



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

**EXPLOÇÃO EM SILOS VERTICAIS SEGUNDO AS NORMAS - NFPA
68:2023, EN 14491:2012 E NBR 16385:2015**

Leonardo Andreu da Costa

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E
SUSTENTABILIDADE

EXPLOSÃO EM SILOS VERTICAIS SEGUNDO AS NORMAS: NFPA
68:2023, EN 14491:2012 E NBR 16385:2015

LEONARDO ANDREU DA COSTA

Trabalho de Conclusão de Curso do Mestrado Profissional apresentada à Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. ANDRÉS BATISTA CHEUNG

Campo Grande – MS

DEZEMBRO/2025

RESUMO

O crescimento da produção agrícola brasileira, evidenciado por dados da CONAB (2025) e do IBGE (2025) tem intensificado o uso de silos verticais para armazenagem de grãos e, consequentemente, a ocorrência de explosões por poeiras combustíveis, sobretudo em unidades com milho e soja. Este trabalho analisa o dimensionamento da área de ventilação para alívio e atenuação da pressão de explosão em silos verticais, conforme as normas NFPA 68:2023, EN 14491:2012 e NBR 16385:2015, e apresenta o desenvolvimento do software V-Calc, implementado em linguagem C# para cálculo de área de alívio de pressão segundo cada metodologia. Foram avaliados silos de diferentes relações H/D e variação de P_{red} . Os resultados indicam que a NFPA 68:2023 mantém áreas constantes para $H/D \leq 2,0$, enquanto a EN 14491:2012 fornece valores superiores em todos os casos, em função do limite mínimo de $P_{stat} \geq 0,1 \text{ bar}$, caracterizando um comportamento mais conservador. O V-Calc mostrou-se eficaz na análise e dimensionamento de sistemas de alívio de pressão, contribuindo para projetos mais seguros e resilientes, em consonância com os objetivos de desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Deflagração, Ventilação, Poeira combustível.

ABSTRACT

The growth of Brazilian agricultural production, as shown by data from CONAB (2025) and IBGE (2025), has increased the use of vertical silos for grain storage and, consequently, the occurrence of explosions caused by combustible dust, especially in corn and soybean facilities. This study analyzes the sizing of the vent area for explosion pressure relief and mitigation in vertical silos, in accordance with standards NFPA 68:2023, EN 14491:2012 and NBR 16385:2015, and presents the development of the V-Calc software, created in C# for calculating the relief area according to each methodology. Silos with different H/D ratios and variations of P_{red} were evaluated. The results showed that NFPA 68:2023 maintains constant areas for $H/D \leq 2.0$, whereas EN 14491:2012 yields higher values in all cases due to the minimum limit of $P_{stat} \geq 0,1 \text{ bar}$, evidencing a more conservative approach. The V-Calc software proved effective for the analysis and design of pressure relief systems, contributing to safer, more resilient, and sustainable projects, in line with the Sustainable Development Goals.

Keywords: Deflagration, Ventilation, Combustible Dust.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Silos para o armazenamento de grãos do Castelo dos Mouros em Portugal.....	11
Figura 2 – Capacidade de armazenamento estático em relação à produção de grãos nos estados brasileiros (%). Valores acima de 100% representam maior capacidade de armazenagem em relação ao volume de produzido, enquanto valores abaixo de 100% indicam menor capacidade de armazenagem em relação ao volume produção.	12
Figura 3 – Mapa de calor de ocorrências de incêndios em unidades armazenadoras.....	16
Figura 4 – Comparação entre a detonação e deflagração.	21
Figura 5 – Os componentes de uma explosão de pó: Pentágono de explosão.....	21
Figura 6 - Etapas do processo de explosão de poeira: (a) dispersão de uma camada de poeira depositada em decorrência da onda de choque gerada pela explosão primária; (b) suspensão das partículas e sua subsequente ignição, resultando na ocorrência de uma explosão secundária associada ao fenômeno conhecido como fireball.	22
Figura 7 - Influência do teor de umidade do amido de milho em relação à taxa máxima de aumento de pressão – comparação para diferentes atrasos na ignição.....	24
Figura 8 - Esfera de 20L (a) e 1m ³ (b) para determinação de parâmetros de explosividade para pó-combustível.	26
Figura 9 - Comportamento da pressão interna do vaso ao longo do tempo com e sem alívio.	30
Figura 10 - Simulação controlada fenômeno fireball no laboratório Fire Corporation/Blue Springs.	30
Figura 11 - Curvas de pressão-tempo obtidas por simulação numérica com diferentes áreas de ventilação.	31
Figura 12 - Redução da sobre pressão de explosão em relação a área de ventilação	32
Figura 13 - Membrana metálica de ruptura para alívio de pressão.....	33
Figura 14 - Filtro de alívio de pressão.....	34
Figura 15 - Válvula de alívio de pressão VCP.	34
Figura 16 - Esquemas de painéis inerciais.....	35
Figura 17 - Sistema de painel de massa articulado.....	36
Figura 18 – Painel de massa ancorado à estrutura por meio de pinos.	36
Figura 19 - Painéis de massa articulado utilizados em silos de concreto no Porto de Santos-SP.	37
Figura 20 - Fluxograma geral para seleção do método de dimensionamento de ventilação segundo a norma americana NFPA 68:2023	41
Figura 20 - Fluxograma do programa V-Calc para cálculo da área de ventilação conforme NFPA 68 e EN 14491.	52
Figura 21 - Interface principal do Software V-Calc. para cálculo de área de ventilação conforme as metodologias das normas NFPA68 e EN 14491.	55
Figura 22 – Preenchimento mínimo no software para utilização da metodologia americana norma NFPA	

68:2023.....	56
Figura 23 - Preenchimento mínimo no software para utilização da metodologia europeia EN 14491:2012	57
Figura 24 - Calculo de área de alívio de pressão NFPA 68 utilizando o método da eq.(8).....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Quantidade de unidades armazenadoras conforme dados da IBGE, 2º semestre de 2024 no território nacional e capacidade estática (t).	12
Tabela 2 - Ocorrências de explosões registradas durante o período de 1911 a 2004, nas quais a letra “d” indica o número de mortes e a letra “i” indica o número de feridos em cada evento.	13
Tabela 3 - Temperatura mínima de ignição.	25
Tabela 4 - Zona de periculosidade para pós combustíveis.	27
Tabela 5 - Valores de explosividade de produtos agrícolas segunda a norma americana NFPA 68:2023.	27
Tabela 6 - Exemplos de poeiras combustíveis (laboratório DEKRA).	28
Tabela 7 - Limites para as equações fornecidas pelas normas.	29
Tabela 8 - Classificação de deflagração de produtos agrícolas.	50
Tabela 9 - Características geométricas dos silos conforme a relação HD e parâmetros de explosividade do milho, trigo e farelo de soja.	53
Tabela 10 - Resultados para área de alívio de pressão conforme metodologia das normas NFPA 68 e EN 14491, para os produtos: Milho, Trigo e Farelo de soja.	58
Tabela 11 - Valores de área de ventilação conforme metodologia das normas NFPA 68:2023 e EN 14491:2012 variando o valor de Pred	62
Tabela 12 - Verificação e comparação das áreas de ventilação calculadas pelo autor e por Tascon (2009), segundo as normas NFPA 68 e EN 14491 versus com os valores obtidos pelo software V-Calc., com análise da diferença percentual para avaliação da confiabilidade dos resultados.	65
Tabela 13 - Parâmetros adotados para a hipótese de cálculo variando a porcentagem de material levantado em pó fd.	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Registros de incêndios ao longo de 2005 a 2017 no estado do Paraná.	16
Gráfico 2 – Influência do tipo de produto nas ocorrências de incêndios e explosões.	17
Gráfico 3 – Resultados de área de alívio de pressão (m^2) utilizando o programa V-Calc., comparação entre NFPA e EN 14491, para os seguintes produtos: Milho, Trigo e Farelo de soja.	57
Gráfico 4 - Valores de área de ventilação conforme metodologia das normas NFPA 68:2023 e EN 14491:2012 variando o valor de P_{red}	62
Gráfico 5 - Área de ventilação (m^2) em função da relação H/D para diferentes valores de P_{red} , conforme NFPA 68:2023.	64
Gráfico 6 - Área de ventilação (m^2) em função da relação H/D para diferentes valores de P_{red} , conforme EN 14491:2012.	64
Gráfico 7 - Volume mínimo necessário (m^3) em função da porcentagem de material levantado em pó (f_a), conforme hipótese adotada nos testes paramétricos.	67

Sumário

RESUMO	3
ABSTRACT.....	4
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABELAS	7
LISTA DE GRÁFICOS	8
1. INTRODUÇÃO	11
1.1. <i>JUSTIFICATIVA</i>	<i>18</i>
2. OBJETIVOS.....	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1. <i>Deflagração e detonação</i>	<i>20</i>
3.2. <i>Classificações de grãos mais suscetíveis a explosão e a constante Kst.....</i>	<i>25</i>
3.3. <i>Limites mínimos e máximos estabelecidos pelas normas NFPA68 e EN 14491</i>	<i>28</i>
3.4. <i>Influência dos dispositivos de alívio de pressão.....</i>	<i>29</i>
3.5. <i>Sistemas de alívio de explosão</i>	<i>32</i>
3.6. <i>Normas nacionais e internacionais</i>	<i>38</i>
3.6.1. NFPA 68:2023.....	38
3.2.2. EN 14491:2012	44
3.2.3. NBR 16385:2015.....	48
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
4.1. <i>Produtos e Geometrias.....</i>	<i>51</i>
4.2. <i>Desenvolvimento do Software</i>	<i>51</i>
4.2.1. Detalhamento dos Requisitos:	51

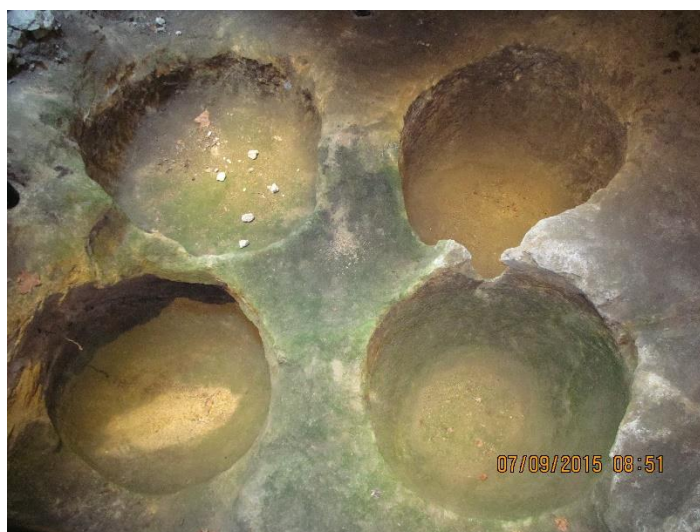
4.2.2. Modelagem da estrutura do Software.....	51
4.2.3. Implementação e Desenvolvimento	51
4.2.4. Testes e Validações	52
4.3. <i>Proposta de uma metodologia para avaliação do volume máximo</i>	53
5. RESULTADOS.....	55
5.1. <i>Programa desenvolvido V-CALC</i>	55
5.2. <i>Validação dos resultados e comparação para diferentes produtos e geometria de silos</i>	57
5.3. <i>Análise Comparativa e Verificação Computacional</i>	63
5.4. <i>Avaliação da proposta de uma metodologia para avaliação do volume mínimo</i>	65
6. CONCLUSÕES	68
7. REFERÊNCIAS	69

1. INTRODUÇÃO

Um dos primeiros indícios significativos da evolução na sociedade humana ocorreu quando o *Homo sapiens* realizou a transição da vida nômade de caça e coleta para uma vida fundamentada na agricultura, principalmente por volta do período Neolítico. Com o avanço das técnicas agrícolas, tornou-se necessário armazenar os alimentos cuja produção ultrapassava as necessidades de consumo Diamond, (1997).

Essa etapa levou ao surgimento de estruturas de armazenamento, como silos enterrados, conforme Figura 1, com o objetivo de conservar grãos e outros tipos de alimentos por longos períodos. Os primeiros silos descobertos desta época eram cavidades no solo, revestidos com materiais como argila, visando protegê-los de outros animais, pragas e intempéries.

Figura 1 - Silos para o armazenamento de grãos do Castelo dos Mouros em Portugal.



Fonte: Arquivo pessoal de Andrés Batista Cheung.

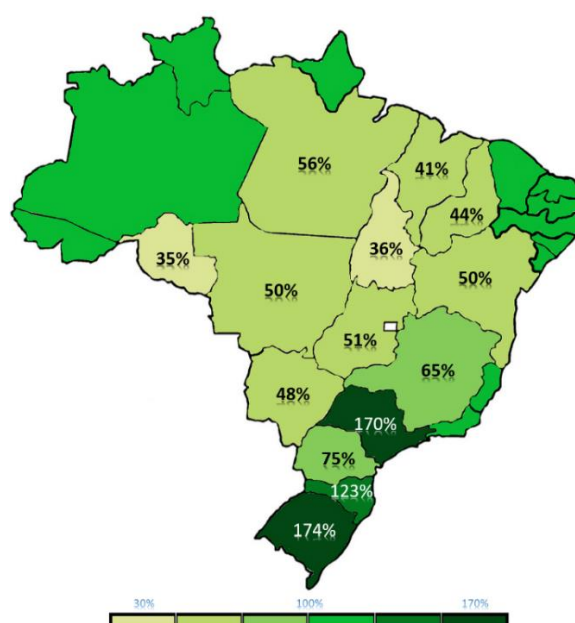
Esse avanço estabeleceu um marco na agricultura e no desenvolvimento das sociedades, permitindo maior administração dos recursos e a formação de comunidades mais complexas.

A viabilidade econômica em relação à mão de obra versus espaço físico e transporte explica a grande demanda das cooperativas, que a cada ano precisam estocar maiores quantidades de produto em espaços menores. De acordo com o 7º Levantamento da safra de grãos 2024/25 divulgado em 10 de abril de 2025, a Companhia Nacional de Abastecimento Conab (2025) Clique ou toque aqui para inserir o texto.vem confirmando a perspectiva de uma safra recorde de grãos, agora estimada em 330,3 milhões de ton. Nesta safra, a Conab prevê uma produção de 167,9 milhões de toneladas de soja, resultado 20,1 milhões de toneladas superior à safra passada, consolidando o cenário previsto para o Brasil participar com mais de 40% da produção mundial de soja.

Sendo assim, no Brasil, onde há uma demanda crescente a cada ano nesses sistemas de armazenamento, é de suma importância o conhecimento de todas as variáveis e ações que atuam sobre eles, de modo a produzir silos com segurança, eficiência e economia.

Conforme a Figura 2, é possível identificar a densidade das unidades armazenadoras no território nacional e a capacidade de produção, com um total de 9.511 estabelecimentos ativos no 2º semestre de 2024 IBGE (2024), evidenciando a consolidação da região Sul do Brasil com a maior capacidade de armazenamento.

Figura 2 – Capacidade de armazenamento estático em relação à produção de grãos nos estados brasileiros (%). Valores acima de 100% representam maior capacidade de armazenagem em relação ao volume de produzido, enquanto valores abaixo de 100% indicam menor capacidade de armazenagem em relação ao volume produção.



Fonte: Adaptado IBGE, 2º semestre (2024).

A Tabela 1 apresenta a quantidade de unidades armazenadoras em todo o território nacional, destacando, conforme Figura 2, a significativa capacidade de armazenamento da região Sul. No entanto, a região Centro-Oeste se destaca como a maior produtora, responsável por mais de 40% do total, mas possui menos unidades armazenadoras em relação à região Sul, evidenciando uma dificuldade quanto ao tempo de armazenamento.

Tabela 1- Quantidade de unidades armazenadoras conforme dados da IBGE, 2º semestre de 2024 no território nacional e capacidade estática (t).

Região	Quantidade de unidades armazenadoras	capacidade de armazenamento (t)
Sul	4.170	80.224.636
Centro-Oeste	3.064	97.316.380
Sudeste	1.215	23.868.924
Nordeste	527	14.246.341
Norte	535	11.411.628
Total	9.511	227.067.909

Um aspecto fundamental na avaliação da segurança das instalações de armazenamento é a análise dos riscos associados à possibilidade de explosões e incêndios provocados pela presença de poeira em suspensão. Para que a poeira seja considerada explosiva, ela deve atender a alguns critérios, como o tamanho médio das partículas que, segundo a norma americana, deve ser em torno de 420 µm e a concentração mínima necessária no ar para que ocorra a ignição, conhecida como MEC (*Minimum Explosible Concentration*), expressa em g/m³. Este parâmetro depende diretamente da composição química do produto, da sua granulometria e da concentração de material pulverulento em suspensão no ambiente.

A poeira gerada durante a movimentação, processamento ou armazenagem de produtos pode, assim, formar misturas inflamáveis no ar, representando um perigo significativo, especialmente em um ambiente confinado¹. Para mitigar esses riscos, é essencial implementar medidas como sistemas de ventilação adequados, monitoramento contínuo da concentração de partículas em suspensão e procedimentos de limpeza que reduzam esta concentração.

Neste contexto, Vijayaraghavan (2004) realizou um levantamento detalhado dos registros de explosões com poeiras em suspensão. Podendo ser observado um total de 159 acidentes registrados entre 1979 e 1988, dos quais 36 resultaram em funcionários feridos e 123 não apresentaram lesões. Adicionalmente, Abbasi e Abbasi (2007) apresentaram um estudo abrangente, contendo dados do período de 1911 a 2004, documentando diversos acidentes relacionados a partículas em suspensão conforme exibido na Tabela 2.

Tabela 2 - Ocorrências de explosões registradas durante o período de 1911 a 2004, nas quais a letra “d” indica o número de mortes e a letra “i” indica o número de feridos em cada evento.

(continua)

Ano	Localização	Material	Mortos/feridos
1911	Glasgow, UK	—	5d/8i
1911	Liverpool, UK	—	37d/100i
1911	Manchester, UK	—	3d/5i
1913	Manchester, UK	—	3d/5i
1916	Duluth, MN	Grão	—
1919	Cedar Rapids, IA	Amido de milho	43d
1924	Peking, IL	Amido de milho	42d
1924	USA	Poeira de sulfeto	1d/6i
1924	USA	Poeira de sulfeto	1d/1i
1924	USA	Poeira de sulfeto	2d/1i
1926	USA	Poeira de sulfeto	3d/1i

¹ Ambiente confinado é caracterizado como um espaço que não foi projetado para ocupação humana contínua.

