interna que, ao serem agitadas, dispersam partículas incandescentes que, ao entrarem em contato com uma nuvem de poeira explosiva, deflagram a explosão. Esse fenômeno é frequente em silos e secadores, sendo ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Um ninho de combustão em um silo pode iniciar uma explosão de poeira se o ninho for liberado sobre uma nuvem de poeira explosiva.



Fonte: Eckhoff (2003)

Arcos Elétricos e Dispositivos Elétricos: Falhas de isolamento, conexões frouxas, ou sobrecargas em sistemas elétricos podem gerar faíscas e arcos com energia suficiente para iniciar ignições, especialmente em ambientes onde poeiras se acumulam sobre equipamentos energizados.

A identificação da fonte de ignição, no contexto pericial, deve considerar a evidência física direta (como padrões térmicos ou resíduos metálicos), o contexto operacional (manutenção recente, atividades de soldagem, falhas elétricas), e os registros disponíveis. A NFPA 921 (2021, p. 270) fornece um roteiro analítico que considera não apenas a energia da fonte e a energia mínima de ignição do combustível, mas também a sua simultaneidade e localização espacial no momento do evento.

2.2 RELEVÂNCIA ESTATÍSTICA DAS EXPLOSÕES DE POEIRA

As explosões por poeira constituem uma das ocorrências mais complexas no campo da engenharia de segurança e da perícia de incêndios e explosões. Os dados compilados ao longo de décadas evidenciam não apenas sua frequência, mas também a magnitude dos impactos humanos, materiais e operacionais envolvidos. Nesta seção, os dados estatísticos são organizados em três partes: (1) impactos, (2) indústrias mais afetadas e (3) fontes de ignição.

2.2.1. Impactos humanos e materiais das explosões de poeira

As explosões de poeira são fenômenos historicamente reconhecidos por seu alto potencial destrutivo. Como destaca Eckhoff (2003, p. 20), um dos primeiros registros sistemáticos sobre o tema remonta ao século XVIII:

As explosões de poeira são uma ameaça reconhecida à vida humana e ao patrimônio há muito tempo. Um dos primeiros relatos abrangentes de que se tem conhecimento é a análise detalhada do Conde Morozzo (1795) sobre uma explosão ocorrida no armazém de farinha do Sr. Giacomelli, em Turim, no ano de 1785. É interessante observar que Morozzo também menciona incidentes ainda mais antigos de combustão violenta de nuvens de farinha em suspensão no ar (Eckhoff, 2003).

O registro evidencia que o risco representado pela suspensão de poeiras combustíveis em ambientes confinados já era compreendido antes mesmo do advento da era industrial. Desde então, milhares de incidentes foram documentados ao redor do mundo, resultando em perdas humanas e materiais significativas, como demonstram os dados históricos e contemporâneos.

Os Estados Unidos possuem um amplo registro dos impactos destes eventos - com documentação desde o início do século XX, o que permite quantificar de forma objetiva o impacto em vidas humanas e em perdas materiais causado pelas explosões de poeiras.

Entre os anos de 1900 e de 1956, como pode ser observado na Tabela 1, as explosões de poeira deixaram 676 vítimas mortais, além de 1770 pessoas feridas. No mesmo período mais 100 milhões de dólares (valores dos anos das explosões, sem correção) foram perdidos pelos mesmos eventos.

Tabela 1 - Explosões de poeira nos Estados Unidos, 1900-1956: Óbitos, feridos e perdas materiais.

Explosões	Óbitos		Feridos		Perdas Materiais	
Número	Número	Por Explosão	Número	Por Explosão	Milhões	Por Explosão
1123	676	0,60	1770	1,57	100,5	0,089

Fonte: Adaptado de NFPA (1957, apud Eckhoff, 2003)

Entre 1980 e 2005, o U.S. Chemical Safety Board (CSB) registrou 281 explosões por poeira nos Estados Unidos, com um total de 119 mortes, 718 feridos e perdas materiais significativas (CSB, 2006, p. 30).

Saindo do contexto americano e ampliando a visão para outros contextos, observa-se que na Alemanha, num período de 16 anos (de 1965 a

1980), houve 103 óbitos e 492 feridos em eventos desta natureza, o que é demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Explosões de poeira na Alemanha Ocidental, 1965-1980: Óbitos e feridos.