1930	Liverpool, UK	Poeira de sulfeto	11d/32i
1944	Kansas City, KS	Poeira de grão	—

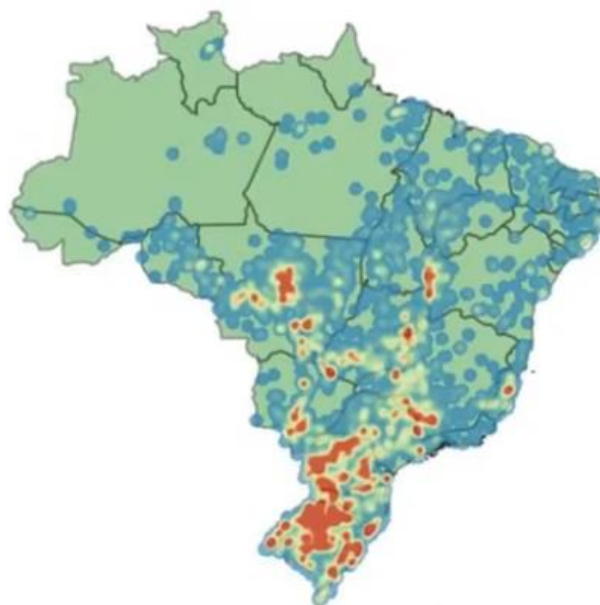
(continua)			
Ano	Localização	Material	Mortos/feridos
1950	Port Colborne, CA	Poeira de grão	—
1952	Bound Brook, NJ	Poeira de resina fenólica	5d/21i
1952	Saskatchewan	Poeira de grão	—
1955	Waynesboro, GA	Poeira de grão	3d/13i
1956	South Chicago	Poeira de grão	—
1958	Kansas City	Poeira de grão	—
1960	Canada	Poeira de sulfeto	2d
1964	Albern, Vienna	Poeira de grão	—
1964	St. Louis, MO	Poeira de grão	3d/13i
1964	Paisley, UK	—	2d/34i
1965	London, UK	Farinha	4d/37i
1969	Sweden	Poeira de sulfeto	2d/1i
1970	Kiel, FRG	Poeira de grão	6d/18i
1970	Germany	Poeira de grão	6d/171i
1970	Norway	Wheat grain dust	—
1971	New Orleans	Alqueire	—
1972	Norway	Silicone	5d/4i
1973	Norway	Alumínio	5d/2i
1974	Canada	Poeira de sulfeto	—
1974	Preska, South Africa	Poeira de sulfeto	—
1975	Norway	Farinha de peixe	1d/1i
1976	Norway	Poeira de cevada/aveia	—
1976	Oslo, Norway	Poeira de cevada maltada	—
1977	Galveston, TX	Poeira de grão	15d
1977	Westwego, Louisiana	Poeira de grão	36d/10i
1977	Lerida, Spain	Poeira de grão	7d
1979	Canada	Poeira de sulfeto	—
1980	Germany	Carvão	—
1980	Iowa, USA	Poeira de milho	—
1980	Minnesota, USA	Poeira de grão	13i
1980	Naples, Italy	Grain silo	—
1980	Ohama, NE, USA	Poeira de grão	—
1980	St. Joseph, MO, USA	Poeira de grão	14d/6i
1981	Canada	Poeira de sulfeto	—
1981	Corpus Christi, TX	Poeira de grão	9d/30i
1981	Bellwood, NE, USA	Poeira de grão	—
1981	Germany	Carvão	—

(conclusão)			
Ano	Localização	Material	Mortos/feridos
1982	British Columbia, Canada	Carvão	—
1983	Anglesey, UK	Alumínio	2i
1983	USA	Carvão	—
1985	Australia	Poeira de sulfeto	—
1985	Canada	Poeira de sulfeto	—
1985	Germany	Carvão	—
1985	Norway	Pelotas de farinha de canola	—
1985	Canada	Poeira de sulfeto	—
1986	Sweden	Poeira de sulfeto	—
1986	Canada	Poeira de sulfeto	—
1986	Australia	Poeira de sulfeto	—
1986	Canada	Poeira de sulfeto	—
1987	China	Poeira têxtil	58d/177i
1987	Oslo, Norway	Poeira de cevada maltada	—
1988	Norway	Wheat grain dust	—
1989	Sweden	Poeira de sulfeto	—
1989	Sweden	Farelo de trigo peletizado	—
1992	Japan	Peróxido de benzoíla	9d/17i
1994	Moriya, Japan	Clorato de potássio e poeira de alumínio	3d/58i
1994	Okahura, Japan	Resíduo de algodão	—
1994	Tokyo, Japan	Resíduo de borracha	5d/22i
1997	Japan	Poeira de tântalo	1d/1i
1997	Blaye, France	Grão	11d
1999	Japan	Liga de magnésio-alumínio	1d/1i
2003	Kentucky	Resina	7d
2003	Kinston, NC	Polietileno	6d/38i
2004	Avon, OH	Poeira de laca	—
TOTAL		390 óbitos e 836 feridos	

Fonte: Abbasi; S.A. Abbasi, (2007).

Além disso, conforme apresentado por Zarpellon (2018), dados coletados pelo Sistema de Registro de Ocorrência e Estatísticas do Corpo de Bombeiros (SYSBM) estimam uma média de 281,6 incêndios por ano. Durante esse período, a região Sul do país, mais precisamente os estados Rio Grande do Sul e Paraná, lidera em número de unidades armazenadoras e, conseqüentemente, apresentam mais ocorrências anuais. Observa-se na Figura 3 um mapa de calor ilustrando os maiores picos de ocorrências anuais.

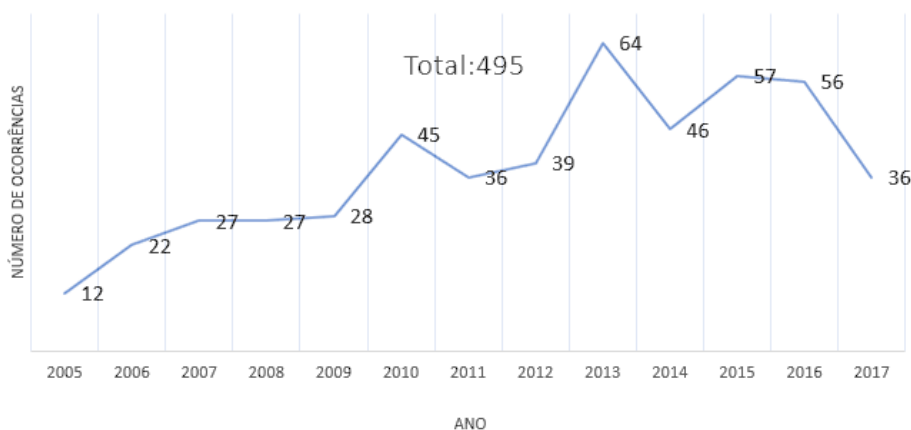
Figura 3 – Mapa de calor de ocorrências de incêndios em unidades armazenadoras.



Fonte: Zarpellon CONAB /SYSBM 2005-2018 (2018).

No estado do Paraná, que é o segundo em volume de unidades armazenadoras, registrou-se um total de 495 casos de incêndios em unidades armazenadoras entre 2005 e 2017, de acordo com Zarpellon (2018), conforme mostrado no Gráfico 1. As maiores incidências ocorreram nos meses de fevereiro e março, que correspondem ao período da colheita da soja, e nos meses de julho a agosto, relacionados a do milho.

Gráfico 1 - Registros de incêndios ao longo de 2005 a 2017 no estado do Paraná.



Fonte: SYSBM 2005-2018 (2018).

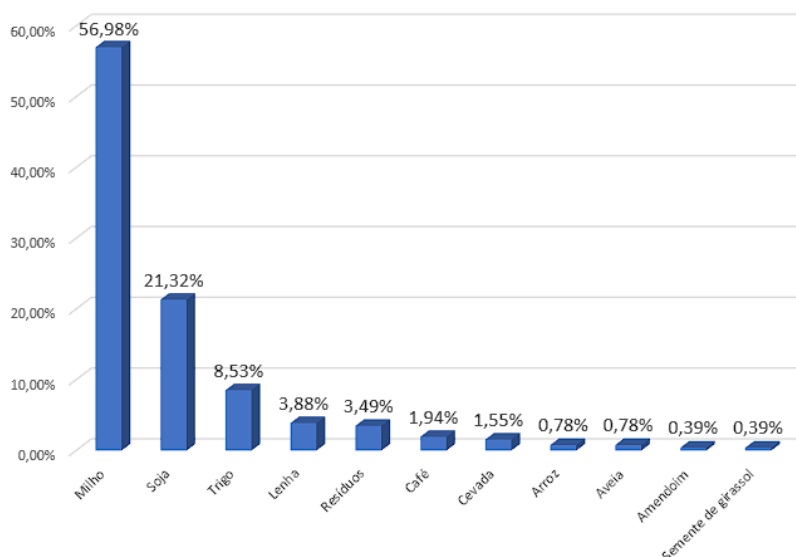
Devido a todo o processo de beneficiamento dentro das unidades de grãos envolvendo tratamentos mecânicos e químicos, os grãos passam por diversos compartimentos destinados à limpeza e secagem. Entre esses compartimentos destacam-se os silos, correias transportadoras, elevadores e sistemas de transporte por túneis. Durante esse percurso, os grãos sofrem processos

abrasivos que geram partículas finas, as quais tendem a se acumular em diferentes áreas da unidade. Devido ao tamanho reduzido dessas partículas, a energia necessária para ignição e, conseqüentemente, para que ocorram explosões é extremamente baixa. Quanto mais finas e pulverulentas forem essas partículas, maior será a superfície de contato com o oxigênio presente no ar, aumentando significativamente a reatividade do material e facilitando a propagação da chama Eckhoff (2003). Isso torna as instalações de beneficiamento particularmente vulneráveis a incidentes relacionados à poeira em suspensão.

As normas NFPA 654:2020 e a NFPA 68:2023 estabelecem que qualquer material sólido com diâmetro igual ou inferior a 420 µm é considerado poeira combustível. Quando essas partículas formam aglomerados, podem não gerar risco devido à carga eletrostática entre elas. No entanto, quando dispersas no ar, apresentam perigo ao atingirem a concentração mínima de explosividade (MEC), conforme mostrado por Eckhoff (2003).

Conforme apresentado no Gráfico 2, os principais grãos que lideram as ocorrências são também os mais produzidos no Brasil. O milho representa mais de 50% de todos os casos, tornando-se o grão mais perigoso, seguido da soja, com pouco mais de 20% Zarpellon (2020).

Gráfico 2 – Influência do tipo de produto nas ocorrências de incêndios e explosões.



Fonte: Zarpellon, (2020).

De acordo com os estudos de Crawl (2003), citados por Abbasi e Abbasi (2007), para que uma explosão ocorra, são necessários três elementos essenciais, conhecidos como o triângulo do fogo. Esse cenário requer a presença de um material combustível neste caso, poeira ou material particulado, um comburente, que é o oxigênio, e uma fonte de ignição. Nas unidades armazenadoras, o material combustível e o oxigênio estão sempre presentes, tornando o controle da fonte de ignição

o principal foco de atenção, especialmente no que se refere a equipamentos elétricos inadequados para áreas com atmosfera explosiva ou em condições deficientes de manutenção, que podem gerar faíscas, arcos elétricos ou superfícies aquecidas. Mesmo uma quantidade mínima de energia pode ser suficiente para desencadear uma deflagração, o que ressalta a importância de medidas rigorosas de prevenção e monitoramento.

Neste contexto, as unidades armazenadoras apresentam um alto risco de explosões devido aos fatores previamente mencionados, como a presença de poeiras combustíveis em suspensão, fontes de ignição e a constante movimentação de produtos particulados. Esses ambientes, caracterizados pela combinação de produtos combustíveis e oxigênio, tornam-se propícios à ocorrência de deflagrações caso medidas de segurança adequadas não sejam implementadas. A negligência na prevenção de explosões pode comprometer a integridade dos equipamentos, a segurança dos trabalhadores e a continuidade das operações, resultando em prejuízos financeiros e humanos.

Este trabalho analisará três normas utilizadas para dimensionar sistemas de alívio de explosões por ventilação: a NBR 16385:2015, que define diretrizes nacionais para proteção de equipamentos contra explosões de pós; a EN 14491:2012, voltada ao projeto e instalação desses dispositivos na União Europeia; e a NFPA 68:2023, referência internacional para o cálculo da área de ventilação. A análise dessas normas possibilitará identificar diferenças e semelhanças em seus critérios, contribuindo para a definição de parâmetros técnicos mais adequados ao dimensionamento seguro de sistemas de proteção.

1.1. JUSTIFICATIVA

Os silos representam uma infraestrutura essencial para a conservação de grãos, garantindo condições adequadas de estocagem e reduzindo perdas pós-colheita. Ao evitar o desperdício, contribuem para o uso mais eficiente dos recursos naturais e diminuem a necessidade de expansão agrícola. Além disso, favorecem a estabilidade da cadeia produtiva e auxiliam na segurança alimentar.

Segundo Eiko e Namba (2011), ao se analisar os riscos em uma unidade armazenadora, a explosão se encontra em um patamar superior aos demais, devido ao impacto que pode envolver vidas humanas, gerando óbitos ou lesões. Em segundo plano, há os danos estruturais em equipamentos e componentes da unidade, além da perda do produto ensilado.

Dentro dos 17 ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável) que a ONU (Organização

das Nações Unidas) define como metas, destaca-se o ODS 9, que busca promover a construção de infraestruturas resilientes, a utilização de tecnologias sustentáveis e a inovação industrial.

Dessa forma, este estudo busca aprimorar o modelo de dimensionamento de sistemas de alívio de pressão para mitigar os possíveis danos gerados por explosões em silos, em consonância com o 9º ODS. Além disso, também se relaciona com o 2º ODS (Fome Zero e Agricultura Sustentável), uma vez que a prevenção de explosões em silos impacta positivamente na preservação de alimentos, contribuindo para a redução de perdas e desperdícios. Um dimensionamento mais preciso auxilia na manutenção da integridade dos alimentos nas unidades armazenadoras, prevenindo perdas.

Acredita-se que o foco na qualidade do projeto e da construção, com ênfase em uma vida útil superior às exigências mínimas das normas, é essencial para uma visão holística de sustentabilidade. Projetos mais assertivos e otimizados de sistemas de alívio de pressão e ventilação contribuem para estruturas mais resilientes, robustas e duráveis, reduzindo riscos de colapso, preservando recursos naturais, evitando desperdícios e minimizando os riscos aos colaboradores.

2. OBJETIVOS

Objetivo geral:

O objetivo geral deste trabalho consiste no desenvolvimento de um software dedicado à análise e ao dimensionamento da área de ventilação para alívio de sobrepressão em eventos de deflagração em unidades armazenadoras, com base nas prescrições das normas EN 14491:2012, NFPA 68:2023 e NBR 16385:2015, possibilitando a avaliação comparativa de diferentes cenários, considerando distintas relações H/D, bem como as variações das pressões reduzida de explosão (P_{red}) e de ativação dos dispositivos de alívio (P_{stat}), e a forma como esses parâmetros influenciam diretamente a área de ventilação requerida.

Objetivos específicos:

- ✓ Apresentar as normas EN 14491:2012, NFPA 68:2023 e NBR 16385:2015;
- ✓ Analisar os efeitos da relação H/D das unidades armazenadoras, utilizando estudos de caso em comparação com silos de concreto classificados como baixos, medianamente esbeltos e esbeltos;
- ✓ Desenvolver um software, para avaliar as áreas de ventilação conforme as normas estudadas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As explosões em silos representam um risco elevado para a operação dos sistemas de armazenamento, com consequências potencialmente devastadoras para trabalhadores instalações e o meio ambiente. A combinação de fatores como o acúmulo de poeira, a presença de materiais combustíveis e a ausência de medidas adequadas de mitigação torna os silos especialmente vulneráveis a eventos explosivos. Esse cenário destaca a importância de estudar as causas, os mecanismos e as técnicas de prevenção relacionadas às explosões em silos. A revisão bibliográfica aqui proposta visa consolidar o conhecimento existente sobre o tema, abordando aspectos teóricos, práticos e normativos, com o objetivo de subsidiar o desenvolvimento de sistemas mais eficientes e seguros de alívio de pressão e mitigação de riscos.

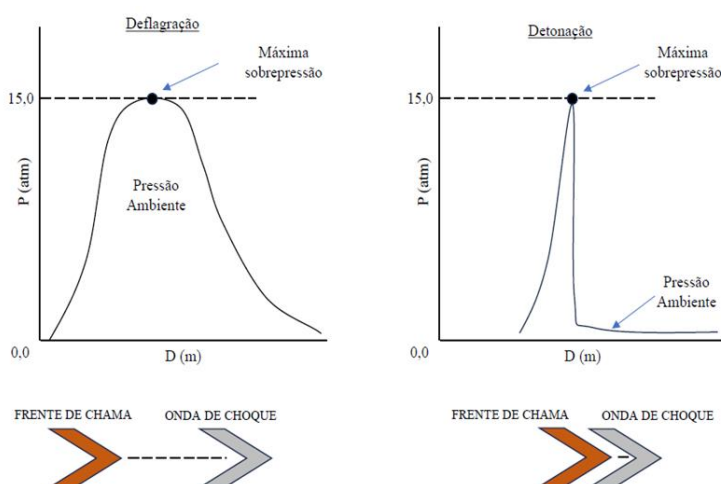
3.1. Deflagração e detonação

Conforme descrito por Frank (1996), a velocidade com que a chama se propaga durante uma explosão pode ser classificada em dois tipos: deflagração e detonação. Na deflagração, a queima da mistura inflamável ocorre de maneira relativamente lenta, com uma velocidade típica de aproximadamente 1 m/s. Por outro lado, a detonação pode gerar pressões significativamente maiores e mais destrutivas, pois a frente de chama se desloca como uma onda de choque, quase junto com a onda de combustão, que libera energia para manter essa onda.

A deflagração ocorre quando a frente de chama se propaga a velocidades subsônicas, gerando um aumento progressivo de pressão até atingir um valor máximo de sobrepressão, seguido de sua dissipação ao longo da distância. Conforme ilustrado na Figura 4, esse fenômeno apresenta variações mais suaves de pressão em relação à pressão ambiente, resultando em efeitos estruturais menos severos, embora ainda capazes de causar danos significativos em ambientes confinados.

Por outro lado, a detonação caracteriza-se pela propagação da reação a velocidades supersônicas, acoplada a uma onda de choque intensa que provoca elevação abrupta da pressão em um intervalo mais curto. Esse comportamento resulta em uma intensidade destrutiva muito superior, com rápidas variações da pressão ambiente e elevado potencial de falha estrutural, evidenciando as diferenças fundamentais entre os dois fenômenos.

Figura 4 – Comparação entre a detonação e deflagração.



Fonte: Adaptado de Crowl (2001).

. O estudo de Eckhoff (2009) propõe o conceito do pentágono das explosões de poeira, apresentado na Figura 5, como uma ampliação do tradicional triângulo do fogo, ao incorporar fatores específicos associados a ambientes industriais. Além do combustível, do oxigênio e da fonte de ignição, os autores destacam a concentração adequada de poeira em suspensão e o confinamento do ambiente como condições essenciais para a ocorrência de uma explosão de poeira. Esse modelo conceitual demonstra que a eliminação ou o controle de qualquer um desses cinco elementos é suficiente para prevenir o evento, fornecendo uma base técnica importante para a análise de riscos e o desenvolvimento de estratégias de prevenção em unidades armazenadoras e processos industriais.

Figura 5 – Os componentes de uma explosão de pó: Pentágono de explosão.



Fonte: <https://www.siebert.com.br/solucoes-rembe/alivio-de-explosao/>.

Conforme Figura 6 apresentada ilustra o mecanismo típico de ocorrência de explosões primárias e secundárias em ambientes contendo poeira combustível. Inicialmente, uma deflagração primária ocorre em um compartimento confinado, gerando uma onda de pressão e uma frente de chama que podem evoluir para o fenômeno conhecido como *fireball*. A onda de explosão gerada promove a ressuspensão de camadas de poeira depositadas em outras áreas do complexo, formando novas nuvens de poeira em suspensão. Em sequência, essas nuvens são inflamadas pela frente de chama, dando origem a explosões secundárias, geralmente mais intensas que a explosão inicial. A propagação sucessiva desse processo entre compartimentos pode resultar em explosões em cadeia, responsáveis pelos maiores níveis de danos estruturais e riscos à segurança.

Figura 6 - Etapas do processo de explosão de poeira: (a) dispersão de uma camada de poeira depositada em decorrência da onda de choque gerada pela explosão primária; (b) suspensão das partículas e sua subsequente ignição, resultando na ocorrência de uma explosão secundária associada ao fenômeno conhecido como *fireball*.



Fonte: Eckhoff, (2003).

A partir do momento em que ocorre a primeira explosão, caso o equipamento não possua sistemas de segurança adequados para contenção, pode haver o rompimento do invólucro, resultando na propagação da onda de explosão. Nessa etapa inicial, conhecida como deflagração, as condições específicas podem permitir que a velocidade atinja até 335 m/s. Simultaneamente, o fenômeno conhecido como “bola de fogo” pode se deslocar a uma velocidade de aproximadamente 9 m/s.

A onda de choque propaga-se inicialmente, levantando novas nuvens de poeira provenientes de produtos acumulados em outros equipamentos. Essas nuvens, ao serem inflamadas, dão origem a explosões secundárias ou em cadeia, conforme descrito por Eckhoff (2003). Esse cenário foi igualmente detalhado nos estudos realizados pela OSHA (2009).