Explosões	Óbitos		Feridos	
Número	Número	Por Explosão	Número	Por Explosão
357	103	0,288	492	1,378

Fonte: Adaptado de Beck (1982, apud Eckhoff, 2003)

Para um período mais recente, entre os anos de 2019 e 2023, os relatórios da Dust Safety Science (Cloney, 2024) apontam em escala global , um número de 198 mortes e de 606 feridos em acidentes que envolvam poeira combustível (aqui estão incluídos, além das explosões, os incêndios).

Tabela 3: Registros de ocorrências relacionadas a poeiras explosivas entre os anos de 2019 e 2023.

	Incêndios	Explosões	Óbitos		Feridos	
Região	Número	Número	Número	Por Ocorrência	Número	Por Ocorrência
Estados Unidos	543	125	5	0,007	148	0,221
Canadá	57	13	3	0,042	17	0,242
Resto do mundo	394	152	190	0,347	441	0,807
Total	994	290	198	0,154	606	0,471

Fonte: Adaptado de Cloney (2024)

2.2.2. Indústrias mais afetadas por explosões de poeira

As explosões de poeira figuram entre os eventos acidentais de maior complexidade técnica e potencial destrutivo em ambientes industriais que manipulam materiais finamente divididos. Sua letalidade, capacidade de gerar danos em cadeia e dificuldade de prevenção os tornam especialmente relevantes no contexto da segurança industrial e da perícia técnico-científica. A literatura técnica e os bancos de dados estatísticos demonstram que determinados setores apresentam maior incidência desses eventos, seja pela natureza dos materiais, seja pelos processos adotados.

Com base na análise estatística da NFPA (1957) de 1123 explosões ocorridas entre 1900 e 1956, Eckhoff (2003, p. 21) revela (Tabela 4) que os setores alimentício e madeireiro concentram não apenas a maior parte das explosões registradas no período de 1900 a 1956, como também estão associados a impactos humanos e econômicos significativos. O setor de alimentos e rações respondeu por 51,4% das explosões registradas, mas esse número salta para 60% dos feridos e 60,5% dos óbitos evidenciando uma relação desproporcional entre frequência e severidade. Além disso, as perdas materiais médias por explosão neste setor (US\$ 0,131 milhões) superam as de todos os demais segmentos analisados. A susceptibilidade dessas atividades decorre, em grande parte, da formação recorrente de nuvens de poeira em suspensão e da coexistência de múltiplas fontes potenciais de ignição como atrito mecânico, calor de superfície ou descargas elétricas, presentes em seus processos industriais.

Tabela 4 - Explosões de poeira nos Estados Unidos, 1900-1956: Dados considerando os tipos de indústria.

Tipo de Poeira	Explosões		Óbitos			Feridos			Perdas Materiais	
	Número	(%)	Número	(%)	Por Explosão	Número	(%)	Por Explosão	Milhões (US\$)	Por Explosão
Madeira	162	14,5	38	5,6	0,23	160	9,0	0,99	11,4	0,070
Comida e Ração	577	51,4	409	60,5	0,71	1061	60,0	1,84	75,8	0,131
Metal	80	7,1	108	16,0	1,35	198	11,2	2,48	3,2	0,040
Plástico	61	5,4	44	6,5	0,72	121	6,8	1,98	3,7	0,061
Carvão (exceto minas)	63	5,6	30	4,4	0,48	37	2,1	0,59	1,6	0,025
Papel	9	0,8	0	0	0	0	0	0	0,5	0,056
Outros	171	15,2	47	7,0	0,27	193	10,9	11,13	4,3	0,025
Total	1123	100	676	100	0,60	1770	100	1,57	100,5	0,089

Fonte: Adaptado de NFPA (1957, apud Eckhoff, 2003)