A magnitude de uma explosão de partículas combustíveis depende dos seguintes pontos:

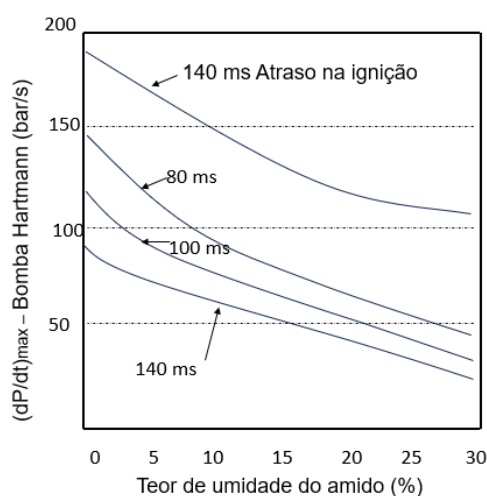
- ✓ **Características físico-químicas do pó:** Existem peculiaridades que classificam o pó combustível de acordo com seu nível de periculosidade, como o tamanho das partículas. Quanto menor a partícula, mais rápida é sua queima e maior o risco de deflagração, sendo a granulometria de 500 μm ou menor um fator crítico, conforme item 3.33 da NBR 16385:2015.
- ✓ **Concentração de pó na mistura com o ar:** refere-se à faixa de concentração, expressa em g/m^3 , na qual ocorre a mistura entre o oxigênio e o material particulado, possibilitando a combustão. Essa faixa apresenta um limite inferior de 50–100 g/m^3 e um limite superior de 2–3 kg/m^3 Eckhoff (2003). O limite inferior corresponde à menor concentração de poeira no ar capaz de sustentar uma chama ou explosão, enquanto o limite superior representa a maior concentração em que ainda há oxigênio suficiente para manter a combustão.
- ✓ **Homogeneidade e turbulência:** quanto mais uniforme a distribuição no ar, maior o potencial explosivo. A turbulência pode ser gerada pelo carregamento, escoamento, ventilação do sistema ou explosões secundárias, contribuindo para o aumento da severidade Eckhoff (2003).
- ✓ **Tipo de energia, fonte de ignição e sua localização:** devido aos fatores acima, a energia necessária para inflamar o material é baixa. Também pode ocorrer autoignição. Faíscas de correias transportadoras, falhas elétricas ou altas temperaturas em secadores são fontes comuns. Conforme Zarpellon (2018), secadores respondem por 77,24% das ocorrências, seguidos por silos (9,39%) e elevadores (5,01%).
- ✓ **A geometria do recipiente:** a geometria do recipiente também pode contribuir na turbulência, como formas irregulares, os montantes voltados para dentro do silo, zonas de acúmulo de pó, em bordas favorecendo também as explosões secundárias, caminhos restritos como dutos ou pequenas câmaras podem contribuir proporcionando ondas de pressão mais fortes devido ao confinamento. A relação entre a altura do silo e seu diâmetro (H/D) também influencia a propagação das chamas. Clique ou toque aqui para inserir o texto. Tascón *et al.* (2009).
- ✓ **Temperatura, pressão e umidade da mistura explosiva:** neste fator, considera-se o MIT-Cloud (*Minimum Ignition Temperature of a dust cloud*), que

corresponde à temperatura mínima de uma superfície ou ambiente necessária para inflamar uma nuvem de poeira em suspensão. Esse parâmetro representa a sensibilidade térmica do material particulado e indica o ponto a partir do qual a mistura poeira-ar pode entrar em ignição espontânea, sem a necessidade de uma fonte externa de chama conforme NFPA 68:2023.

A Figura 7 apresenta a relação entre o teor de umidade do amido e a taxa máxima de aumento de pressão $(dP/dt)_{max}$, parâmetro utilizado para caracterizar a severidade de explosões de poeira conforme o método da bomba de Hartmann. Observa-se que, para diferentes atrasos na ignição após a dispersão da poeira (80 ms, 100 ms e 140 ms), o aumento do teor de umidade resulta em uma redução significativa de $(dP/dt)_{max}$, indicando menor intensidade explosiva. Além disso, verifica-se que atrasos maiores na ignição conduzem a valores mais baixos de taxa de pressurização, evidenciando a influência da turbulência e da homogeneidade da nuvem de poeira no desenvolvimento da explosão.

Nesse contexto, Eckhoff (2003) destaca que o teor de umidade do produto exerce papel fundamental na intensidade das explosões de poeira, conforme ilustrado na Figura 7. Com o aumento da umidade, ocorre a redução da severidade da explosão, refletida na diminuição de $(dP/dt)_{max}$, em função da absorção de calor pela água presente nas partículas e da consequente redução da eficiência da combustão. Adicionalmente, maiores atrasos entre a dispersão da poeira e a ignição resultam em menor nível de turbulência da nuvem formada, contribuindo para explosões menos intensas.

Figura 7 - Influência do teor de umidade do amido de milho em relação à taxa máxima de aumento de pressão – comparação para diferentes atrasos na ignição.



Fonte: Eckhoff (2003).

Na deflagração, todos esses fatores contribuem para a explosão primária. Nesta fase inicial, a onda de choque gera uma grande nuvem de pó não queimado, posteriormente inflamada e

originando a bola de fogo secundária. Esse fenômeno pode provocar estragos ainda mais significativos, especialmente em silos dispostos em paralelo ou no formato colmeia (multicelulares), pois a proximidade e a conexão entre os compartimentos permitem que a onda de choque e a nuvem de pó inflamável se propaguem de um silo para outro. Dessa forma, cada silo vizinho pode sofrer uma explosão secundária, amplificando o dano total e tornando os efeitos da deflagração muito mais severos do que em silos isolados.

Conforme Abbasi e Abbasi (2007), e ilustrado na Tabela 2, a maioria dos pós de grãos podem ser inflamáveis ao serem soprados contra uma superfície quente, com temperaturas entorno de 400-500 °C. No entanto, mesmo em temperaturas próximas a 200°C, em condições de baixa umidade e alta turbulência, podem ocorrer explosões. Exemplos de temperaturas mínimas de ignição, considerando umidade relativa de 30-90%, são detalhados na Tabela 3.

Tabela 3 - Temperatura mínima de ignição.

Poeiras combustíveis agrícolas	Temperatura mínima de ignição (°C)
Farinha de Trigo	410-430
Amido de Milho	410-450
Pó de Centeio	430-500

Fonte: Benedetto *et al.* (2010)

Perante ao exposto sobre os mecanismos de deflagração, bem como dos fatores que influenciam a gravidade das explosões de poeiras-combustíveis em silos, torna-se evidente que nem todas partículas apresentam o mesmo comportamento explosivo. Fatores como a granulometria, umidade, composição química e temperatura de ignição determinam o quão suscetível um material é à deflagração e à propagação de explosões secundárias. Neste cenário, a classificação dos grãos mais inflamáveis por meio do índice K_{st} (*Dust Deflagration Index*) é essencial para a análise de segurança em ambientes industriais, permitindo orientar medidas preventivas adequadas.

3.2. Classificações de grãos mais suscetíveis a explosão e a constante K_{st}

O índice K_{st} é um parâmetro utilizado para avaliar a severidade de explosões de poeira em ambientes confinados. Esse índice é determinado experimentalmente em laboratório, em recipientes padronizados, geralmente câmaras de 1 m³ e esferas de 20 litros, Figura 8, conforme descrito na NBR 6184-1:2007 e calculado pela eq.(1). Após uma ampla faixa de concentração e testes é determinado o valor de K_{st} .

$$K_{st} = \left(\frac{dp}{dt} \right)_m \cdot V^{1/3} \quad (1)$$

O índice K_{st} pode variar quando comparados os testes realizados em recipientes de diferentes volumes. Para padronizar e permitir a comparação entre reservatórios distintos, a fórmula utiliza o fator $V^{1/3}$. A taxa máxima de aumento de pressão, representada por $(dp/dt)_m$ define a velocidade com que essa pressão se expande no estágio inicial da explosão.

Para avaliar o potencial de combustão e a severidade das explosões de pós combustíveis, utilizam-se ensaios padronizados em esferas de diferentes volumes. No teste de triagem com esfera de 20 L, busca-se determinar se o pó apresenta algum potencial de combustão, injetando a poeira em suspensão e observando a ocorrência de ignição. Já no teste de explosividade com esfera de 1 m³, investigam-se parâmetros cruciais, como a pressão máxima (P_{max}), a taxa máxima de aumento de pressão $(dp/dt)_{max}$ e o índice de deflagração K_{st} . Nesse ensaio, a poeira é suspensa no interior da esfera, e a combustão é iniciada por uma fonte de ignição, enquanto sensores monitoram a evolução da pressão. Os dados obtidos permitem quantificar a severidade da explosão, classificar o pó de acordo com seu risco e fornecer informações essenciais para a implementação de medidas de prevenção e segurança em instalações industriais.

Figura 8 - Esfera de 20L (a) e 1m³ (b) para determinação de parâmetros de explosividade para pó-combustível.



Fonte: <https://www.digisensor.com.br/laboratorio-para-testes-de-explosividade/>.

Os testes em laboratório também fornecem:

- ✓ A concentração limitante de oxidante – determina a menor energia de centelha necessária para dar início a uma explosão, ou seja, avalia a sensibilidade da amostra à ignição;
- ✓ Porcentual de material combustível em uma determinada parcela de poeira;
- ✓ Análise de dimensão de partícula – para definir a distribuição do tamanho da partícula da amostra em conjunto com as medições estatísticas;
- ✓ MEI – Energia mínima para inflamar o pó-combustível (mj).
- ✓ MIT-Cloud – fornece uma medida relativa de inflamabilidade da poeira,

temperatura mínima para inflamar uma camada de pó (°C).

- ✓ MEC – Concentração mínima de explosividade: dispersão de material no ar que favorece a formação de uma atmosfera explosiva (g/m³).

A norma NFPA 68:2023 apresenta parâmetros de classificação de risco. Os valores de $P_{m\acute{a}x}$ e K_{st} são essenciais para o dimensionamento de sistemas de proteção. Os pós são classificados em três níveis de periculosidade, com base nos valores de K_{st} , sendo que taxas mais elevadas de explosividade correspondem a maiores níveis de risco. Esses parâmetros estão diretamente relacionados aos cálculos da área de ventilação necessária para o alívio de pressão em cenários de explosão, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Zona de periculosidade para pós combustíveis.

Classe de perigo	K_{st} (bar·m/s)	$P_{m\acute{a}x}$ (bar)
Zona 1	200	10
Zona 2	201-300	10
Zona 3	>300	12

Fonte: NFPA 68:2023.

No Anexo F, a NFPA 68:2023 apresenta valores de referência para diversos produtos agrícolas Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de explosividade de produtos agrícolas segunda a norma americana NPFA 68:2023.

Material	Diâmetro Mediano de Massa (µm)	Concentração Inflamável Mínima (g/m ³)	$P_{m\acute{a}x}$ (bar)	K_{st} (bar·m/s)	Classe de Perigo de Poeira
Celulose	33	60	9,7	229	2
Polpa de celulose	42	30	9,9	62	1
Cortiça	42	30	9,6	202	2
Milho	28	60	9,4	75	1
Clara de ovo	17	125	6,5	28	1
Leite em pó	83	60	5,8	38	1
Leite desnatado, seco	60	60	5,8	28	1
Farinha de soja	20	200	9,2	110	2
Amido de milho	7	—	10,2	202	2
Amido de arroz	18	60	9,2	101	1
Amido de trigo	22	30	9,2	115	2
Açúcar	30	60	9	138	2
Açúcar de leite	27	60	8,8	95	1
Açúcar de beterraba	30	60	8,5	89	1
Tapioca	22	125	9,3	52	1
Soro de leite (whey)	41	125	9,4	140	2
Farinha de madeira	29	—	10,5	205	2

Fonte: NFPA 68:2023.

Conforme Tabela 06 apresentada por Perelli *et al.* (2023), elaborada pelo Laboratório de Ensaio de Segurança de Produtos DEKRA, é possível identificar os três principais produtos ensilados com maior índice de acidentes, em conformidade com os dados de Zarpellon (2020). Ao comparar os valores da NFPA 68:2023 com os obtidos pela DEKRA, observam-se diferenças significativas, especialmente para o milho.

Tabela 6 - Exemplos de poeiras combustíveis (Laboratório DEKRA).

PRODUTO	EXPLOSIV.	$p_{m\acute{a}x}$ (bar)	K_{st} (bar.m/s)	MEI (mJ)	MIT Cloud (°C)	MEC (g/m³)
Milho	Sim	6,5	112	45-100	390-400	73
Soja	Sim	9,2	110	50-100	600-620	80
Trigo	Sim	7,4	87	50-100	370-380	67

Fonte: Adaptado de Perelli *et al.* (2023).

Portanto, os parâmetros obtidos em análises laboratoriais orientam a escolha do sistema de proteção contra deflagrações mais adequado ao tipo de material ensilado. Esse entendimento permite avaliar o comportamento do produto em condições reais de armazenamento e processamento, mitigando situações de risco que podem resultar em acidentes moderados ou de grande escala. Dessa forma, o projetista pode definir com segurança o tipo de sistema de alívio de pressão, fortalecendo a segurança e a confiabilidade operacional das indústrias.

3.3. Limites mínimos e máximos segundo NFPA 68:2023 e EN 14491:2012

Tascón *et al.* (2009) realizou uma análise comparativa entre as normas NFPA 68:2023 e EN 14491:2012, com foco no dimensionamento de sistemas de alívio de pressão, amplamente utilizadas na América do Norte e na Europa, ambas em vigor. Conforme apresentado na Tabela 7, são estabelecidos os limites para aplicação das equações prescritas por essas normas. Desta forma, com base nas características de cada silo e do material ensilado, torna-se possível determinar qual metodologia apresenta maior vantagem técnica e aplicabilidade.

Tabela 7 - Limites para as equações fornecidas pelas normas.

VARIÁVEL	EN 14491:2012	NFPA 68:2023
Volume	$0,1 \leq V \leq 10.000 \text{ m}^3$	$0,1 \leq V \leq 10.000 \text{ m}^3$
Pressão de ativação estática de alívio	$0,1 \leq P_{stat} \leq 1 \text{ br}$	$P_{stat} \leq 0,75 (1 + P_{inicial}) \text{ bar-g}$ quando $P_{inicial} > 0,2 \text{ bar-g}$
Dispositivo (P_{stat})	Para $P_{stat} \leq 0,1 \text{ bar}$, use $P_{stat} = 0,1 \text{ bar}$	$P_{stat} \leq 0,75 \text{ bar-g}$ quando $P_{inicial} \leq 0,2 \text{ bar-g}$
Pressão máxima de explosão reduzida	$0,1 \text{ bar} < P_{red,max} \leq 2 \text{ bar}$ e $P_{red,max}$ deve ser pelo menos $P_{stat} + 2 \times$ a faixa de tolerância de P_{stat}	-
K_{st} e pressão máxima de explosão ($P_{máx}$)	$5 \text{ bar} \leq P_{máx} \leq 10 \text{ bar}$ para um parâmetro específico de poeira $10 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \leq K_{st} \leq 300 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ $5 \text{ bar} \leq P_{máx} \leq 12 \text{ bar}$ para um parâmetro específico de poeira $300 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \leq K_{st} \leq 800 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$5 \text{ bar} \leq P_{máx} \leq 12 \text{ bar}$ para K_{st} valor de $10 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \leq K_{st} \leq 800 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Razão de comprimento (H/D)	$1 \leq H/D \leq 20$	$1 \leq H/D \leq 6$
Turbulência	-	Velocidade axial média do ar e velocidade tangencial ambas $< 20 \text{ m/s}$
Condições Atmosféricas	Pressão absoluta $\leq 100 \text{ Kpa}$ Concentração de oxigênio $\leq 21\%$ Temperatura entre -20°C e $+60^\circ\text{C}$ Umidade relativa entre 5% e 85% fração de volume	Pressão do enclausuramento estiver inicialmente entre $-0,2 \text{ bar-g}$ (20 Kpa) e $0,2 \text{ bar-g}$ (20 Kpa)
Condições Adicionais	Sem dutos de alívio Fator de efetividade de alívio = 1 (Dispositivo praticamente livre de inercia)	Sem dutos de alívio quando a massa do painel de ventilação for $\leq 40 \text{ Kg/m}^2$ a equação 8.3.2 deve ser usada

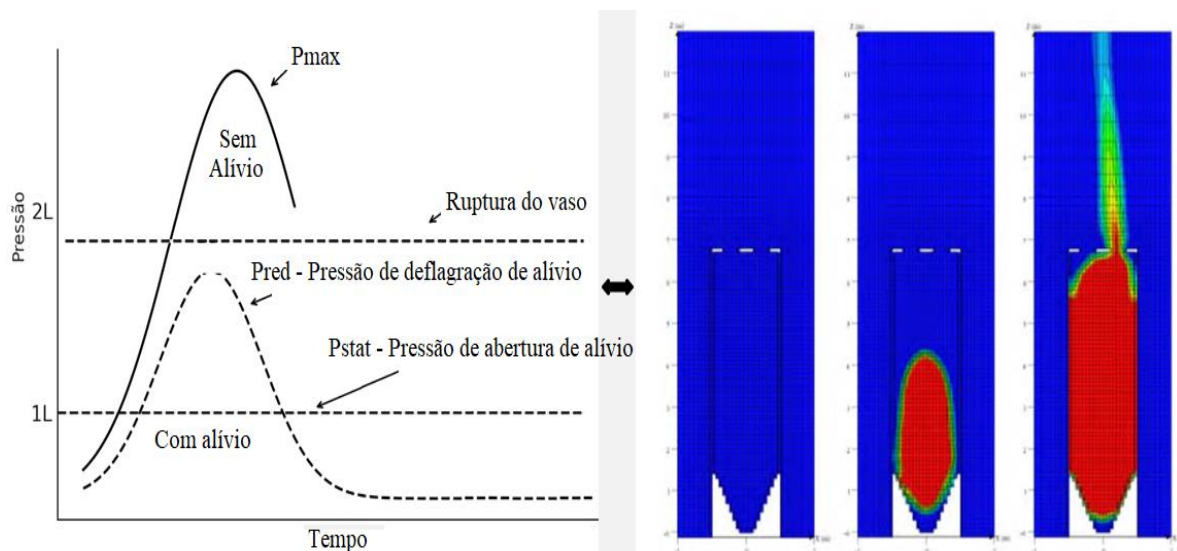
Fonte: Adaptado de Tascon (2009).

3.4. Influência dos dispositivos de alívio de pressão

Na Figura 9 é apresentado a resposta temporal da pressão durante um evento de deflagração e sua representação espacial por meio de simulações em dinâmica dos fluidos computacional (CFD). No gráfico à esquerda, observa-se a evolução da pressão ao longo do tempo para os cenários com e sem alívio, evidenciando a pressão de abertura do dispositivo de alívio (P_{stat}), a pressão reduzida de projeto (P_{red}), utilizada como parâmetro de dimensionamento, e a pressão máxima sem alívio ($P_{máx}$), cuja superação pode resultar na ruptura do vaso. À direita, as simulações em CFD ilustram a propagação da frente de chama e a distribuição das regiões de maior pressão no interior do volume analisado, permitindo visualizar a atuação do sistema de alívio e sua eficiência na limitação da sobrepressão, bem como na mitigação dos efeitos associados à deflagração. Esse mecanismo reduz a pressão interna, resultando no fenômeno conhecido como “fireball”, conforme demonstrado na

Figura 10.

Figura 9 - Comportamento da pressão interna do vaso ao longo do tempo com e sem alívio.



Fonte: Adaptado Eckhoff (2003).

Figura 10 - Simulação controlada fenômeno *fireball* no laboratório Fire Corporation/Blue Springs.

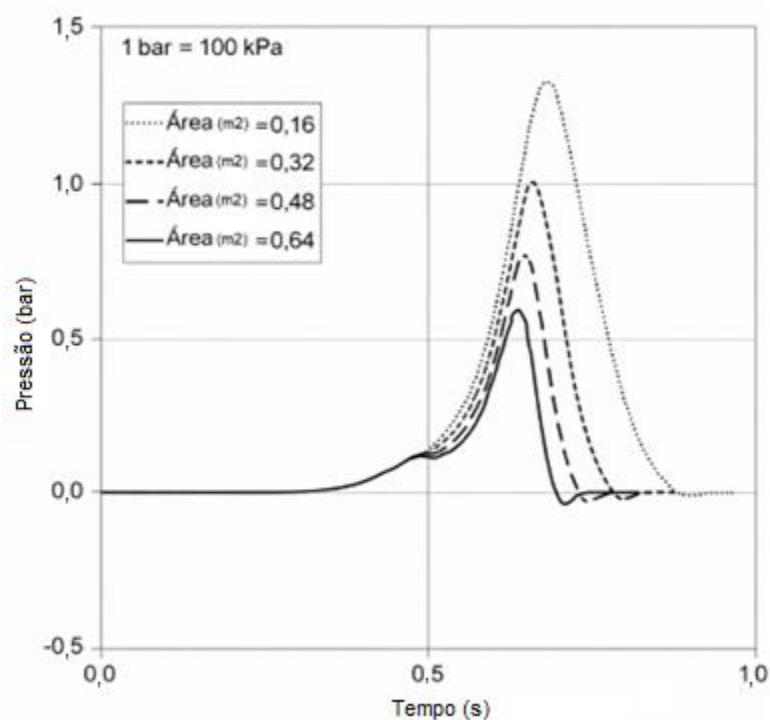
Fonte: <https://www.digisensor.com.br/dispositivos-de-alivio-de-pressao-para-riscos-de-explosao-industrial/>.