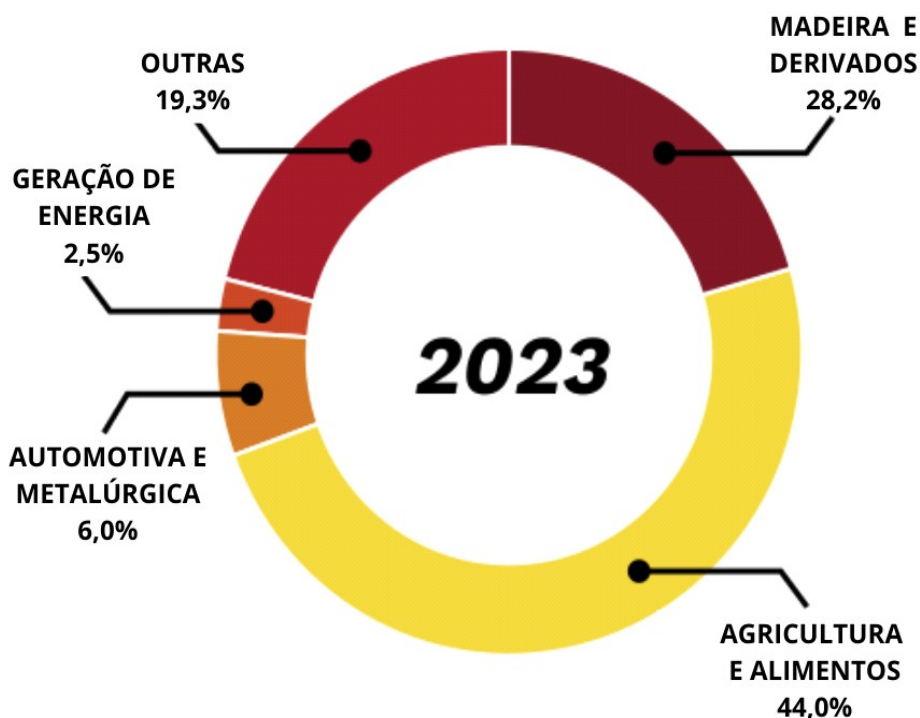
Análise semelhante foi realizada pelo U.S. Chemical Safety Board, que, em relatório publicado em 2006, identificou que 281 explosões de poeira ocorridas entre 1980 e 2005 nos Estados Unidos concentraram-se majoritariamente em instalações de alimentos (43%), madeira (18%) e metais (14%) (CSB, 2006, p. 9). A convergência desses dados com os de Eckhoff (2003, p. 21), que se baseiam em eventos registrados entre 1900 e 1956, evidencia a perenidade da tendência de exposição dos setores alimentício e madeireiro aos riscos de explosão de poeira. Mesmo com o avanço de tecnologias e o aprimoramento normativo ao longo das décadas, esses setores continuam a figurar entre os mais atingidos o que sugere que os riscos são inerentes às características físico-químicas dos materiais e aos processos operacionais típicos, como moagem, transporte, secagem e armazenagem em silos.

A plataforma Dust Safety Science, que compila e analisa ocorrências globais mais recentes, reforça esse padrão. Entre 2018 e 2023, os setores com

maior número de explosões reportadas foram o agrícola e de alimentos, além do de madeira e produtos de madeira (Cloney, 2022, 2023 e 2024).

No relatório anual de 2023 (Cloney, 2024), a DSS aponta que a indústria alimentícia e agrícola continua sendo a mais afetada globalmente, tanto em número de eventos, como pode ser visto na Figura 6, quanto em vítimas, tendo 62% dos feridos e 22% dos óbitos no período. Esse resultado é atribuído à combinação entre armazenamento em silos, presença de poeiras orgânicas com baixa energia mínima de ignição e ventilação insuficiente, condições propícias para a formação de atmosferas explosivas.

Figura 6 - Distribuição global das explosões de poeira por setor industrial no ano de 2023.



Fonte: Cloney (2024)

A identificação da natureza do setor afetado, no contexto da atividade pericial, é um elemento-chave para orientar a análise dos processos críticos, a determinação das fontes de ignição mais prováveis e a verificação da conformidade com normas técnicas específicas. Esses dados reforçam a necessidade de atenção especial às práticas de prevenção e à aplicação rigorosa de normas técnicas nesses segmentos, especialmente em estados como Santa Catarina, cuja economia é fortemente vinculada à agroindústria e ao processamento de madeira. Nesse sentido, destaca-se a NFPA 61 (2020), norma que trata da prevenção de incêndios e explosões em instalações da agroindústria, prevendo requisitos estruturais, operacionais e de segurança específicos para silos, transportadores e sistemas de processamento de grãos e farelos. Em Santa Catarina, a IN nº 034 do CBMSC (CBMSC, 2024) prevê dispositivos como sistemas de alívio, supressão e isolamento de explosões (Art. 27), bem como controle de poeiras e ventilação forçada em locais confinados (Art. 28 e 30).