As figuras a seguir ilustram o comportamento da pressão de explosão em função da área de ventilação em silos, por meio de simulações realizadas no software FLACS-DustEX², conforme Tascón e Aguado (2015). A Figura 11 demonstra as curvas de pressão-tempo obtidas para diferentes áreas de ventilação, confirmando que o aumento da área de alívio resulta em uma redução

² O FLACS-DustEx é um módulo especializado de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) da Gexcon para simular explosões de poeiras combustíveis industriais, focado em prever propagação de chama, severidade da explosão e desenvolvimento de pressão.

significativa da pressão máxima interna gerada durante a deflagração, pois permite o escoamento mais eficiente dos gases de combustão.

Figura 11 - Curvas de pressão-tempo obtidas por simulação numérica com diferentes áreas de ventilação.



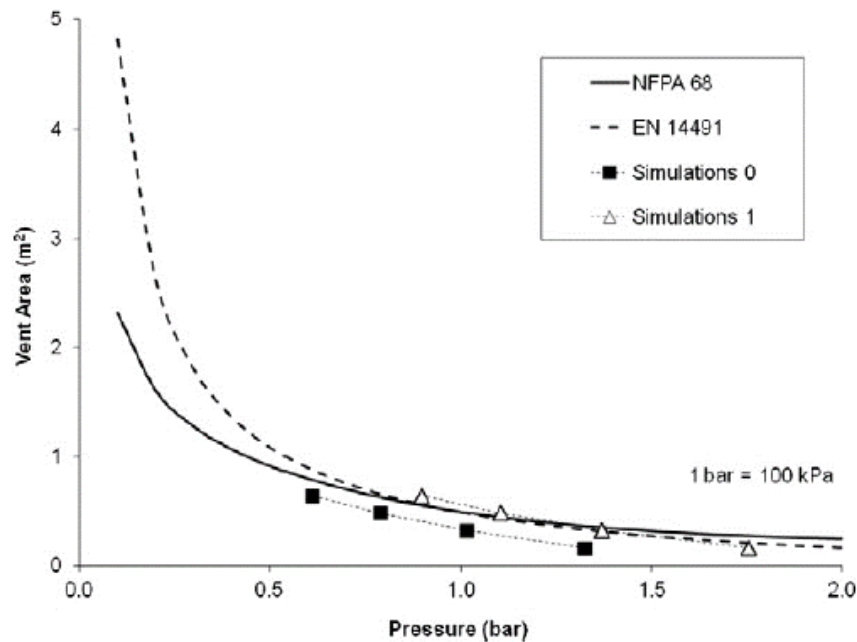
Fonte: Táscon (2015).

A Figura 12 apresenta a relação entre a sobrepressão reduzida de explosão e a área de alívio, comparando os resultados obtidos por simulação computacionais com os valores previsto pelas normas NFPA 68:2023 e EN 14491: 2012, considerando uma pressão estática de alívio de 0,1 bar. Observa-se que o comportamento das curvas é semelhante, indicando redução da área de ventilação necessária com o aumento de P_{red} . Entretanto, para valores mais baixos de P_{red} a norma EN 14491: 2012 apresenta áreas de alívio superiores às indicadas pela NFPA 68:2023, evidenciando um caráter mais conservador, especialmente para grandes volumes. À medida que a sobrepressão admissível aumenta, as curvas normativas convergem, indicando maior consistência entre os métodos de cálculo.

Os resultados das simulações mostram que as divergências em relação às normas estão diretamente relacionadas às condições iniciais consideradas. No conjunto de condições menos severas (Simulação 0), as pressões simuladas ficaram abaixo dos valores normativos, enquanto no conjunto mais severo (Simulação 1) observou-se maior proximidade e até sobreposição com as curvas normativas da faixa de P_{red} = 0,5 e 2,0 bar. Essa diferença está associada principalmente ao

aumento da concentração inicial de poeira de 300 g/m^3 para 500 g/m^3 , que resultou em um incremento médio de 39% na pressão máxima alcançada, mesmo com níveis de turbulência menores Tascón e Aguado (2015).

Figura 12 - Redução da sobre pressão de explosão em relação a área de ventilação.



Fonte: Táscon, (2015).

Desta forma podemos identificar que a taxa K_{st} está diretamente relacionada aos resultados de P_{stat} , P_{red} e $P_{red,max}$. Quanto maior o K_{st} , maior será a pressão máxima hipotética do vaso sem sistema de alívio, e também maior será o P_{red} , que corresponde à pressão de deflagração aliviada, abaixo da pressão de ruptura do vaso. Ou seja, trata-se da pressão máxima que pode ser atingida dentro de um vaso após a abertura do sistema de alívio.

Por outro lado, a relação com o P_{stat} é oposta: quanto menor for a pressão de abertura do sistema de alívio, mais rápido será o acionamento. É importante destacar que a P_{stat} deve estar dentro de uma margem de segurança aceitável. Um sistema de alívio com a sensibilidade muito alta pode ocasionar ativações frequentes, reduzindo a vida útil do dispositivo, especialmente em sistemas projetados para suportar apenas alguns ciclos de ativação.

3.5. Sistemas de alívio de explosão

Os sistemas de alívio de explosão são dispositivos essenciais para a proteção de silos, especialmente em instalações industriais onde ocorre o armazenamento de produtos particulados ou inflamáveis. Esses sistemas são projetados para minimizar os riscos associados a explosões internas, permitindo o alívio controlado da pressão acumulada e prevenindo danos catastróficos ao silo e ao

ambiente circundante. Ao utilizar elementos como membranas de alívio ou ventilações projetadas, os sistemas garantem que a energia gerada durante uma explosão seja direcionada de forma segura, protegendo tanto as estruturas quanto as vidas envolvidas. Sua implementação é uma medida de segurança indispensável em setores que lidam com materiais voláteis ou que geram atmosferas explosivas.

Atualmente o mercado disponibiliza diversos sistemas de alívio de pressão, tais como:

- ✓ **Painéis:** conforme a Figura 13, o equipamento é composto por uma membrana fina metálica, calibrada para romper quando a pressão atinge o P_{stat} .

Figura 13 - Membrana metálica de ruptura para alívio de pressão.

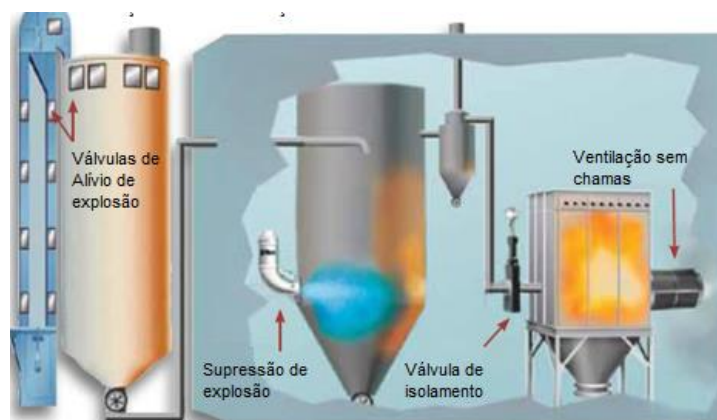


Fonte: <https://rembe.com.br/blog/2023/05/04/como-sao-utilizados-os-paineis-de-alivio-de-explosao/>.

Suas vantagens são o baixo custo de aquisição e instalação, maior confiabilidade, já que não possuem partes móveis (o que reduz falhas mecânicas), além de maior tempo de resposta, garantindo o alívio. Podem ainda ser utilizados em combinação com outros dispositivos. Sua desvantagem é que, após o seu acionamento, o equipamento deve ser substituído, uma vez que a membrana se rompe na ativação ou é danificada.

- ✓ **Filtros de alívio de pressão:** São equipamentos coletores de pó, também conhecidos como filtros cartucho. Esses dispositivos têm como objetivo controlar a sobrepressão gerada durante uma deflagração interna, seja por meio do alívio controlado da pressão, da extinção precoce da explosão ou da retenção da chama e partículas incandescentes. A ventilação sem chama permite a instalação do equipamento em ambientes internos, enquanto as válvulas de isolamento evitam a propagação da explosão para dutos e sistemas conectados, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Filtro de alívio de pressão.



Fonte: <https://www.mascotind.co.in/latest-update/explosion-protection-solutions/17>.

O risco de explosividade desse equipamento é potencialmente elevado, mas pode ser mitigado por meio de um sistema passivo de ruptura ou de ativação para supressão da explosão. Assim, as ações de proteção podem ser concentradas, otimizando sua eficiência e resultando em um investimento mais seguro que os demais apresentados.

Entre suas vantagens estão o direcionamento do risco (atuando para redirecionar explosões para áreas seguras), a contribuição para a redução do risco ambiental, por meio da filtragem de gases e partículas (evitando explosões secundárias e protegendo a saúde dos operadores). Como desvantagens destacam-se o custo elevado de instalação e manutenção, a necessidade de espaço adicional para implantação do sistema e o desempenho limitado, que pode não ser suficiente para indústrias de grande porte ou explosões de elevada magnitude.

Válvula de alívio de pressão: a Figura 15 apresenta um modelo de válvula de controle de pressão (VCP), que consiste de um equipamento cilíndrico com espiga soldada e fixada, contendo uma tampa interna em forma de disco, mantida na posição por uma haste de mola central.

Figura 15 - Válvula de alívio de pressão VCP.



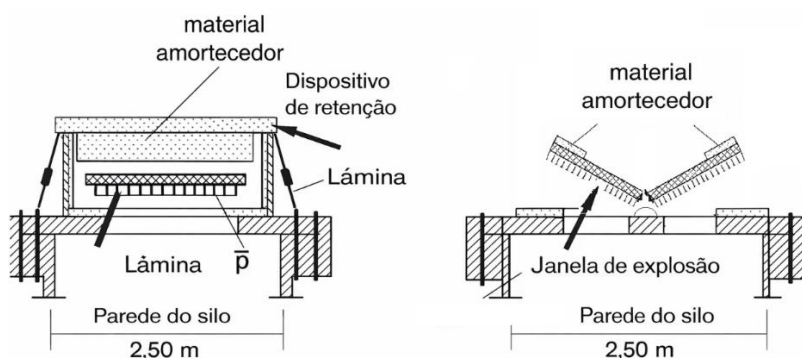
Fonte: <https://wamgroup.com.br/pt-BR/WAMBR/Product/VCP/Valvulas-de-Alivio-e-Pressao-de-Mola-Carregada>.

Quando a pressão interna excede o valor de P_{stat} , o dispositivo de alívio é acionado, promovendo o deslocamento da tampa principal e permitindo a liberação controlada da sobrepressão para o ambiente. A tampa secundária, de menor dimensão, é mantida em posição por meio de uma haste com mola conectada à tampa externa, permanecendo em equilíbrio sob condições normais de operação em função da pressão interna do silo. Em situações de sucção, ocorre a compressão da mola, possibilitando o deslocamento da tampa para baixo. O dispositivo é instalado na cobertura do silo, sendo a quantidade de unidades necessária definida em função do modelo adotado e da vazão de projeto requerida para o adequado alívio de pressão.

Assim como a membrana de ruptura, a válvula VCP possui baixo custo e fácil implementação, podendo ser usada em conjunto com outros equipamentos. Apresenta boa durabilidade, especialmente quando confeccionada em liga de aço 304 inoxidável. Suas limitações incluem dimensões restritas, vazão máxima de 13.000 m³/h e sobre pressão máxima de 0,05 bar.

- ✓ **Painéis de massa inercial:** a Figura 16, proposta por Hochst e Leuckel (1998), apresenta um modelo de painel de massa inercial utilizado como sistema de alívio. O dispositivo consiste em um painel com massa conhecida, que é deslocado com o aumento da pressão decorrente da explosão.

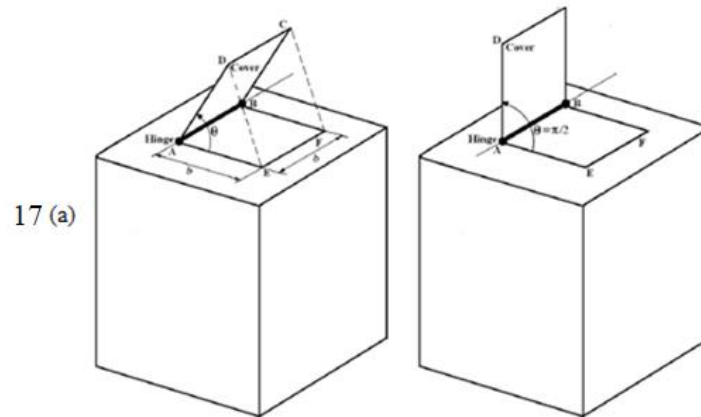
Figura 16 - Esquemas de painéis inerciais.



Fonte: Hochst e Leuckel (1998).

Existem diversos sistemas de painéis de massa inercial, sendo os mais simples os painéis de ventilação basculantes conforme ilustrado na Figura 17. Os esquemas mostram o painel inicialmente fechado e, em seguida, sua abertura progressiva em torno de uma dobradiça (*hinge*) quando a pressão interna excede a pressão de acionamento, permitindo a liberação controlada dos gases da explosão. A geometria do painel, o ângulo de abertura (θ) e a distribuição da massa influenciam diretamente a pressão de abertura e a eficiência do alívio. Esse tipo de sistema combina simplicidade construtiva com confiabilidade operacional.

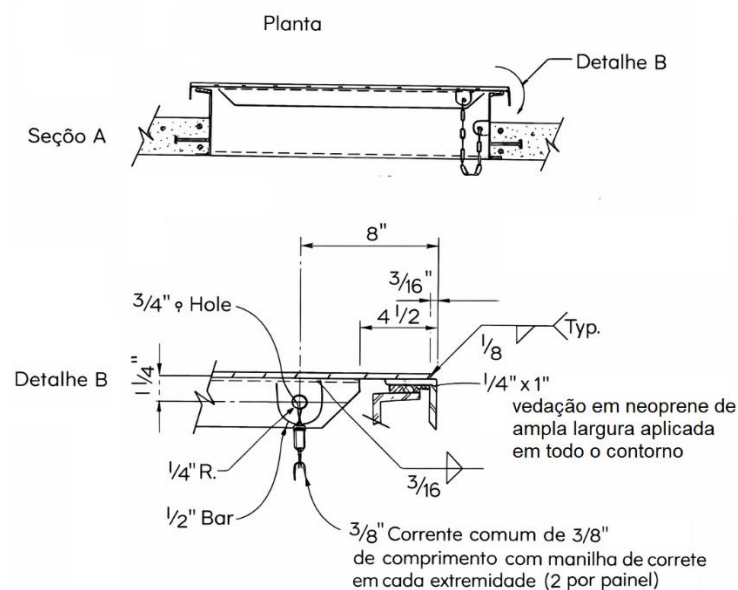
Figura 17 - Sistema de painel de massa articulado.



Fonte: Safarain e Harris (1985).

A Figura 18 a seguir ilustra uma outra configuração de uso para o painel de massa, desta forma, o painel é ancorado à estrutura por meio de correntes e pinos, permitindo que ele permaneça fechado em condições normais de operação, mas se desprenda ou se abra de forma controlada quando ocorre um aumento rápido de pressão interna, típico de uma explosão de poeira. Observa-se o uso de corrente comum de 3/8", barras metálicas, furos de ancoragem e um cordão de neoprene ao redor do painel, responsável pela vedação em regime normal e pela redução de vazamentos.

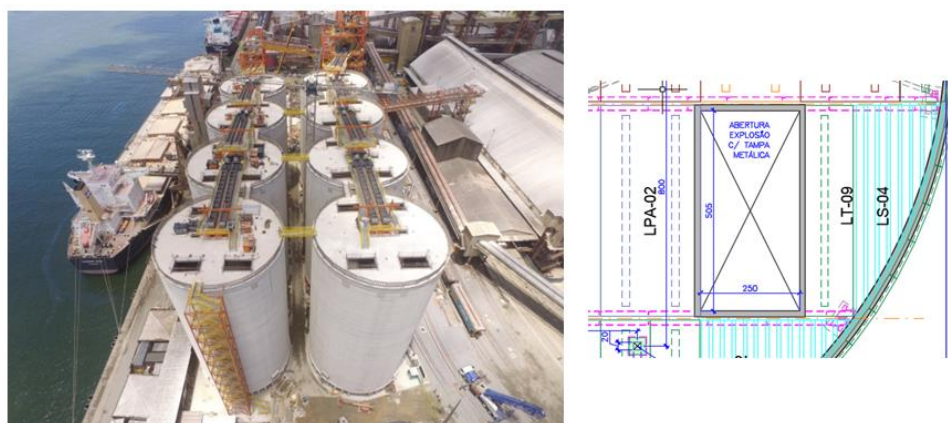
Figura 18 – Painel de massa ancorado à estrutura por meio de pinos.



Fonte: Safarain e Harris (1985).

A Figura 19 apresenta o conjunto de silos implantados no Porto de Santos–SP, evidenciando a utilização de painéis de massa articulados como sistema de proteção contra explosões de poeira. Observa-se a aplicação desses dispositivos nas coberturas e nas faces dos silos, permitindo o alívio controlado da pressão em caso de deflagração, reduzindo os esforços sobre a estrutura principal. Estando a obra concluída em setembro de 2023.

Figura 19 - Painéis de massa articulado utilizados em silos de concreto no Porto de Santos-SP.



Fonte: <https://zortea.com.br/en/portfolio/#lg=3&slide=3>.

Segundo Safarain e Harris (1985) o atraso na abertura dos painéis pode ser causado pela pressão necessária para a ativação ou pela inércia do mecanismo de abertura e fechamento. Por isso, é essencial que o dispositivo seja projetado para começar a abrir com a menor pressão tolerável e que sua construção seja leve, permitindo uma abertura total rápida.

Além disso, o conhecimento atual sobre o mecanismo de grandes explosões em larga escala e sobre a resistência dos edifícios às forças internas ainda não possibilita recomendações precisas. A prática demonstra que a maioria das explosões de poeira, vapores e gases não afeta todo o volume do silo e que explosões de vapores e gases frequentemente ocorrem em concentrações próximas aos limites de inflamabilidade, resultando em explosões relativamente fracas.

Conforme o trabalho apresentado por Pascon (2017), todas as instalações deveriam eliminar completamente qualquer possibilidade de fontes de ignição dentro do perímetro da fábrica. Entretanto, devido à confiabilidade limitada das instalações e às falhas humanas, essa condição ideal raramente é atingida, sendo possível apenas mitigar os riscos existentes. Nesse contexto, um dos aspectos mais relevantes é a manutenção de uma quantidade adequada de ar, de modo a garantir que a concentração de poeira permaneça abaixo da concentração mínima de explosividade (MEC). Além disso, em determinadas situações, pode-se recorrer à utilização de pós inertes como medida

complementar de segurança. Esses materiais, como o dióxido de silício à base de terra de diatomáceas e as areias finas, atuam por meio do princípio de diluição, ocupando o espaço na mistura e reduzindo a concentração do pó combustível no ar a níveis em que a deflagração se torna impraticável.

3.6. Normas nacionais e internacionais

Neste item, serão apresentadas as principais normas relacionadas ao dimensionamento de aberturas de ventilação para o alívio de explosões, destacando sua relevância na segurança industrial. Serão abordadas as formulações aplicadas no projeto dessas aberturas, com base em padrões reconhecidos internacionalmente, como a NFPA 68:2023, a EN 14491:2012 e a NBR 16385:2015, que estabelecem critérios rigorosos para o cálculo de áreas de ventilação. Além disso, serão discutidos os principais parâmetros que influenciam o dimensionamento, incluindo a taxa de combustão dos materiais envolvidos, a pressão interna máxima tolerada pelo sistema e o nível de turbulência gerado no interior do vaso ou silo. A compreensão desses fatores é essencial para garantir que os dispositivos de alívio sejam eficazes na mitigação dos efeitos de explosões, protegendo tanto as instalações quanto os operadores.