2.2.3. Fontes de ignição por setor industrial

A compreensão das fontes de ignição predominantes em cada setor é fundamental tanto para fins de prevenção quanto para a atividade pericial posterior ao evento. Como destacado na NFPA 921 (2021, p. 270), a identificação da fonte de ignição deve considerar a simultaneidade entre combustível e fonte, a energia disponível, a proximidade espacial e as condições do ambiente no momento do evento.

No setor alimentício, o risco é intensificado pela presença constante de poeiras orgânicas altamente combustíveis como amido, farinha, leite em pó e açúcar geralmente em suspensão fina. As principais fontes de ignição incluem atrito mecânico em transportadores, falhas em sistemas de exaustão, superaquecimento de motores e brasas originadas em processos térmicos, como secagem ou torrefação. A literatura técnica identifica as chamadas “faíscas de fricção” como um

dos mecanismos mais recorrentes nesse ambiente, embora sua efetividade como agente iniciador de explosões tenha sido objeto de debate por décadas. Como observa Eckhoff (2003, p. 419), embora existam dúvidas quanto à energia efetiva dessas faíscas, “o fator fricção torna-se o mais suspeito entre todas as potenciais fontes de ignição” quando se considera também que grande parte das causas desconhecidas pode estar associada a fontes não rastreáveis, como faíscas metálicas ou descargas eletrostáticas.

Um levantamento conduzido por Pedersen e Eckhoff (1987, apud Eckhoff, 2003) revelou que, para uma série de investigações, a soma de eventos atribuídos diretamente a faíscas de fricção e a causas desconhecidas representou entre 66% e 72% das explosões na indústria de grãos, rações e alimentos. A recorrência dessas fontes sejam elas confirmadas ou apenas presumidas ressalta a necessidade de adoção de medidas preventivas abrangentes, com foco não apenas em supressão ativa e controle de ignição, mas também em diagnóstico prévio de zonas de risco e manutenção rigorosa de sistemas mecânicos em operação contínua.

Tabela 5 - Percentual de explosões de poeira na indústria de grãos, alimentos e rações cuja ignição se deu por faíscas de fricção ou por causas desconhecidas.

Investigação	Período	Explosões	Ignições % (Faíscas por fricção)	Ignições % (Causa desconhecida)	% (Faíscas por fricção + causa desconhecida)
1	1860-1973	535	20	46	66
1	1949-1973	128	17	27	44
2	1941-1945	91	54	18	72
3	1958-1975	137	9	62	71
4	1965-1980	83	28	5	30-35

Fonte: Pedersen e Eckhoff (1987, apud Eckhoff, 2003)

Já na indústria madeireira, uma das fontes de ignição mais relevantes são as partículas incandescentes geradas por atrito, impacto ou corte de

materiais. Enfatiza-se a necessidade de medidas específicas de proteção, como filtros de manga antifaísca, detectores de centelha e sistemas automáticos de supressão, especialmente em dutos de transporte pneumático de serragem e cavacos. Além disso, Eckhoff (2003, p. 135), com base em investigações conduzidas por Arvidsson, Back e Östman (1977), alerta para o risco associado ao processo de secagem de cavacos de madeira, o qual, se mal conduzido, pode gerar atmosferas explosivas. Para mitigar esse risco, os autores recomendam o controle contínuo da concentração de oxigênio no gás de secagem, mantendo-a o mais baixa possível, a fim de reduzir a probabilidade de ignição espontânea ou acidental.

A indústria química e de plásticos, por sua vez, apresenta risco elevado de ignição por descargas eletrostáticas, especialmente em misturadores e sistemas de transporte pneumático. Eckhoff (2003, p. 24) destaca que, entre os eventos analisados, as descargas eletrostáticas foram a principal fonte de ignição em plantas de mistura, ocorrendo quase exclusivamente com poeiras plásticas, o que sugere forte correlação entre o tipo de material e a frequência de ignição eletrostática.

Dados compilados por Jeske e Beck (1989), analisados por Eckhoff (2003), revelam que as fontes de ignição predominantes variam conforme o tipo de instalação e conforme a natureza do material particulado. Entre os 426 eventos catalogados na Alemanha entre 1965 e 1985, as faíscas mecânicas foram identificadas como causa predominante em moinhos, britadores e sistemas de moagem. Já os ninhos de combustão (smoldering nests) — pequenos focos de ignição oculta em depósitos de poeira ou em materiais parcialmente carbonizados foram associados principalmente a explosões em silos, secadores e bunkers.

Tabela 6 - Percentual de explosões de poeira na Alemanha Ocidental entre 1965 e 1985: relação percentual entre fontes de ignição e instalações industriais.

Fonte de ignição	426 explosões (%)	Silos e depósitos	Coletadores e separadores de poeira	Moinhos e instalações de britagem	Sistemas de transporte	Secadores	Instalações de moagem	Peneiras e classificadores
Faíscas mecânicas	26,2	16,3	41,1	60,0	25,6	0,0	89,5	16,7
Ninhos de combustão	11,3	27,9	11,0	0,0	2,3	29,4	0,0	8,3
Aquecimento mecânico e fricção	9,0	3,5	6,8	12,7	25,6	2,9	5,3	0,0
Descarga eletrostática	8,7	2,3	9,6	5,5	18,6	5,9	0,0	16,7
Fogo	7,8	4,7	4,1	2,0	0,0	0,0	0,0	16,7
Ignição espontânea	4,9	2,3	2,7	0,0	4,7	14,7	0,0	8,3
Superfícies quentes	4,9	11,6	0,0	3,6	2,3	23,5	0,0	0,0
Soldagem e corte	4,9	5,8	2,0	0,0	4,7	2,9	0,0	0,0
Equipamento elétrico	2,8	2,3	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Desconhecidas e outras	19,5	23,3	20,7	16,2	16,2	20,7	5,2	33,3
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: Jeske e Beck (1989, apud Eckhoff, 2003)

3 ANÁLISE E DISCUSSÃO

A seção anterior apresentou um levantamento sistematizado das condições típicas de ocorrência de explosões de poeira, dos setores industriais mais afetados e das fontes de ignição mais frequentemente envolvidas nesse tipo de evento. A partir deste ponto, busca-se interpretar os dados e os conceitos expostos sob a ótica pericial, com ênfase na aplicabilidade prática das informações analisadas para a atividade investigativa em campo.

O foco recai, portanto, sobre as implicações técnicas da identificação da fonte de ignição, a relação entre o setor produtivo e os padrões de ignição observados, e os desafios encontrados pelo perito na análise de ocorrências em ambientes com poeiras combustíveis.

3.1 A IMPORTÂNCIA DA IDENTIFICAÇÃO DA FONTE DE IGNIÇÃO NA PERÍCIA

No contexto da perícia em incêndios e explosões, a determinação da fonte de ignição desempenha papel central na reconstrução dos eventos, no estabelecimento de nexos causais, e, por consequência, na atribuição de responsabilidade técnica, operacional ou penal. A NFPA 921 (2021) reconhece que esta é frequentemente “a parte mais difícil da investigação”, sobretudo quando múltiplas fontes competentes estão presentes no cenário e os vestígios de ignição direta são destruídos ou inconclusivos.

O capítulo 22.17 da referida norma orienta que, uma vez identificados o combustível e a zona de origem, o investigador deve realizar uma análise minuciosa de cada possível fonte de ignição. Essa avaliação deve considerar: a energia mínima de ignição do combustível, a energia fornecida pela possível fonte, sua localização relativa ao combustível, a temperatura envolvida, e a coexistência temporal dos elementos no momento da deflagração, além de relatos testemunhais sobre as condições e ações imediatamente anteriores ao evento.

De forma alinhada, DeHaan e Icove (2012, p. 522) reforçam que o valor técnico da perícia está diretamente ligado à capacidade do perito de interpretar indícios materiais e padrões de dano à luz da física envolvida na ignição e propagação da explosão. Os autores destacam que “o cenário deve ser reconstruído: o que estava presente? Qual foi o iniciador? Como ocorreu?”, apontando que a identificação da fonte de ignição faz parte de um processo lógico que exige a análise do local, dos fragmentos e dos padrões de danos. A

ausência de uma fonte visível não exclui a necessidade da investigação, pelo contrário, impõe a aplicação metódica do método científico, com geração de hipóteses, teste por exclusão e busca por coerência entre cenário e comportamento esperado do fenômeno explosivo.