3.6.1 NFPA 68:2023

Conforme indicado no capítulo 6, Fundamentos da ventilação de deflagração, o item 6.1.2.1 sugere a aplicação da norma ISO 6184-1:2007 para a determinação dos índices de explosão de poeiras combustíveis no ar. Para validação, a norma estabelece que P_{red} não deve exceder dois terços da resistência final do invólucro ventilado, desde que a deformação do equipamento seja tolerável. Caso contrário, P_{red} não deve ultrapassar dois terços da resistência ao escoamento do compartimento ventilado.

Considerando uma pressão de projeto P_{mawp} (bar-g) conforme o código da Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos ASME BPVC III (2015) para caldeiras e vasos de pressão, P_{red} deve ser selecionado com base nas condições específicas descritas pelas eq. (2) e (3).

$$P_{red} \leq \left(\frac{2}{3}\right) \times F_u \times P_{mawp} \quad (2)$$

$$P_{red} \leq \left(\frac{2}{3}\right) \times F_y \times P_{mawp} \quad (3)$$

Onde:

- ✓ F_u e a relação entre a tensão última do invólucro e a tensão admissível;
- ✓ F_y é a razão entre a tensão de escoamento do invólucro e a tensão admissível dos materiais de construção do invólucro de acordo com a Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME).

A ventilação do silo deve ser dimensionada de forma a garantir que a pressão máxima, P_{red} , gerada em seu interior não exceda a resistência do silo. Essa resistência é calculada com base na pressão estática para deformação ou ruptura P_{es} , considerando o efeito dinâmico da taxa de aumento de pressão. Esse efeito é representado por um fator de carga dinâmico (DFL)= X_m/X_s , conforme descrito pela eq.(4).

$$P_{red} \leq \left(\frac{P_{es}}{DFL} \right) \quad (4)$$

Sendo:

X_m que indica o deslocamento máximo para a condição dinâmica;

X_s o deslocamento para a condição estática.

A norma destaca que na ausência detalhada da resposta estrutural, será permitido assumir o valor de pior caso para $DLF=1,5$ e dimensionar com base no elemento estrutural menos resistente do silo.

A estrutura de suporte do silo deve ser suficientemente resistente para suportar quaisquer forças de reação que se desenvolvam como resultado do funcionamento do sistema de ventilação, incluindo o efeito dinâmico da taxa de aplicação de força, conforme DLF . A eq. (5) a seguir deve ser utilizada para determinar a força de reação aplicável a silos sem dutos de ventilação, sendo F_r (kN) que é a máxima reação resultante da ventilação da combustão.

$$F_r = a \cdot DLF \cdot A_v \cdot P_{red} \quad (5)$$

Sendo:

a fator de conversão de unidades;

DLF é adotado com o valor de 1,2;

A_v é a área de ventilação.

A duração da força de reação deve ser calculada de acordo com a eq. (6), que fornece uma estimativa empírica baseada em resultados experimentais de ensaios de explosões com alívio. Essa equação representa devidamente os dados disponíveis de duração do pulso de pressão, cuja variação analisada situa-se entre -37% e +118% em relação ao valor calculado. Essa faixa demonstra a

dispersão dos resultados obtidos em diferentes condições, como tipo de pó, geometria do invólucro, nível de turbulência e tempo de ignição, indicando que o valor de t_f deve ser interpretado como uma média representativa, e não como uma medida exata.

$$t_f = b \cdot \left(\frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{red}} \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{V}{A_v} \right) \quad (6)$$

Sendo:

t_f (s) que é a duração do pulso de pressão após a abertura da ventilação;
 b equivale a $4,3 \times 10^{-3}$ ($1,3 \times 10^{-3}$).

O impulso total que uma estrutura que suporta um invólucro ventilado sofre durante a ventilação de deflagração deve ser expresso pela eq. (7):

$$I = 0,52 \cdot F_r \cdot t_f \quad (7)$$

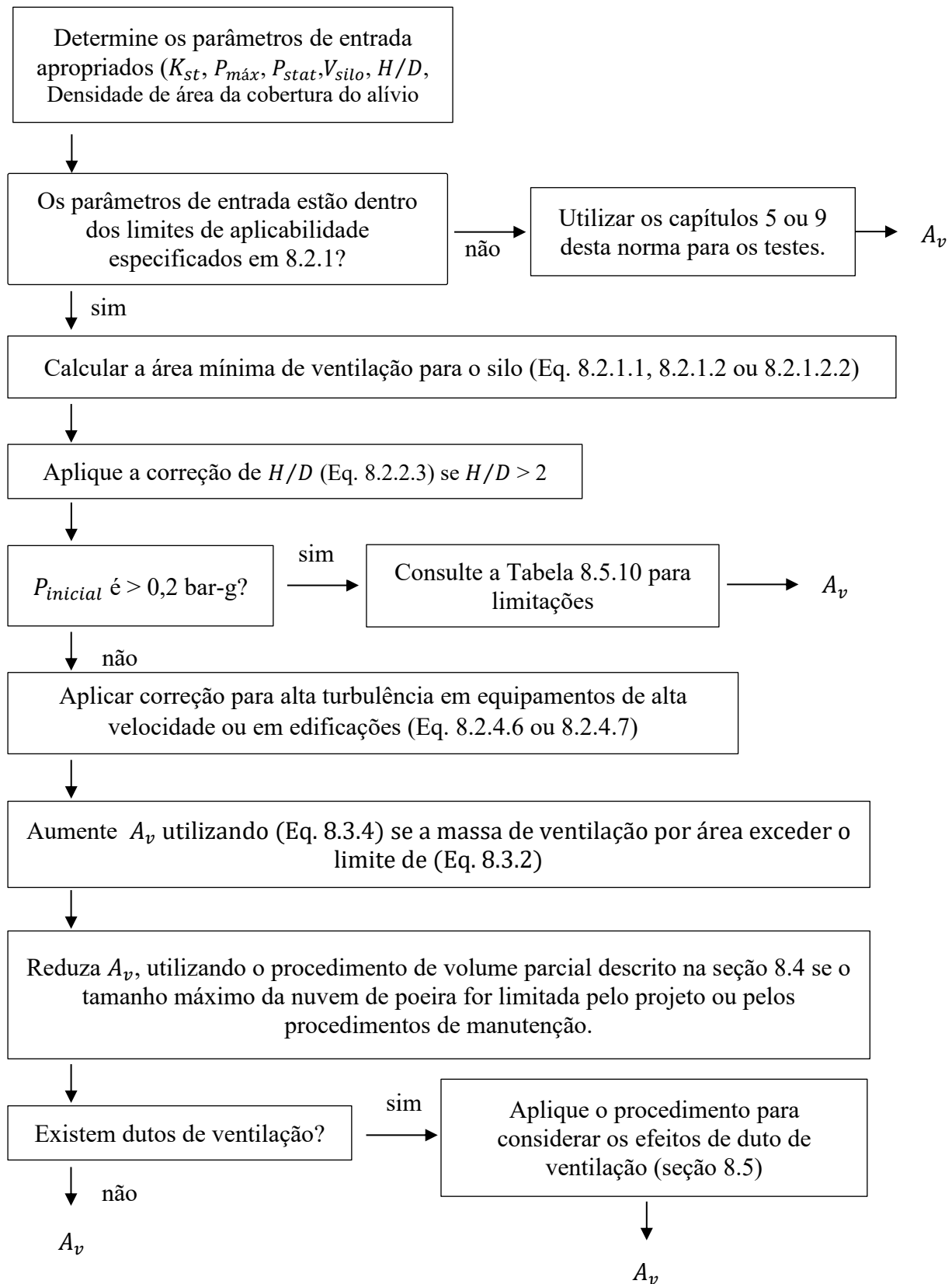
Sendo I é o impulso total experimentado pela estrutura ($Kn \times s$)

A norma reforça que os dispositivos de ventilação devem suportar de forma confiável flutuações de pressão abaixo de P_{stat} , além de vibrações ou outras forças mecânicas às quais possam estar sujeitos. P_{stat} , incluindo a tolerância negativa do fabricante, deve ser maior que a carga prevista equivalente à velocidade do vento de projeto local, de modo que a carga do vento não provoque a abertura indevida da ventilação.

Caso o material real não esteja disponível para ensaio, o dimensionamento da ventilação pode ser feito com base no K_{st} de materiais similares e nas dimensões de partículas inferiores ao tamanho de partícula especificado pela norma escolhida como, ASME BPVC III (2015) ou ISO 6184-1:2007.

O item 8.1.1.4 da NFPA 68:2023 apresenta um fluxograma geral que pode ser utilizado para selecionar métodos de dimensionamento de ventilações, conforme mostrado na Figura 20.

Figura 20 - Fluxograma geral para seleção do método de dimensionamento de ventilação segundo a norma americana NFPA 68:2023.



Fonte: Adaptação de NFPA 68:2023.

A área mínima de ventilação deve ser estimada pela pressão inicial do invólucro antes da ignição. Para pressão atmosférica, quando a pressão do silo estiver inicialmente entre $-20KPa$ e $+20KPa$, a eq. (8) deverá ser adotada para determinar A_{v0} .

$$A_{v0} = 1 \times 10^{-4} \times (1 + 1,54 \times P_{stat}^{4/3}) \times K_{st} \times V^{3/4} \times \sqrt{\frac{P_{max}}{P_{red}}} - 1 \quad (8)$$

Caso a pressão inicial estiver sub atmosférica, ou seja, fora dos limites acima mencionados, deve-se adotar a eq. (9).

$$A_{v0} = 1 \times 10^{-4} \times 1 + \left[1,54 \times \left(\frac{P_{stat} - P_{inicial}}{1 + P_{efetivo}} \right)^{4/3} \right] \times K_{st} \times V^{3/4} \times \sqrt{\frac{1}{II_{efetivo}}} - 1 \quad (9)$$

$P_{efetivo}$ equivale a $1/3 P_{inicial}$, $II_{efetivo}$ é dado pela eq. (10):

$$II_{efetivo} = \frac{(P_{red} - P_{efetivo})}{(P_{max}^E - P_{efetivo})} \quad (10)$$

Onde é utilizado a eq. (11). para definir P_{max}^E :

$$P_{max}^E = [(P_{max} + 1) \times (P_{inicial} + 1)] / (1 \text{ bar}_{abs}) \quad (11)$$

Quando a pressão do invólucro for inicialmente $< -20KPa$ a área de ventilação na eq. (12). deve ser analisada na faixa entre a pressão operacional e a pressão atmosférica, devendo ser aplicada a correção da maior área de ventilação. Assim, se a pressão inicial do invólucro for $< -20KPa$, a área mínima de ventilação pode ser calculada.

$$A_{v0} = 1,1 \times 10^{-4} \times [1 + 1,54 \times P_{stat}^{4/3}] \times K_{st} \times V^{3/4} \times \sqrt{\frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{red}}} - 1 \quad (12)$$

A norma estabelece ainda outros cinco métodos diferentes para cálculo da área de ventilação, cada um com suas limitações e tolerância, conforme item 8.2.1.2.3 até o item 8.5: A_{v1} , A_{v2} , A_{v3} e A_{v4} e A_{vf} cada qual com suas respectivas expressões:

Se $H/D \leq 2$, então $A_{v1} = A_{v0}$, para $2 < H/D \leq 6$ deve ser aplicado a eq. (13).

$$A_{v1} = A_{v0} \times \left[1 + 0,6 \times \left(\frac{H}{D} - 2 \right)^{0,75} \times \exp \left(-0,95 \times \left(\frac{P_{red}}{1 + P_{inicial}} \right)^2 \right) \right] \quad (13)$$

Será permitido estender na eq. (13), a relação H/D até 8 em silos, tremonhas e silos com alimentação superior, desde que a área de ventilação necessária, calculada após a aplicação de todos os fatores de correção, não ultrapasse a área da seção transversal do silo.

O fator de correção leva em conta a diferença geométrica do silo, a distribuição da pressão

durante uma deflagração em um silo alto e estreito é diferente de um silo baixo e largo. Em silos mais altos a chama precisa percorrer uma distância maior para queimar todo o volume de pó, durante este percurso de queima a turbulência aumenta com o movimento dos gases quentes, a velocidade de deflagração cresce resultando em um aumento mais rápido da pressão dentro do silo, portando é aplicado a eq. (13), como fator de correção, uma vez que quanto maior a relação H/D , mais energia é liberada em menos tempo.

Para considerar os efeitos adicionais de turbulência, deve-se determinar a velocidade axial do ar de acordo com a eq. (14).

$$v = \frac{Q}{A} \quad (14)$$

Sendo:

v é a velocidade axial do gás (m/s);

Q é a vazão de ar (m³/s);

A é a seção transversal média do caminho fluxo.

Quando v_{axial} ou v_{tan} for maior que 20 m/s, (A_{v2}) deverá ser determinado a partir da eq. (15), em que $\text{Max}(A, B) = \text{valor máximo entre } A \text{ ou } B$. Para maiores detalhes de aplicação das expressões, recomenda-se consultar a NPFA 68:2023.

$$A_{v2} = \left[1 + \frac{\max(v_{axial}, v_{tan}) - 20}{36} \times 0,7 \right] \times A_{v1} \quad (15)$$

Para A_{v2} pode haver uma variação conforme a eq. (16) quando houver risco de explosão de poeira em edificações. Nesse caso, então A_{v2} poderá ser calculada da seguinte forma:

$$A_{v2} = 1,7 \times A_{v1} \quad (16)$$

Deve-se ajustar a área de alívio quando a massa do alívio ultrapassar a massa limite M_T , de acordo com a eq. (17). Para tal, deve ocorrer a seguinte comparação $M > M_T$. Para determinar a M_T conforme eq. (18) Caso $M < M_T$ então $A_{v3} = A_{v2}$.

$$A_{v3} = F_{SH} \left[1 + (0,0075) \times M^{0,6} \times \left(\frac{K_{st}^{0,5}}{n^{0,3} V P_{red}^{0,2}} \right) \right] \times A_{v2} \quad (17)$$

$$M_T = \left[6,67 \times (P_{red}^{0,2}) \times (n^{0,3}) \times \left(\frac{V}{K_{st}^{0,5}} \right) \right]^{1,67} \quad (18)$$

Sendo:

F_{SH} para painéis de translação $F_{SH} = 1,0$, e para painéis articulados $F_{SH} = 1,1$;

M é a massa do painel de ventilação (kg/m^2);

n é o número de painéis;

K_{st} é o índice de deflagração (bar-m/s);

V é o volume do silo;

P_{red} é a pressão reduzida de deflagração;

A_{v2} é a área de ventilação calculada na eq. (15) ou (16).

A eq. (19) deverá ser utilizada quando a fração de volume II , X_r , puder ser determinada para o pior cenário de explosão. Nesse caso, a área de mínima ventilação pode ser calculada conforme a seguinte equação:

$$A_{v4} = A_{v3} \times X_r^{-1/3} \times \sqrt{\frac{X_r - II}{1 - II}} \quad (19)$$

Onde:

A_{v4} é a área de alívio para deflagração de volume parcial;

A_{v3} é a área de alívio para deflagração de volume total;

X_r é a fração de preenchimento $> II$;

$II = P_{red}/P_{m\acute{a}x}$: II representa o quanto a ventilação é eficaz em reduzir a pressão da explosão.

3.2.2. EN 14491:2012

A norma EN 14491:2012 estipula que as informações necessárias para o cálculo de área de ventilação são divididas em cinco partes:

a) Resistência à explosão do silo

Refere-se à capacidade estrutural do silo de resistir à pressão gerada por explosão. Essa capacidade é definida com base nos materiais de construção, espessura da chapa e reforços estruturais.

b) Características de explosão da poeira

Definidas pelo tipo de material ensilado. Relacionam-se à granulometria, concentração e taxa de inflamabilidade da poeira gerada. Dessa forma, podem ser geradas atmosferas explosivas dependendo da concentração de material disperso

(g/m³).

c) Características do corpo do silo

Incluem fatores geométricos, como a relação H/D , volume do silo e material armazenado. O próprio design do silo pode influenciar na propagação das chamas e no comportamento ou eficiência dos sistemas de supressão e de alívio de pressão.

d) Tipo de ventilação

Refere-se ao sistema adotado para controle e mitigação da pressão e liberação de gases e particulados em caso de explosão. Podem ser utilizadas válvulas de alívio, painéis de explosão e discos de ruptura, isolados ou combinados a sistemas de mitigação, como supressores de explosão à base de pós químicos, gás inerte, barreiras de isolamento de chamas, sistemas de inertização contínua dentre outros.

e) Condições da nuvem de poeira dentro do silo

Possui relação com a concentração de poeira suspensa no ar (g/m³), que pode contribuir para uma atmosfera explosiva. O fator de turbulência está associado ao movimento das partículas e à taxa de dispersão, podendo intensificar a severidade da explosão.

A relação H/D de um silo resulta em um aumento da taxa de propagação de chamas, sendo este um fator de grande impacto no dimensionamento da área de ventilação. A norma EN 14491:2012 estabelece limitação a relação de $H/D \leq 20$, conforme já apresentado na Tabela 7. Todas as partes do silo, como válvulas, visores e dutos, são expostas à pressão de explosão. Dessa forma, a resistência do componente mais fraco do projeto deve ser levada em consideração no cálculo da resistência à explosão do silo.

A norma europeia informa que, ao dimensionar as áreas de ventilação, o valor nominal da pressão de ativação estática P_{stat} pode ser utilizado como faixa de tolerância da sobre pressão de ativação estática, não excedendo $\pm 25\%$. Caso contrário, deve-se adotar o valor máximo de tolerância da sobre pressão de ativação estática.

Deve-se adotar a área de ventilação efetiva igual à área de ventilação geométrica quando o fator de eficiência de ventilação do equipamento for igual a 1,0. Caso o fator de eficiência seja menor que 1,0, a área de ventilação efetiva será menor que a geométrica. Assim, conforme a eq. (20), deve-se compensar a menor eficiência dos dispositivos de ventilação com uma área geométrica A_v maior que a área de ventilação necessária A , onde E_f é a eficiência de ventilação.

$$A_v = \frac{A}{E_f} \quad (20)$$

As equações a seguir referem-se ao item 5.2 da norma, que trata da ventilação para estruturas isoladas. São aplicações práticas que podem ser utilizadas, por exemplo, em um silo completamente cheio de uma nuvem de poeira turbulenta na concentração ideal (g/m³). Essas fórmulas devem ser aplicadas a silos individuais, desde que todas as medidas de proteção e isolamento tenham sido tomadas para evitar a propagação de chamas entre os compartimentos.

Na prática, a área de ventilação necessária pode ser dividida em várias áreas menores, desde que a área total seja igual a área de ventilação requerida. As eq. (21) a (24) apresentam duas condições: aplica-se a eq. (21) quando $0,1 \leq P_{red,max} < 1,5$ bar de sobre pressão; já para $1,5 \leq P_{red,max} \leq 2,0$ bar, deverá ser aplicado a equivalência da eq. (24).

Para os cálculos a seguir deve-se ter atenção para o Log_{10} conforme indicado pela EN 14491:2012.

$$A = B \times (1 + C \times \log H/D) \text{ em m}^2 \quad (21)$$

$$B = \left[3,264 \times 10^{-5} \times P_{max} \times K_{st} \times P_{red,max}^{-0,569} + 0,27 \times (P_{stat} - 0,1) \times P_{red,max}^{-0,5} \right] \times V^{0,753} \quad (22)$$

$$C = (-4,305 \times \log P_{red,max} + 0,758) \quad (23)$$

$$A = B \quad (24)$$

O item 5.3 da norma apresenta cálculos para área de ventilação em situações específicas. As eq. (25) a (29) podem ser utilizadas desde que os parâmetros permaneçam dentro da faixa de validade dado para estas fórmulas:

Para silos com altura $L \leq 10M$, poderá ser aplicado a eq. (25).

$$A = X(1 + Y \times \log(H/D)) \text{ dado em m}^2 \quad (25)$$

Para silos com altura $L > 10 M$, poderá ser aplicado a eq. (26).

$$A = X(1 + Y \times \log(H/D)) \text{ dado em m}^2 \quad (26)$$

Sendo X conforme eq. (27):

$$X = \left(\frac{1}{D_z} \times (8,6 \times \log P_{red,max} - 6) - 5,5 \times \log P_{red,max} + 3,7 \right) \times 0,011 \times K_{st} \times D_F \quad (27)$$

Onde temos para Y a eq. (28):

$$Y = 1,0715 \times P_{red,max}^{-1,27} \quad (28)$$

D_F representa o diâmetro do tubo de transporte e para D_z que é o diâmetro efetivo do silo pode ser calculado pela eq. (29):

$$D_z = \sqrt[3]{\frac{4 \times V}{\pi}} \quad (29)$$

Os parâmetros de validação da fórmula são apresentados no item 5.3.2. Essas equações podem ser aplicadas a silos com filtros integrados, desde que o volume envolvente dos elementos filtrantes seja menor que 5% do volume total do vaso e que a resistência à pressão desses filtros seja igual ou superior à do silo.