No caso específico das explosões por poeiras combustíveis, Eckhoff (2003, p. 420) alerta que a fonte de ignição, por vezes, permanece desconhecida, o que não elimina sua existência, mas reforça a probabilidade de envolvimento de mecanismos menos perceptíveis, como faíscas de fricção ou descargas eletrostáticas. O autor sugere que parte das causas classificadas como “desconhecidas” pode ter sido iniciada por fontes não rastreáveis, o que torna a faísca de fricção uma das mais suspeitas entre todas as potenciais fontes de ignição.

Dessa forma, a análise da fonte de ignição se consolida como elemento estruturante da conclusão pericial. Ela não apenas confere tecnicidade e legitimidade à investigação, mas também permite inferências relevantes sobre negligência operacional, falhas normativas, comportamento dos materiais e medidas preventivas ausentes ou mal dimensionadas. Em ambientes de risco como silos, secadores, transportadores e moegas, essa abordagem é ainda mais essencial, pois a multiplicidade de potenciais fontes exige do perito conhecimento técnico especializado, raciocínio dedutivo apurado e familiaridade com os padrões típicos de ignição por setor.

3.2 RELAÇÃO ENTRE O SETOR INDUSTRIAL E A FONTE DE IGNIÇÃO

A análise estatística realizada neste trabalho revela que determinados setores industriais apresentam perfis mais recorrentes de fontes de ignição, possivelmente influenciados pelas características dos processos, dos materiais particulados manipulados e das condições operacionais envolvidas. A associação entre o tipo de atividade produtiva e os mecanismos predominantes

de ignição pode auxiliar a investigação pericial na busca por evidências e na condução de interrogatórios desde que se evite a adoção de hipóteses direcionadas por viés de confirmação. Além disso, tais dados reforçam a importância de abordagens preventivas específicas por segmento.

No setor alimentício, por exemplo, há predomínio de poeiras orgânicas altamente reativas e de granulometria fina, em ambientes onde processos térmicos (como torrefação e secagem), sistemas de transporte mecânico e exaustão estão amplamente presentes. Os dados de Pedersen e Eckhoff (1987), bem como os levantamentos estatísticos mais recentes da DSS (Cloney, 2023), demonstram que faíscas de fricção, brasas e causas indeterminadas correspondem a grande parte dos eventos nesse setor. Essa constatação implica que o perito deve considerar com prioridade fontes de ignição mecânicas e térmicas pouco perceptíveis, mesmo na ausência de vestígios diretos.

Na indústria madeireira, por sua vez, é comum a presença de partículas incandescentes aspiradas por dutos, geradas por atrito, impacto ou falhas em sistemas de corte e moagem. A NFPA 654 (2020, Anexo C) recomenda a utilização de sistemas de detecção e extinção de faíscas, sobretudo em linhas de transporte pneumático, o que constitui uma medida preventiva eficaz frente a esta ameaça própria do setor. Quando a explosão ocorre em unidades de secagem, uma hipótese plausível de ignição é a presença de fragmentos de madeira incandescentes ou de combustão lenta (smoldering) em cavacos acumulados como descrito por Drossel (apud Eckhoff, 2003, p. 135). Para mitigar este risco, Arvidsson, Back e Östman (apud Eckhoff, 2003, p. 135–136) recomendam o controle contínuo da concentração de oxigênio no gás de secagem.

Já na indústria de plásticos e pigmentos, os riscos concentram-se na geração de cargas eletrostáticas, favorecida por poeiras com baixa condutividade elétrica, especialmente em misturadores.

Descargas eletrostáticas eram a principal fonte de ignição em usinas de mistura, mas..., a ignição por descarga eletrostática ocorria quase exclusivamente com pós plásticos. Presumivelmente, misturadores são bastante frequentes em usinas que produzem e manuseiam pós plásticos, e a combinação de misturadores e pós plásticos é favorável à geração de descargas eletrostáticas.(Eckhoff, 2003).

Isso confere ao perito um indicativo técnico relevante: a presença desse tipo de instalação em ambiente de explosão com poeiras plásticas exige atenção especial à existência de medidas de aterramento e sistemas de controle eletrostático na planta.

Esse padrão se repete em outros setores. As estatísticas de Jeske e Beck (1989), por exemplo, revelam que moinhos, britadores e plantas de moagem têm como causa predominante as faíscas mecânicas, enquanto silos e secadores estão frequentemente associados a ninhos de combustão oculta. Esses dados, quando analisados em conjunto com a natureza do processo produtivo, os registros de manutenção e as entrevistas com testemunhas permitem que o perito formule hipóteses iniciais com maior direcionamento técnico, otimizando a busca por evidências e priorizando hipóteses mais prováveis.

Dessa forma, no caso das explosões por poeira, a relação entre setor e a fonte de ignição deve ser incorporada ao raciocínio investigativo pericial desde o início da análise. Mais do que um dado estatístico, ela representa uma ferramenta orientadora, capaz de estreitar o foco da investigação, subsidiar decisões técnicas durante a perícia e, eventualmente, colaborar com a identificação de falhas operacionais recorrentes que podem ser corrigidas por ações preventivas.

3.3 CONSIDERAÇÕES TÉCNICO-PERÍCIAIS COM BASE NOS ACHADOS ESTATÍSTICOS

A análise estatística consolidada neste trabalho não tem por objetivo definir, de forma determinística, as causas de explosões por poeira em ambientes industriais. Seu valor pericial está, sobretudo, em orientar o raciocínio técnico do investigador, oferecendo subsídios empíricos que ajudam a formular hipóteses iniciais mais plausíveis - que depois devem ser testados à luz das evidências físicas, dos padrões de dano e das condições operacionais do local - e a estruturar, de maneira lógica, a busca por evidências em campo.

O levantamento histórico de Eckhoff (2003), os relatórios do U.S. Chemical Safety Board (2006) e os dados mais recentes da Dust Safety Science (Cloney, 2023) demonstram que determinados setores apresentam padrões recorrentes de ignição. Por exemplo, na indústria alimentícia, há prevalência de explosões associadas a faíscas de fricção e ignições espontâneas por acúmulo de calor em processos térmicos. Já na indústria de plásticos, predomina a ignição por descarga eletrostática. Esses padrões, longe de serem verdades absolutas, podem servir como guia inicial para a investigação, especialmente quando o local apresenta múltiplas fontes potenciais de ignição e vestígios degradados.

A identificação do setor produtivo e a análise dos processos em operação no momento da explosão passam, assim, a ser elementos-chave na formulação de hipóteses. Um perito que reconhece, por exemplo, que uma explosão ocorreu em uma unidade de moagem de grãos, pode dar prioridade à análise de equipamentos sujeitos a atrito mecânico, exaustores e transportadores. Por outro lado, se a ocorrência foi registrada em uma planta de mistura de PVC ou pigmentos, a atenção deve recair sobre os pontos de atrito eletrostático, aterramento e compatibilidade dos materiais com os processos de condução.

Além disso, o conhecimento sobre a frequência de fontes desconhecidas ou indeterminadas, como evidenciado nas estatísticas de Pedersen & Eckhoff (1987) e na própria NFPA 921 (2021), reforça a importância de o perito manter uma postura metodológica rigorosa, baseada em exclusão sistemática, e nunca abandonar a investigação pela ausência de vestígios visíveis. Nessas situações, a estatística auxilia não apenas na inferência da causa mais provável, mas também na identificação de falhas normativas ou operacionais recorrentes como a ausência de sensores, falhas de exaustão ou acúmulo excessivo de poeira.

A interpretação dos dados estatísticos permite ao perito sair do campo do subjetivismo técnico, ancorando suas conclusões em padrões documentados de comportamento explosivo. A triangulação entre estatística setorial, análise de processo e leitura dos vestígios fortalece a qualidade dos laudos, confere maior confiabilidade às análises e, eventualmente, contribui para a melhoria dos dispositivos normativos e operacionais que regem a segurança em ambientes com poeiras combustíveis.

Por fim, a criação de uma base nacional consolidada de dados periciais sobre explosões por poeira representaria um avanço estratégico na capacidade preditiva e comparativa das investigações brasileiras, oferecendo insumos valiosos para a evolução das boas práticas e da própria normativa técnica.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As explosões por poeiras combustíveis, ainda que extensivamente estudadas sob o viés físico-químico e normativo, continuam representando um desafio significativo para a prevenção e para investigação técnica. A recorrência de eventos em setores como o alimentício, madeireiro e químico, associada à persistência de causas classificadas como “desconhecidas”,

evidenciam as dificuldades das abordagens periciais nestes cenários. A análise estatística amplia a busca pela verdade para além da mera observação empírica da cena, abrangendo, a partir dela, o uso de dados consolidados.