Para transportes pneumáticos com entrada tangencial no silo, existem cálculos empíricos que podem ser utilizados para determinar a área de ventilação A , considerando a montagem da linha de alimentação tangencialmente próxima ao topo do silo. Pode-se utilizar a mesma eq. (25) alterando apenas a metodologia de calcular X e Y conforme demonstrado nas eq. (30) e (31).

$$X = \left(\left(\frac{1}{D_z} \right) \left(\left(\frac{8,6}{k} \right) \times \log P_{red,max} - \left(\frac{K_{st}}{44} \right) - 0,513 \right) - \left(\frac{5,5}{k} \right) \times \log P_{red,max} + \left(\frac{K_{st}}{69} \right) + 0,191 \right) \times 0,011 \times K_{st} \times D_F \quad (30)$$

Para Y utilizar a eq. (32):

$$Y = 0,166 \times e^{\frac{K_{st}}{129}} \times P_{red,max}^{\frac{-1,27}{k}} \quad (31)$$

k é utilizado como um fator de ajuste empírico, corrigindo o efeito da pressão reduzida $P_{red,max}$, ou seja, a pressão que se admite internamente durante a deflagração, compensando variações não lineares observadas experimentalmente entre 0,1 s 1,7 bar. Pode-se utilizar $k = 1,0$ para $0,1 \text{ bar} \leq P_{red,max} \leq 1,0 \text{ bar}$ e $k = 2,0$ para $1,0 \text{ bar} < P_{red,max} \leq 1,7 \text{ bar}$. Os parâmetros de validação dessas equações encontram-se no item 5.3.3.

Após a revisão dos métodos de cálculo propostos pelas normas NFPA 68:2023 e EN 14491:2012, observa-se que, embora ambas tratem do mesmo princípio de proteção por alívio de pressão, suas abordagens diferem quanto aos parâmetros de entrada, faixas de aplicabilidade e

fatores de correção. Essas diferenças acabam impactando diretamente no dimensionamento final da área de ventilação e, conseqüentemente, nos custos de implantação dos sistemas de alívio. Desta forma, torna-se relevante comparar os impactos econômicos decorrentes da aplicação de cada norma, considerando as dimensões calculadas e os materiais utilizados. Nesse contexto, o estudo desenvolvido por Tascón *et al.* (2009) apresenta uma análise financeira detalhada entre as duas metodologias, permitindo compreender como as particularidades de cada norma influenciam o investimento necessário para a proteção contra explosões em silos.

3.2.3. NBR 16385:2015

Esta é a primeira edição da norma no Brasil, que trata dos sistemas de prevenção e proteção contra explosão em processos de fabricação, processamento e manuseio de partículas sólidas combustíveis, tendo como referência as outras duas normas estudadas.

Dentre os capítulos, destacam-se o 4º e o 6º, que tratam, respectivamente, dos requisitos, gerenciamento e controle para o dimensionamento, projeto e instalação dos sistemas de combate à deflagração.

Assim como nas demais normas estudadas, o primeiro passo é considerar as propriedades físico-químicas dos materiais a serem ensilados, de modo a estabelecer suas características de risco determinadas em laboratório, conforme apresentado anteriormente. Os primeiros fatores a serem observados são:

- ✓ P_{max} pressão máxima desenvolvida em uma explosão (sem alívio);
- ✓ K_{st} índice de explosividade da partícula;
- ✓ CME concentração mínima de material disperso no ar capaz de sustentar uma deflagração;
- ✓ EMI quantidade mínima de energia liberada em um ponto da mistura que faz com que a propagação de chama ocorra fora deste ponto;
- ✓ LIE menor concentração de pó combustível misturado ao ar que, abaixo desse valor, não ocasiona explosão;
- ✓ LCO concentração limite de oxigênio que, abaixo desse valor, não permite a ocorrência de incêndio ou explosão.

Para dar prosseguimento ao dimensionamento dos dispositivos de combate contra incêndio e/ou explosão, devem ser realizados estudos de risco conforme a NBR 15662:2009 que trata sobre Sistemas de prevenção e proteção contra explosão (Gerenciamento de riscos de explosões).

A NBR 16385:2015 faz referência à ISO 6184-1:2007 a qual integra uma série composta por quatro partes destinadas à caracterização dos parâmetros de explosividade e à avaliação de medidas de controle aplicáveis a atmosferas formadas por poeiras combustíveis dispersas no ar.

A norma estabelece que o relatório deve conter as seguintes informações:

- ✓ Natureza do pó;
- ✓ Distribuição do tamanho das partículas, em micrômetros;
- ✓ Conteúdo da mistura, em porcentagem por massa;
- ✓ Índice de explosão $P_{m\acute{a}x}$, em bar;
- ✓ Índice de explosão $K_{m\acute{a}x}$, em $bar \cdot m/s$;
- ✓ Concentração de pó correspondente às medições de $P_{m\acute{a}x}$ e $K_{m\acute{a}x}$;
- ✓ Qualquer desvio do procedimento de ensaio especificado na seção 4 (tais desvios são permitidos, desde que relatados de maneira exata);
- ✓ Data do ensaio;
- ✓ Temperatura ambiente no início do ensaio;

A determinação da pressão máxima é realizada por meio de ensaios abrangendo uma ampla faixa de concentrações de reagentes, o que possibilita obter o valor de $P_{m\acute{a}x}$ com precisão de $\pm 4\%$. Para a obtenção do $P_{m\acute{a}x}$ depende das condições de turbulência da mistura no momento da ignição. Para o aparelho de ensaio, essa condição é obtida com um retardo na ignição (T_v) de 0,6 s que representa o índice de turbulência, sendo um parâmetro experimental. Esse retardo corresponde a um nível específico de turbulência estabelecido pelo índice de turbulência (T_u) conforme eq. (32), influenciando no valor de $K_{m\acute{a}x}$.

$$T_u = \frac{K_{m\acute{a}x,turbulento}}{K_{m\acute{a}x,repouso}} \quad (32)$$

O índice de turbulência afeta diretamente a severidade com que o material entra em combustão. Dessa forma são obtidos dois valores distintos para $K_{m\acute{a}x}$, sendo:

$K_{m\acute{a}x,turbulento}$: índice de deflagração máximo obtido em uma mistura turbulenta;

$K_{m\acute{a}x,repouso}$: índice de deflagração máximo obtido em misturas sem turbulência (mistura estática).

A Turbulência favorece a mistura entre o pó combustível e o comburente (ar), reduzindo o gradiente de concentração e auxiliando em uma propagação mais rápida da frente de chama, resultando nos valores de teste obtendo $K_{st,m\acute{a}x}$ e $P_{m\acute{a}x}$.

O funcionamento da ventilação de deflagração é realizado por dispositivos que utilizam os

fatores e ensaios acima mencionados para determinar a pressão de ativação de alívio P_{stat} . A ventilação pode ser feita tanto por um painel quanto por uma porta ou outro dispositivo de ventilação da deflagração, conforme descrito anteriormente. Os gases pressurizados são liberados para atmosfera de forma direta ou através de dutos, resultando na pressão de deflagração reduzida P_{red} para projeto.

Dentre as tabelas apresentadas na NBR 15662:2009, vale destacar no Anexo G-1, a Tabela 8, na qual são determinantes as características de deflagração de pós-combustíveis de produtos agrícolas, em conformidade com a NFPA 68:2023. Nessa tabela, o CMI representa a concentração mínima.

Tabela 8 - Classificação de deflagração de produtos agrícolas.

Substância	Granulometria (μm)	CMI (g/m^3)	$P_{m\acute{a}x}$ (bar)	K_{st} ($\text{bar} \cdot \text{m}/\text{s}$)	Classe de perigo para pós ST
Açúcar	30	200	8,5	138	1
Açúcar cristal	< 63	30	7,3	69	1
Amido de milho	7	-	10,3	202	2
Amido de arroz	18	60	9,2	101	1
Amido de trigo	22	30	9,9	115	1
Celulose	33	60	9,7	229	2
Celulose, polpa	42	30	9,9	62	1
Cortiça	42	30	9,6	202	2
Lactose	27	60	8,3	82	1
Leite em pó	83	60	5,8	28	1
Leite desnatado seco	60	-	8,8	125	1
Madeira, farinha	29	-	10,5	205	2
Milho	28	60	9,4	75	1
Ovo, clara	17	125	8,3	38	1
Sacarose	29	60	8,2	59	1
Soja, farinha	20	200	9,2	110	1
Soro de leite	41	125	9,8	140	1
Tapioca	22	125	9,4	62	1

Fonte: NBR 16385, (2015).

Para o dimensionamento das áreas de ventilação/alívio, o Anexo A, item A.5.1.9, estabelece que os cálculos devem ser baseados nas informações contidas na NFPA 68:2023 ou EN 14491:2012.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento metodológico deste estudo fundamentou-se na análise comparativa da norma brasileira NBR 16385:2015, norte-americana NFPA 68:2023 e europeia EN 14491:2012 para o cálculo de área de ventilação para silos.

4.1. Produtos e Geometrias

A comparação proposta baseia-se nos estudos realizados por Tascon *et al.* (2016) utilizando silos de concreto classificados como: baixo, medianamente esbelto e esbelto. Essas classificações correspondem às seguintes relações geométricas altura/diâmetro (H/D):

- ✓ $H/D < 1,0$ (baixo);
- ✓ $H/D > 1,0$ e $\leq 2,0$ (medianamente esbelto);
- ✓ $H/D = 2,0$ e $2,4$ (esbelto);

4.2. Desenvolvimento do Software

Com base nos resultados e comparações obtidos, foi desenvolvido um software denominado V-Calc para o dimensionamento da área de ventilação de silos segundo as normas brasileira NBR 16385:2015, americana NFPA 68:2023 e europeia EN 1449:2012. O software foi implementado no ambiente de desenvolvimento integrado *Integrated Development Environment* – (IDE) Microsoft Visual Studio 2022, utilizando a linguagem de programação C# na plataforma .NET Framework.

O desenvolvimento da ferramenta seguiu os seguintes passos:

Detalhamento dos Requisitos:

- ✓ Listagem dos requisitos técnicos conforme cada norma estudada.
- ✓ Definição das funcionalidades do software, estruturando os cálculos de área de ventilação necessária.

Modelagem da estrutura do Software

- ✓ Definição da estrutura do software.
- ✓ Estruturação do código de acordo padrões de desenvolvimento.

Implementação e Desenvolvimento

- ✓ Elaboração das funcionalidades utilizando a linguagem C#.
- ✓ Elaboração da interface gráfica para otimizar a interação do usuário.

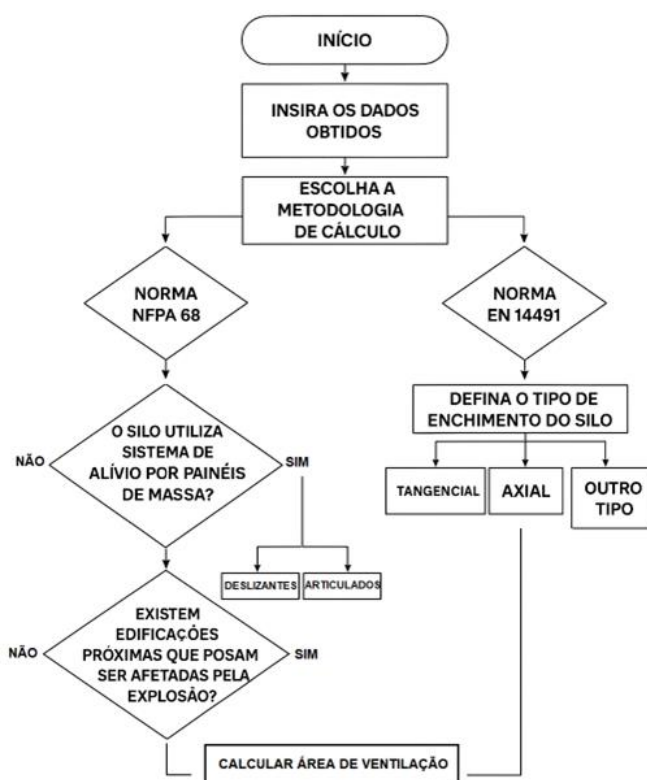
- ✓ Implementação do padrão *Model View Controller* – (MVC) para organização.

Testes e Validações

- ✓ Testes para alinhar os cálculos e funcionalidades individuais.
- ✓ Verificar a integração e funcionalidades dos módulos em conjunto.
- ✓ Validação dos resultados com base na revisão bibliográfica feita.

A Figura 22 apresenta o fluxograma que demonstra, de forma sequencial, o processo de seleção da metodologia de cálculo da área de ventilação e seus respectivos pontos de atenção. O programa também auxilia no preenchimento das informações, indicando quais são os dados mínimos necessários para a realização dos cálculos.

Figura 22 - Fluxograma do programa V-Calc para cálculo da área de ventilação conforme NFPA 68:2023 e EN 14491:2012.



Fonte: Autor.

Após o desenvolvimento do software, realizou-se a avaliação do comportamento dos produtos com maior incidência de explosões, conforme ilustrado no Gráfico 2 Zarpellon (2020). Para esse estudo, foram selecionados o farelo de soja, o milho e o trigo. Mantiveram-se constantes os parâmetros $P_{stat} = 0,1$ bar, $P_{red} = 1,0$ bar, $P_{inicial} = 0,1$ bar e o volume de 12.000 m^3 , variando apenas $P_{m\acute{a}x}$ e K_{st} de acordo com os valores apresentados na Tabela 5 do Anexo G da NFPA 68:2023. O objetivo foi verificar a influência dessas variáveis na área de ventilação necessária. vide Tabela 9.

Tabela 9 - Características geométricas dos silos conforme a relação H/D e parâmetros de explosividade do milho, trigo e farelo de soja.

Tipo	Produto	H	D	H/D	K_{st} (bar.m/s)	$P_{máx}$ (bar)
Silo Baixo	Milho	25	25	1	75	9,4
Silo Medianamente Esbelto		40	25	1,6		
Silo Esbelto		50	25	2		
Silo Esbelto		60	25	2,4		
Silo Baixo	Trigo	25	25	1	115	9,2
Silo Medianamente Esbelto		40	25	1,6		
Silo Esbelto		50	25	2		
Silo Esbelto		60	25	2,4		
Silo Baixo	Farelo de soja	25	25	1	110	9,2
Silo Medianamente Esbelto		40	25	1,6		
Silo Esbelto		50	25	2		
Silo Esbelto		60	25	2,4		

Fonte: Autor.

Após as análises sobre a área de ventilação com a variação da geometria do silo em H/D , foi analisado o comportamento da área de ventilação com a variação de P_{red} que é a pressão de projeto definida após análises laboratoriais das características de explosividade do produto. Foram mantidos os mesmos produtos analisados na Tabela 9, e os parâmetros da geometria do quarto teste para $H/D = 2,4$ variando o valor de P_{red} em: 0,1; 0,3; 1,0 e 1,8.

4.3. Proposta de uma metodologia para avaliação do volume máximo

Com caráter de proposta após a finalização das análises comparativas dos resultados obtidos por meio do software desenvolvido abre-se a possibilidade de avançar para uma abordagem exploratória. Considerando que o dimensionamento da área de alívio visa diminuir os efeitos de uma deflagração já em andamento, torna-se relevante avaliar também as condições que antecedem sua ocorrência. Desta forma, propõe-se investigar qual seria o volume máximo de produto ensilado que não proporcione uma atmosfera sujeita à deflagração. Essa análise introduz novas variáveis e fundamentos teóricos, permitindo o desenvolvimento de um método de cálculo capaz de estimar o volume mínimo necessário no instante da deflagração.

A norma NFPA 68:2023 trata sobre o índice MEC que seria a concentração mínima para que ocorra uma deflagração, mas não tem indicações de como determinar o volume mínimo de produto armazenado que possa favorecer uma explosão. Desta forma será implementado outras variáveis para preencher estas lacunas:

- a) Densidade aparente, ρ_A (kg/m³): Será utilizada para converter volume armazenado em massa de pó.

- b) Fração dispersível, f_d (%): Valor empírico, que depende do tipo de produto armazenado, ventilação e turbulência.
- c) Massa requerida em suspensão, M_{req} (kg): Massa mínima de pó suspenso para atingir o valor de MEC (g/m^3).

Para encontrar M_{req} utiliza-se a eq. (33):

$$M_{req} = MEC \cdot V_{ar}/1000 \quad (33)$$

$M_{req} = MEC \times V_{ar}/1000$, Onde V_{ar} é o volume de ar disponível no silo (m^3). O fator 1000 converte g para kg.

- d) Volume de pó requerido no armazenamento, V_{req} (m^3): Volume de pó armazenado necessário para que, se uma fração f_d for dispersa, atinja M_{req}

Para encontrar V_{req} utiliza-se a eq. (34):

$$V_{req} = \frac{M_{req}}{\rho_A} \quad (34)$$

- e) $V_{stor_{min}}$

Para encontrar $V_{stor_{min}}$ utiliza-se a eq. (35):

$$V_{stor_{min}} = \frac{V_{req}}{f_d} \quad (35)$$

$V_{stor_{min}}$, será o mesmo valor obtido em V_{req} , mas interpretado como limite crítico, se o volume armazenado for $< V_{stor_{min}}$: não atingira MEC e se o volume armazenado for $\geq V_{stor_{min}}$: possível atmosfera explosiva.

- f) Fração mínima de enchimento perigoso, $X_{stor_{min}}$ (m^3): Fração do silo preenchida a partir da qual se atinge MEC, consideração a dispersão.

Para encontrar $X_{stor_{min}}$ utilizaremos a eq. (36):

$$X_{stor_{min}} = \frac{V_{stor_{min}}}{V_{silo}} \quad (36)$$

A proposta deste trabalho não contempla, de forma explícita, as características de dispersão e turbulência inerentes ao processo de carregamento, adotando como hipótese que toda a poeira contida no volume mínimo do silo encontra-se em suspensão. Assim, considera-se uma condição de máxima severidade para o cenário de explosividade, resultando em um dimensionamento voltado para a situação mais crítica possível. Dessa forma, os resultados obtidos podem ser interpretados como um limite superior de referência para o comportamento explosivo do sistema, fornecendo uma base conservadora para o projeto e a análise de segurança.

5. RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os principais resultados obtidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho, organizados em três subseções complementares.

Na primeira subseção, é apresentada a interface do software V-Calc, destacando suas principais funcionalidades para o cálculo da área de abertura de ventilação, bem como os parâmetros de entrada exigidos e as saídas disponibilizadas ao usuário.

Em seguida, são discutidos os resultados de validação do software, por meio da comparação dos valores calculados para diferentes produtos (como milho, soja e farelo de soja) e geometrias de silos, com ênfase na influência da relação H/D e dos parâmetros de explosividade sobre a área de ventilação obtida.

Por fim, a terceira subseção aborda a avaliação da proposta de cálculo do volume mínimo, analisando seus impactos no dimensionamento das áreas de alívio e na caracterização de cenários conservadores de explosividade em silos verticais.

5.1. Programa desenvolvido V-CALC

A interface principal do software V-calc. é apresentada na Figura 23 ilustrando o que foi proposto no fluxograma da metodologia na Figura 22.

Figura 23 - Interface principal do Software V-Calc. para cálculo de área de ventilação conforme as metodologias das normas NFPA68:2023 e EN 14491:2012.

Fonte: Autor.

O layout foi organizado em seções que agrupam as variáveis de entrada conforme sua natureza: características geométricas do silo: altura diâmetro e volume e características físicas do produto armazenado que são obtidas através de análises laboratoriais. O usuário pode selecionar a norma desejada e inserir os parâmetros. O programa possui também botões de cálculo e limpeza, permitindo o processamento automático dos dados e a exibição dos resultados no campo específico.

Para a aplicação da metodologia americana, conforme a norma NFPA 68:2023, deve-se primeiramente selecionar a norma para o prosseguimento dos cálculos, conforme ilustrado na Figura 24. Caso o sistema de ventilação adotado utilize painéis de inércia, é necessário informar o tipo de mecanismo de abertura do painel (deslizante ou articulado), bem como indicar se existem edificações próximas ao silo que possam ser afetadas em caso de explosão, a fim de que o fator de risco apresentado na Equação. (16) seja utilizado. Os campos destacados em verde representam os requisitos mínimos necessários para a utilização das fórmulas primárias da norma.

Figura 24 – Preenchimento mínimo no software para utilização da metodologia americana norma NFPA 68:2023.

The screenshot shows the V-CALC software interface. On the left is a sidebar with the V-Calc logo and navigation buttons 'Início' and 'Sobre'. The main area is divided into several sections with expandable headers:

- Características do silo**: Includes 'Altura do Silo (m)', 'Diâmetro do Silo (m)', and 'Volume do Silo (m³)'. The 'Volume do Silo (m³)' field is highlighted in green.
- Características do Material Armazenado**: Includes 'KST (bar*m/s)', 'Pmax (bar)', 'Pred (bar)', and 'Pstat (bar)'. The 'KST (bar*m/s)' field is highlighted in green.
- Características de Trabalho**: Includes 'Pinit (bar)', 'Velocidade Axial (m/s)', and 'Velocidade Tangencial (m/s)'. The 'Pinit (bar)' field is highlighted in yellow.
- Características de Utilização**: Includes 'M (kg/m²)', 'N (unidades)', 'XR (%)', and 'Df (m)'. The 'M (kg/m²)' field is highlighted in green.

On the right side, there are additional settings:

- Norma Utilizada**: A dropdown menu showing 'NFPA 68' and 'EN 14491'. 'NFPA 68' is selected.
- Tipo de Painéis**: Two buttons, 'Deslizante' and 'Articulado'. 'Deslizante' is selected.
- Prédios na proximidade com risco caso haja explosão**: A checkbox that is checked.
- Buttons**: 'Calcular' and 'Limpar' buttons.

Red arrows point from the 'Volume do Silo (m³)' and 'KST (bar*m/s)' fields to the 'Norma Utilizada' dropdown, and from the 'Tipo de Painéis' buttons to the 'Prédios...' checkbox.

Fonte: Autor.

Para utilização da metodologia europeia norma EN 14491:2012, deve-se primeiramente selecionar a norma conforme ilustrado na Figura 25, e indicar o tipo de alimentação que o silo possui, pois isto está ligado diretamente na metodologia dos cálculos e preencher os campos mínimos destacados em verde para prosseguir com os cálculos.

Figura 25 - Preenchimento mínimo no software para utilização da metodologia europeia EN 14491:2012

V-CALC

Características do silo

- Altura do Silo (m)
- Diametro do Silo (m)
- Volume do Silo (m³)

Características do Material Armazenado

- KST (bar*m/s)
- Pmax (bar)
- Pred (bar)
- Pstat (bar)

Características de Trabalho

- Pinit (bar)
- Velocidade Axial (m/s)
- Velocidade Tangencial (m/s)

Características de Utilização

- M (kg/m²)
- N (unidades)
- XR (%)
- Df (m)

Norma Utilizada

NFPA 68 **EN 14491**

Tipo de Alimentação utilizada

Tangencial Axial Outro

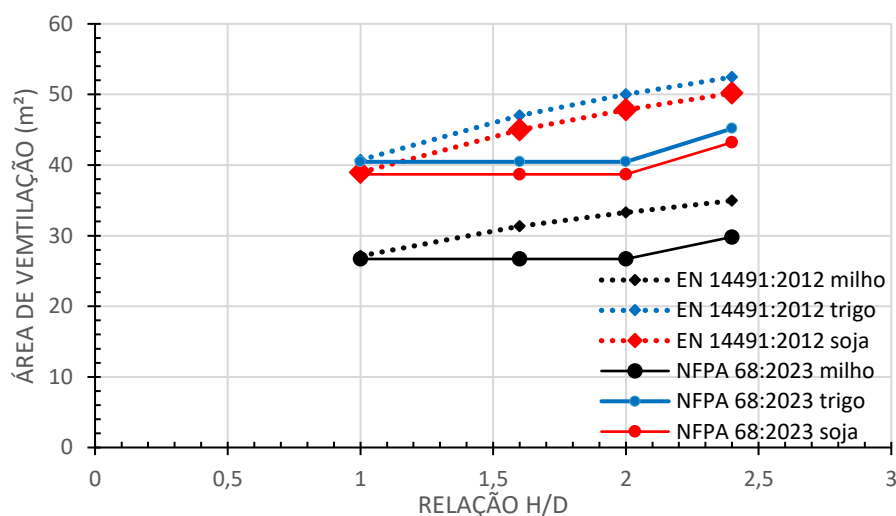
Calcular Limpar

Fonte: Autor.

5.2. Validação dos resultados e comparação para diferentes produtos e geometria de silos

Após a descrição da interface inicial do software e da identificação dos campos necessários para a correta utilização de cada metodologia, procede-se à etapa de aplicação prática prevista. Nesta fase, o programa desenvolvido foi utilizado para calcular a área de alívio necessária conforme Tabela 10 e posteriormente elaborado o Gráfico 3.

Gráfico 3 – Resultados de área de alívio de pressão (m²) utilizando o programa V-Calc. Comparação entre NFPA 68:2023 e EN 14491:2012, para os seguintes produtos: Milho, Trigo e Farelo de soja.



Fonte: Autor.

Tabela 10 - Resultados para área de alívio de pressão conforme metodologia das normas NFPA 68:2023 e EN 14491:2012, para os produtos: Milho, Trigo e Farelo de soja.

Produto	Tipo	H/D	Área (m ²)	
			NFPA 68:2023	EN 14491:2012
Milho	silo baixo	1,0	26,70	27,13
	medianamente esbelto	1,6	26,70	31,33
	silo esbelto	2,0	26,70	33,31
	silo esbelto	2,4	29,82	34,96
Trigo	silo baixo	1,0	40,46	40,72
	medianamente esbelto	1,6	40,46	47,02
	silo esbelto	2,0	40,46	50,01
	silo esbelto	2,4	45,17	52,46
Farelo de soja	silo baixo	1,0	38,70	38,95
	medianamente esbelto	1,6	38,70	44,98
	silo esbelto	2,0	38,70	47,84
	silo esbelto	2,4	43,21	50,18

Fonte: Autor.

Os resultados foram obtidos por meio da aplicação das equações (8) e (13) da norma NFPA 68:2023, bem como da equação (21) e de suas complementares (22) e (23) da norma EN 14491:2012.

Conforme ilustrado no Gráfico 3, verifica-se que a área de ventilação calculada segundo a NFPA 68:2023 não é afetada até a relação $H/D = 2,0$. Por outro lado, de acordo com a EN 14491:2012, a área de ventilação aumenta progressivamente com o incremento da relação H/D para ambos os produtos analisados.

Para mostrar a aplicação do programa, estão apresentados os cálculos para a determinação das aberturas de ventilação necessária para diferentes relações de H/D .

- **NFPA 68:2023**

- Silo baixo $H/D = 1,0$:

$$A_{v0} = 1 \times 10^{-4} \times \left(1 + 1,54 \times 0,1^{\frac{4}{3}}\right) \times 110 \times 12.000^{3/4} \times \sqrt{\frac{9,2}{1,0}} - 1 = 38,70 \text{ m}^2$$

A mesma fórmula e resultados são obtidos para o segundo e o terceiro ensaio apresentados na Tabela 9, uma vez que a equação (8) da NFPA 68:2023 não considera a relação H/D , apenas para equação (13) é levado em consideração quando $H/D > 2,0$. Para esta aplicação deve ser considerado o item 8.2.2.4 da norma americana pois valores para $P_{inicial} < 0,2$ deve ser considerado $P_{inicial} = 0,0$.

- Silo esbelto $H/D = 2,4$:

$$A_{v1} = 38,7 \times \left[1 + 0,6 \times \left(\frac{60}{25} - 2 \right)^{0,75} \times \exp \left(-0,95 \times \left(\frac{1,0}{1 + 0,0} \right)^2 \right) \right]$$

$$= 43,21 \text{ m}^2$$

Para a norma europeia EN 14491:2012 todas as suas formulas levam em consideração a relação H/D , desta forma obtivemos valores diferentes e crescentes para todos os testes.

- **EN 14491:2012**

- Silo baixo $H/D = 1,0$:

$$C = (-4,305 \times \log 1,0 + 0,758) = 0,76$$

$$B = [3,264 \times 10^{-5} \times 9,2 \times 110 \times 1,0^{-0,569} + 0,27 \times (0,1 - 0,1) \times 1,0^{-0,5}]$$

$$\times 12.000^{0,753} = 38,95$$

$$A = 38,95 \times (1 + 0,76 \times \log 25/25) = 38,9542 \text{ m}^2$$

- Silo medianamente esbelto $H/D = 1,6$:

$$C = (-4,305 \times \log 1,0 + 0,758) = 0,76$$

$$B = [3,264 \times 10^{-5} \times 9,2 \times 110 \times 1,0^{-0,569} + 0,27 \times (0,1 - 0,1) \times 1,0^{-0,5}]$$

$$\times 12.000^{0,753} = 38,95$$

$$A = 38,95 \times (1 + 0,76 \times \log 40/25) = 44,98 \text{ m}^2$$

- Silo Esbelto $H/D = 2,0$:

$$C = (-4,305 \times \log 1,0 + 0,758) = 0,76$$

$$B = [3,264 \times 10^{-5} \times 9,2 \times 110 \times 1,0^{-0,569} + 0,27 \times (0,1 - 0,1) \times 1,0^{-0,5}]$$

$$\times 12.000^{0,753} = 38,95$$

$$A = 38,95 \times (1 + 0,76 \times \log 50/25) = 47,84 \text{ m}^2$$

- Silo Esbelto $H/D = 2,4$:

$$C = (-4,305 \times \log 1,0 + 0,758) = 0,76$$

$$B = [3,264 \times 10^{-5} \times 9,2 \times 110 \times 1,0^{-0,569} + 0,27 \times (0,1 - 0,1) \times 1,0^{-0,5}]$$

$$\times 12.000^{0,753} = 38,95$$

$$A = 38,95 \times (1 + 0,76 \times \log 60/25) = 50,18 \text{ m}^2$$

Conforme apresentado na Figura 26 ao utilizar a norma NFPA 68:2023 observou-se que a relação H/D não teve impacto para valores $\leq 2,0$. Já para o quarto teste, com $H/D = 2,4$, foi aplicada a eq. (13). Utilizada como fórmula de correção para silos esbeltos, uma vez que, quanto

maior essa relação, maior será a área de alívio de pressão. Isso ocorre porque a esbeltez do silo favorece a aceleração das chamas, resultando em deflagração de maior intensidade.

Figura 26 - Calculo de área de alívio de pressão NFPA 68:2023 utilizando o método da eq.(8).

The screenshot shows the V-CALC software interface. On the left is a sidebar with the V-Calcul logo and navigation buttons for 'Início' and 'Sobre'. The main area is divided into several sections for input data:

- Características do silo:**
 - Altura do Silo (m): [empty]
 - Diametro do Silo (m): [empty]
 - Volume do Silo (m³): 12000
- Características do Material Armazenado:**
 - KST (bar*m/s): 110
 - Pmax (bar): 9,2
 - Pred (bar): 1,0
 - Pstat (bar): 0,1
- Características de Trabalho:**
 - Pinit (bar): [empty]
 - Velocidade Axial (m/s): [empty]
 - Velocidade Tangencial (m/s): [empty]
- Características de Utilização:**
 - M (kg/m²): [empty]
 - N (unidades): [empty]
 - XR (%): [empty]
 - Df (m): [empty]

On the right side, there are additional settings:

- Norma Utilizada:** NFPA 68 (selected) and EN 14491.
- Tipo de Painéis:** Deslizante and Articulado.
- ☐ Prédios na proximidade com risco caso haja explosão
- Buttons:** Calcular and Limpar.
- Result:** Formula 1 - Av0 é: 38,70M²

Fonte: Autor.

Neste próximo passo que consiste em avaliar o efeito da variação de P_{red} . Essa etapa possibilitou investigar como alterações desse parâmetro influenciaram no dimensionamento final da área de ventilação, possibilitando compreender o comportamento do sistema de alívio em diferentes cenários. Foram utilizados os dados do farelo de soja do 4º teste com $H/D = 2,4$, conforme Tabela 9 de acordo com o desenvolvimento abaixo:

- **NFPA 68:2023**

- Para $P_{red} = 0,1$

$$A_{v0} = 1 \times 10^{-4} \times \left(1 + 1,54 \times 0,1^{\frac{4}{3}}\right) \times 110 \times 12.000^{3/4} \times \sqrt{\frac{9,2}{0,1}} - 1 = 128,90 \text{ m}^2$$

$$A_{v1} = 128,90 \times \left[1 + 0,6 \times \left(\frac{60}{25} - 2\right)^{0,75} \times \exp\left(-0,95 \times \left(\frac{1,0}{1 + 0,0}\right)^2\right)\right] = 167,44 \text{ m}^2$$

- Para $P_{red} = 0,3$

$$A_{v0} = 1 \times 10^{-4} \times \left(1 + 1,54 \times 0,1^{\frac{4}{3}}\right) \times 110 \times 12.000^{3/4} \times \sqrt{\frac{9,2}{0,3}} - 1 = 73,60 \text{ m}^2$$

$$A_{v1} = 73,60 \times \left[1 + 0,6 \times \left(\frac{60}{25} - 2\right)^{0,75} \times \exp\left(-0,95 \times \left(\frac{1,0}{1 + 0,0}\right)^2\right)\right] = 93,99 \text{ m}^2$$

- Para $P_{red} = 1,0$

$$A_{v0} = 1 \times 10^{-4} \times \left(1 + 1,54 \times 0,1^{\frac{4}{3}}\right) \times 110 \times 12.000^{3/4} \times \sqrt{\frac{9,2}{1,0}} - 1 = 38,70 \text{ m}^2$$

$$A_{v1} = 38,70 \times \left[1 + 0,6 \times \left(\frac{60}{25} - 2\right)^{0,75} \times \exp\left(-0,95 \times \left(\frac{1,0}{1 + 0,0}\right)^2\right)\right] = 43,21 \text{ m}^2$$

- Para $P_{red} = 1,8$

$$A_{v0} = 1 \times 10^{-4} \times \left(1 + 1,54 \times 0,1^{\frac{4}{3}}\right) \times 110 \times 12.000^{3/4} \times \sqrt{\frac{9,2}{1,8}} - 1 = 27,40 \text{ m}^2$$

$$A_{v1} = 27,40 \times \left[1 + 0,6 \times \left(\frac{60}{25} - 2\right)^{0,75} \times \exp\left(-0,95 \times \left(\frac{1,0}{1 + 0,0}\right)^2\right)\right] = 27,78 \text{ m}^2$$

- **EN 14491:2012**

- Para $P_{red} = 0,1$

$$C = (-4,305 \times \log 0,1 + 0,758) = 5,06$$

$$B = [3,264 \times 10^{-5} \times 9,2 \times 110 \times 0,1^{-0,569} + 0,27 \times (0,1 - 0,1) \times 0,1^{-0,5}] \times 12.000^{0,753} \\ = 114,40$$

$$A = 114,40 \times (1 + 5,06 \times \log 60/25) = 422,36 \text{ m}^2$$

- Para $P_{red} = 0,3$

$$C = (-4,305 \times \log 0,3 + 0,758) = 3,01$$

$$B = [3,264 \times 10^{-5} \times 9,2 \times 110 \times 0,3^{-0,569} + 0,27 \times (0,1 - 0,1) \times 0,3^{-0,5}] \times 12.000^{0,753} \\ = 77,28$$

$$A = 77,28 \times (1 + 3,01 \times \log 60/25) = 165,69 \text{ m}^2$$

- Para $P_{red} = 1,0$

$$C = (-4,305 \times \log 1,0 + 0,758) = 0,76$$

$$B = [3,264 \times 10^{-5} \times 9,2 \times 110 \times 1,0^{-0,569} + 0,27 \times (0,1 - 0,1) \times 1,0^{-0,5}] \times 12.000^{0,753}$$
$$= 38,95$$
$$A = 38,95 \times (1 + 0,76 \times \log 60/25) = 50,18 \text{ m}^2$$

▪ Para $P_{red} = 1,8$

$$C = (-4,305 \times \log 1,8 + 0,758) = -0,34$$
$$B = [3,264 \times 10^{-5} \times 9,2 \times 110 \times 1,8^{-0,569} + 0,27 \times (0,1 - 0,1) \times 1,8^{-0,5}] \times 12.000^{0,753}$$
$$= 27,88$$
$$A = 27,88 \times (1 + (-0,34) \times \log 60/25) = 24,26 \text{ m}^2$$

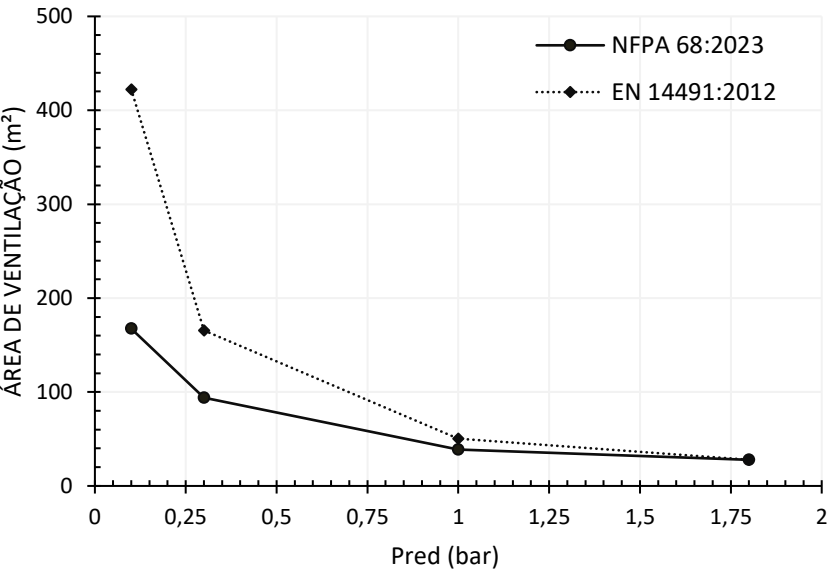
Para valores de $1,5 \leq P_{red} \leq 2,0$ utilizar $A = B$. Desta forma a área será de 27,88 m².
Os resultados são apresentados conforme Tabela 11 e Gráfico 4 a seguir:

Tabela 11 - Valores de área de ventilação conforme metodologia das normas NFPA 68:2023 e EN 14491:2012 variando o valor de P_{red} .

P_{red} (bar)	Área (m²)	
	NFPA 68:2023	EN 14491:2012
0,1	167,44	422,36
0,3	93,99	165,69
1,0	38,70	50,18
1,8	27,78	27,88

Fonte: Autor.

Gráfico 4 - Valores de área de ventilação conforme metodologia das normas NFPA 68:2023 e EN 14491:2012 variando o valor de P_{red} .



Fonte: Autor.

A análise dos resultados demonstrou uma redução acentuada da área de ventilação à medida que P_{red} aumenta, comportamento observado para ambas as normas, quanto mais o valor de P_{red} se aproxima de P_{stat} maior será a área de proteção por conta do volume de pressão que deve ser extravasado em relação ao tempo, à medida que P_{red} é elevada, a área requerida diminui de forma não linear. Observa-se que a norma EN 14491:2012 apresentou valores mais elevados de área para valores de P_{red} mais baixos, evidenciando um caráter mais conservador. À medida que o valor vai aumentando até o quarto teste os resultados das normas vão convergindo em $H/D = 2,4$.