Este trabalho demonstrou que a correlação entre setor industrial e perfil de ignição pode ser utilizada como ferramenta complementar para a perícia em incêndios e explosões, oferecendo subsídios importantes para a formulação de hipóteses técnicas, para a definição de focos investigativos e para a avaliação da plausibilidade causal. Ao integrar informações históricas, estatísticas contemporâneas e referências normativas, foi possível construir um panorama técnico aplicável à atividade fim dos peritos atuantes em ocorrências de explosões por poeiras combustíveis.

Do ponto de vista institucional, reforça-se a necessidade de que os Corpos de Bombeiros, em especial aqueles com responsabilidade pericial, invistam na formação continuada de seus quadros e valorizem o estudo no fenômeno das explosões por poeiras, visto o grande impacto humano e financeiro que tais ocorrências têm o potencial de ter. Além disso, reforça-se a necessidade da estruturação de uma base de dados integrada no contexto brasileiro, que permita o monitoramento e a retroalimentação de ocorrências. A valorização da estatística pericial como instrumento de gestão do risco e de suporte à análise técnica pode contribuir tanto para a qualificação dos laudos produzidos, quanto para o aperfeiçoamento das estratégias preventivas adotadas nos projetos e nas fiscalizações preventivas.

Como continuidade a este estudo, recomenda-se o desenvolvimento de bancos de dados nacionais integrados e o aprofundamento do estudo sobre as medidas preventivas contra explosões de poeiras por setor produtivo, a fim de dar maior embasamento e especificidade às normativas que regem o tema. Avançar na consolidação de um conhecimento aplicado, sensível às variáveis brasileiras, é um passo essencial para que a perícia em incêndios e explosões

no país se mantenha tecnicamente atualizada, institucionalmente respeitada e socialmente relevante.

REFERÊNCIAS

ACIKGÖZ, Y. **Combustible Dust Explosion Hazards and Safety: An Interdisciplinary Engineering Approach**. Cham: Springer Nature, 2024.

BABRAUSKAS, V. **Ignition Handbook**. 2. ed. Fire Science Publishers, 2014.

CBMSC. **Instrução Normativa Nr 34, de 24 de abril de 2024**. Florianópolis, 2024. Disponível em:
<https://documentoscbmsc.cbm.sc.gov.br/uploads/5df07f30c638e38027f19a7a75b3f7a4.pdf>

CLONEY, C. **Dust Safety Science 2023 Combustible Dust Incident Report**. Nova Scotia: Dust Safety Science, 2024.

CLONEY, C. **Dust Safety Science 2022 Combustible Dust Incident Report**. Nova Scotia: Dust Safety Science, 2023.

CLONEY, C. **Dust Safety Science 2021 Combustible Dust Incident Report**. Nova Scotia: Dust Safety Science, 2022.

DEHAAN, J. D.; ICOVE, D. J. **Kirk's Fire Investigation**. 7. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2012.

ECKHOFF, R. K. **Dust Explosions in the Process Industries**. 3. ed. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2003.

JESKE, H.; BECK, H. **Explosionen durch brennbare Stäube – Ursachen und Verhütung. Staub – Reinhaltung der Luft**, v. 49, n. 5, p. 194–198, 1989. Apud: ECKHOFF, Rolf K. **Dust Explosions in the Process Industries**. 3. ed. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2003.

NFPA. **NFPA 61: Standard for the Prevention of Fires and Dust Explosions in Agricultural and Food Processing Facilities**. Quincy: National Fire Protection Association, 2020.

NFPA. **NFPA 652: Standard on the Fundamentals of Combustible Dust**. Quincy: National Fire Protection Association, 2019.

NFPA. NFPA 654: Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids. Quincy: National Fire Protection Association, 2020.

NFPA. NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations. Quincy: National Fire Protection Association, 2021.

NFPA. Report of Important Dust Explosions. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 1957.

PEDERSEN, H. N.; ECKHOFF, R. K. Apud: ECKHOFF, R. K. **Dust Explosions in the Process Industries.** 3. ed. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2003.

SILVA, W. C. L. **Blast – Efeitos da Onda de Choque no Ser Humano e nas Estruturas.** Tese de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2007.

U.S. CHEMICAL SAFETY AND HAZARD INVESTIGATION BOARD.
Investigation Report - Combustible Dust Hazards in Industry. Report No. 2006-H-1, 2006. Disponível em:
https://www.csb.gov/assets/1/20/dust_final_report.pdf. Acesso em: 19 abr. 2025.