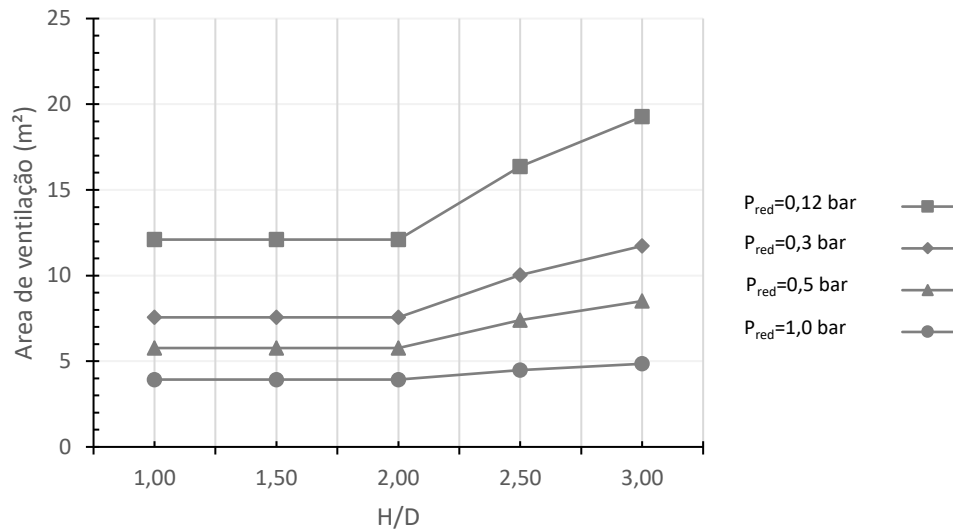
5.3. Análise Comparativa e Verificação Computacional

Com o objetivo de verificar a aderência do modelo computacional implementado, procedeu-se à reprodução dos resultados apresentados por Tascón *et al.* (2009) por meio do software V-Calc. Para essa análise, foram mantidos fixos os parâmetros: volume do silo de 1000 m³, índice de explosividade $K_{st} = 81 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$, pressão máxima de explosão $P_{máx} = 7,5 \text{ bar}$ e pressão estática de abertura do painel $P_{stat} = 0,1 \text{ bar}$, considerando-se como produto ensilado o milho. A avaliação foi conduzida variando-se a pressão reduzida admissível P_{red} nos valores de 0,12; 0,3; 0,5 e 1,0 bar, bem como a razão geométrica H/D nos valores de 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0. Os resultados obtidos foram comparados diretamente com aqueles reportados por Tascón *et al.* (2009), permitindo a análise da diferença percentual e a verificação do grau de confiabilidade.

A partir das simulações realizadas no software V-Calc, foram elaborados dois conjuntos de representações gráficas distintas: o primeiro baseado na metodologia de dimensionamento estabelecida pela NFPA 68:2023, e o segundo conforme os critérios de cálculo previstos na EN 14491:2012. Em ambas as abordagens, mantiveram-se inalterados os parâmetros geométricos e operacionais adotados por Tascón *et al.* (2009), garantindo a equivalência das condições de contorno e a comparabilidade direta dos resultados.

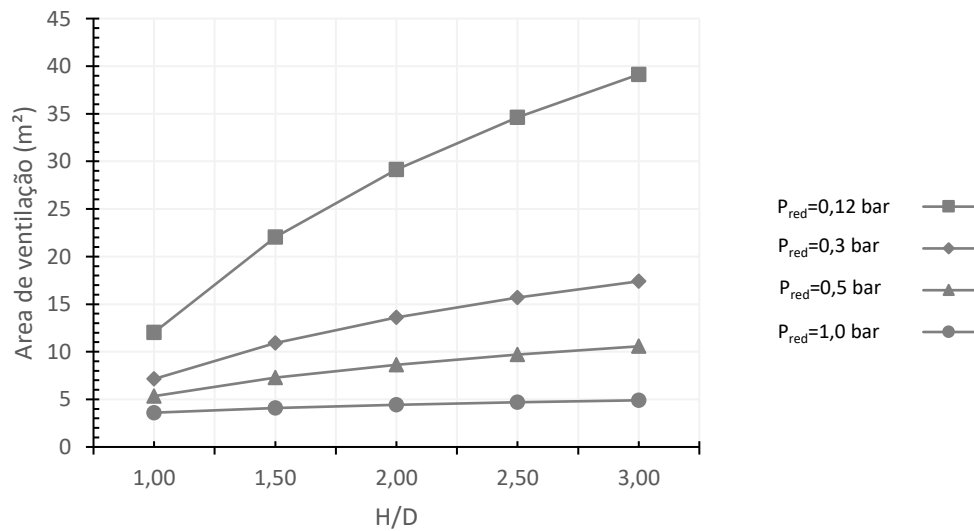
A análise do Gráfico 5 e Gráfico 6 demonstrou a reprodução integral dos valores reportados pelo referido autor, tanto em termos de magnitude quanto de tendência de variação em função de P_{red} e da razão H/D . Tal concordância confirma a correta implementação das formulações normativas no software desenvolvido, além de evidenciar a confiabilidade do modelo computacional empregado para o dimensionamento das áreas de alívio de explosão.

Gráfico 5 - Área de ventilação (m^2) em função da relação H/D para diferentes valores de P_{red} , conforme NFPA 68:2023.



Fonte: Autor.

Gráfico 6 - Área de ventilação (m^2) em função da relação H/D para diferentes valores de P_{red} , conforme EN 14491:2012.



Fonte: Autor.

A Tabela 12 evidenciou diferença percentual nula (0,0%) em todos os cenários avaliados, tanto para a metodologia da NFPA 68:2023 quanto para a EN 14491:2012, demonstrando coincidência integral entre os resultados.

Tabela 12 - Verificação e comparação das áreas de ventilação calculadas pelo autor e por Tascon (2009), segundo as normas NFPA 68 e EN 14491 versus com os valores obtidos pelo software V-Calc., com análise da diferença percentual para avaliação da confiabilidade dos resultados.

NFPA 68:2023																
Autor							Tascon (2009)					Diferença de percentual				
Produto milho		H/D					H/D					H/D				
		1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3
		Área (m²)					Área (m²)					Verificação				
Pred	0,12	12,1	12,1	12,1	16,36	19,27	12,1	12,1	12,1	16,36	19,27	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	0,3	7,56	7,56	7,56	10,04	11,73	7,56	7,56	7,56	10,04	11,73	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	0,5	5,34	7,27	8,64	9,71	10,57	5,34	7,27	8,64	9,71	10,57	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	1,0	3,6	4,08	4,42	4,69	4,9	3,6	4,08	4,42	4,69	4,9	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

EN14491:2012																
Autor							Tascon (2009)					Diferença de percentual				
Produto milho		H/D					H/D					H/D				
		1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3
		Área (m²)					Área (m²)					Verificação				
Pred	0,12	12,03	22,03	29,13	34,63	39,13	12,03	22,03	29,13	34,63	39,13	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	0,3	7,14	10,93	13,61	15,69	17,40	7,14	10,93	13,61	15,69	17,40	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	0,5	5,34	7,27	8,64	9,71	10,57	5,34	7,27	8,64	9,71	10,57	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	1,0	3,60	4,08	4,42	4,69	4,90	3,60	4,08	4,42	4,69	4,90	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Autor.

5.4. Avaliação da proposta de uma metodologia para avaliação do volume mínimo

Após a finalização das análises comparativas das áreas de ventilação dos produtos propostos na metodologia e demais comportamentos com a variação de parâmetros, partiremos para a verificação numérica da hipótese do menor volume ensilado que possa ser favorável a deflagração.

Utilizaremos o milho como modelo numérico que possui em média $\rho_A = 750 \text{ kg/m}^3$ conforme Coelho et al. (2018) e iremos variar o valor de f_d em 1%, 3%, 5% e 7%. Conforme Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros adotados para a hipótese de cálculo variando a porcentagem de material levantado em pó f_d .

Parâmetro	Unidade	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
f_d (material levantado em pó)	%	1	3	5	7
Volume do silo	m³	10.000			
MEC	g/m³	30			
Peso específico	kg/m³	750			

Fonte: Autor.

- **Teste 1**

$$M_{req} = 30 \times \frac{V_{ar}}{1000} = 300 \text{ kg}$$

$$V_{req} = \frac{300}{750} = 0,4 \text{ m}^3$$

$$V_{stor_{min}} = \frac{0,4}{0,01} = 40 \text{ m}^3$$

$$X_{stor_{min}} = \frac{40}{10.000} = 0,004 \text{ (0,4\%)}$$

- **Teste 2**

$$M_{req} = 30 \times \frac{V_{ar}}{1000} = 300 \text{ kg}$$

$$V_{req} = \frac{300}{750} = 0,4 \text{ m}^3$$

$$V_{stor_{min}} = \frac{0,4}{0,03} = 13,33 \text{ m}^3$$

$$X_{stor_{min}} = \frac{13,33}{10.000} = 0,00133 \text{ (0,13\%)}$$

- **Teste 3**

$$M_{req} = 30 \times \frac{V_{ar}}{1000} = 300 \text{ kg}$$

$$V_{req} = \frac{300}{750} = 0,4 \text{ m}^3$$

$$V_{stor_{min}} = \frac{0,4}{0,05} = 8,0 \text{ m}^3$$

$$X_{stor_{min}} = \frac{8,0}{10.000} = 0,0008 \text{ (0,08\%)}$$

- **Teste 4**

$$M_{req} = 30 \times \frac{V_{ar}}{1000} = 300 \text{ kg}$$

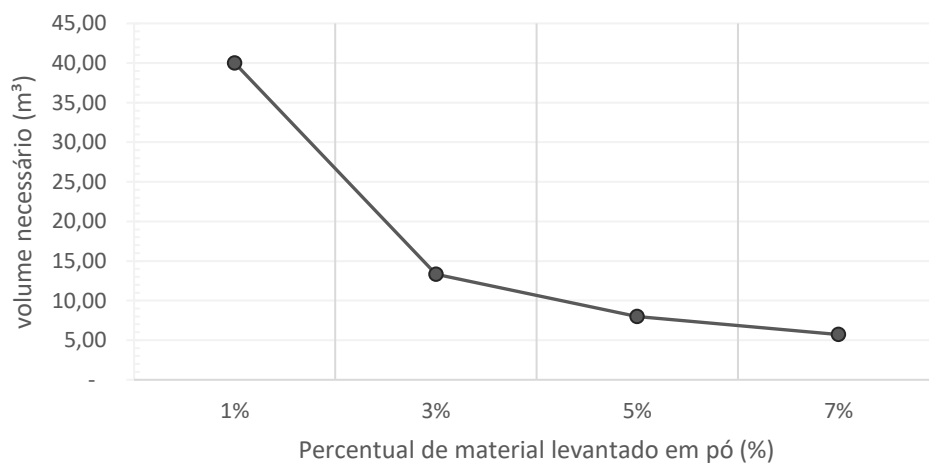
$$V_{req} = \frac{300}{750} = 0,4 \text{ m}^3$$

$$V_{stor_{min}} = \frac{0,4}{0,07} = 5,71 \text{ m}^3$$

$$X_{stor_{min}} = \frac{5,71}{10.000} = 0,000571 \text{ (0,0571\%)}$$

O Gráfico 7 apresenta a relação entre o percentual de material levantado em pó e o volume mínimo de produto armazenado capaz de gerar uma atmosfera com concentração igual ou superior à MEC. Conforme o teste 1º apenas 1% de material pulverulento em suspensão, seria necessário aproximadamente 40 m³ de produto armazenado, que corresponde a 0,4% do volume total do silo, para proporcionar uma nuvem potencialmente explosiva. À medida que o percentual de material em pó aumenta para 3%, 5% e 7% o volume necessário de produto armazenado reduz-se de forma significativa, demonstrando uma tendência inversamente proporcional entre as variáveis.

Gráfico 7 - Volume mínimo necessário (m³) em função da porcentagem de material levantado em pó (f_a), conforme hipótese adotada nos testes paramétricos.



Fonte: Autor.

O ponto mais sensível para esta hipótese é o f_d , pois não existe um valor tabelado nas principais normas. Trata-se de um fator empírico, uma vez que nem toda a massa armazenada pode se tornar nuvem; ou seja, apenas uma fração é aerossolizável, formada por partículas finas menores que $420 \mu m$, conforme estabelecido na norma NFPA 68:2023.

Essa variável também depende do tipo de enchimento, pois, conforme o produto cai dentro do silo e se choca contra o fundo e as paredes da unidade armazenadora, ocorre a geração de partículas que atingem essa granulometria. Além disso, a umidade do material exerce influência, visto que, quanto maior o teor de umidade, menor será a dispersão, já que o produto tende a se aglomerar.

6. CONCLUSÕES

As normas NFPA 68:2023 e EN 14491:2012 apresentaram comportamentos distintos, a norma americana mantém a área de ventilação constante para $H/D \leq 2,0$, aplicando correção apenas para silos esbeltos $H/D > 2,0$, enquanto a EN 14491:2012 apresenta valores superiores em todos os cenários analisados.

A EN 14491:2012 apresenta caráter mais conservador, resultando em áreas de alívio maiores, influenciada também pelo limite mínimo de $P_{stat} = 0,1$ bar, diferentemente da NFPA 68:2023, que admite valores menores, corroborando com resultados já observados por Tascon (2009).

Ambas as normas apresentam tendência semelhante na variação de P_{red} , porém pequenas alterações nesse parâmetro impactam significativamente o dimensionamento, reforçando a importância de sua correta definição em projeto.

Os resultados obtidos pelo software V-Calc apresentaram concordância com os valores de referência de Tascón *et al.* (2009) confirmando a consistência da metodologia implementada no software. Além disso não houve variação nos resultados demonstrando precisão e aderência aos fundamentos teóricos e normativos.

Para a determinação do volume máximo ensilado que não resultasse na formação de atmosfera explosiva, a metodologia adotada fundamentou-se na consideração do cenário de maior severidade de explosividade, estabelecendo uma hipótese de caráter conservador para o dimensionamento. Essa abordagem assegurou que os limites definidos representassem uma condição crítica de referência, contribuindo para a robustez e a confiabilidade da análise de segurança.

Como trabalhos futuros, propõe-se a utilização de simulações numéricas do escoamento de gases e do comportamento do material particulado por meio de CFD (*Computational Fluid*

Dynamics) Dinâmica dos Fluidos Computacional, acoplada ao Método dos Elementos Discretos (DEM), com o objetivo de verificar e validar as formulações propostas pelas normas técnicas, bem como os resultados de ensaios reportados na literatura internacional. Esse acoplamento permite representar de forma mais realista a interação fluido-partícula (produto), possibilitando a avaliação dos efeitos da dispersão do pó, da geração de turbulência, da propagação da chama e da evolução temporal da pressão durante a explosão, aspectos que não são plenamente capturados por modelos empíricos ou simplificados.

7. REFERÊNCIAS

ABBASI, Tasneem; ABBASI, S. A. **Dust explosions-Cases, causes, consequences, and control**. Journal of Hazardous Materials, 9 fev. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.11.007>

ASME BPVC III. **ASME Boiler e Pressure Vessel Code**. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/717591279/Asme-Bpvc-III-d-1-Nf-2015>. Acesso em: 24 Mar. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Requisitos para programas de gerenciamento de riscos de explosão em projetos industriais e comerciais, visando prevenção e proteção contra explosões**. ABNT NBR 15662, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Sistemas de prevenção e proteção contra explosão — Fabricação, processamento e manuseio de partículas sólidas combustíveis — Requisitos**. ABNT NBR 16385, Rio de Janeiro, 2015

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

BENEDETTO; SARLI; RUSSO. **On the determination of the minimum ignition temperature for dust air mixtures**. Chemical Engineering Transactions, v. 19, p. 189-194, 2010.

CEN, EN 14491. Eurocode. **Dust Explosion Venting Protective Systems**. European Committee for Standardization, 2012.

COELHO, E. M; et al. **Propriedades Físicas de Diferentes Grãos de Milho**. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE PÓS-COLHEITA, 7., 2018, Londrina. *Anais...* Londrina: ABRAPÓS, 2018. p. 423-428. Disponível em: https://eventos.abrapos.org.br/anais/paperfile/910_20181103_02-32-38_806.pdf. Acesso em: 10 nov. 2025.

CONAB. **Levantamento de Safra de Grãos - Conab**. Disponível em: <https://www.gov.br/fazenda/pt-br/central-de-conteudo/publicacoes/conjuntura-economica/agricola/2025/2025-04-11levantamento-de-safras.pdf>. Acesso em: 9 fev. 2026.

CROWL, Daniel A. **Understanding explosions**. New York: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 2003.

CROWL, JF Louvar. **Chemical process safety: fundamentals with applications**. Disponível em: <https://archive.org/details/chemicalprocesss0000crow/page/732/mode/2up>. Acesso em: 17 abr. 2025.

DIAMOND, Jared. **Armas, germes e aço: os destinos das sociedades humanas**. 2010.

ECKHOFF, Rolf K. **Dust Explosions in the Process Industries** 2003.

ECKHOFF, Rolf K. **Dust Explosion Prevention and Mitigation, Status and Developments in Basic Knowledge and in Practical Application**. International Journal of Chemical Engineering, Volume 2009, Article ID 569825, 12 pages, 2009. <https://doi.org/10.1155/2009/569825>

EIKO, Camila; NAMBA, Yazawa. **Estudo de Prevenção de Acidentes por Explosões Verticais para Abastecimento de Cereais**. XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2011.

HOCHST, S.; LEUCKEL, W. **On the effect of venting large vessels with mass inert panels**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 11, p. 89-97, 1998. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2025.105670>

REMBE. **Como são utilizados os painéis de alívio de explosão? – Blog Rembe América Latina**. Disponível em: <https://rembe.com.br/blog/2023/05/04/como-sao-utilizados-os-paineis-de-alivio-de-explosao/>. Acesso em: 17 abr. 2025.

WAMGROUP. **Válvulas de Alívio e Pressão de Mola Carregada VCP**. Disponível em: <https://valves.wamgroup.com/pt/wamvalves/product-detail/VCP-V%C3%A1lvulas-de-Al%C3%ADvio-e-Press%C3%A3o-de-Mola-Carregada>. Acesso em: 17 abr. 2025.

DIGISENSOR. **Dispositivos de alívio de pressão para riscos de explosão industrial - Digisensor Proteção Contra Incêndio e Explosão**. Disponível em: <https://www.digisensor.com.br/dispositivos-de-alivio-de-pressao-para-riscos-de-explosao-industrial/>. Acesso em: 17 abr. 2025.

DIGISENSOR. **Laboratório para Testes de Explosividade - Digisensor Proteção Contra Incêndio e Explosão**. Disponível em: <https://www.digisensor.com.br/laboratorio-para-testes-de-explosividade/>. Acesso em: 17 abr. 2025.

MASCOTIND. **Explosion Protection Solutions Fike offers both a... | Mascot Industries - Vadodara**. Disponível em: <https://www.mascotind.co.in/latest-update/explosion-protection-solutions-fike-offers-both-a/17>. Acesso em: 17 abr. 2025.

SIEBERT. **Alívio de explosão - Siebert & Cia**. Disponível em: <https://www.siebert.com.br/solucoes-rembe/alivio-de-explosao/>. Acesso em: 17 abr. 2025.

ZORTEA. **Portfólio - Zortéa Construções LTDA**. Disponível em: <https://zortea.com.br/en/portfolio/#lg=3&slide=3>. Acesso em: 19 mai. 2025.

IBGE. **Pesquisa de Estoques número 2 julho/dezembro 2024**. Disponível em: [https://ftp.ibge.gov.br/Estoque/Pesquisa_de_Estoques_\[semestral\]/2024_2_semestre/MS_2_semestre2024.pdf](https://ftp.ibge.gov.br/Estoque/Pesquisa_de_Estoques_[semestral]/2024_2_semestre/MS_2_semestre2024.pdf). Acesso em: 20 set. 2025

LEES P. FRANK. **Lees' loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment, and control**. 1996

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA). **NFPA 68**: Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting. 2023 ed. Quincy: NFPA, 2023. Disponível em: <https://www.nfpa.org>. Acesso em: 19 mai. 2025.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA). **NFPA 654**: Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting. 2020 ed. Quincy: NFPA, 2020. Disponível em: <https://www.nfpa.org>. Acesso em: 19 mai. 2025.

OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION (OSHA). **Hazard Communication Guidance for Combustible Dusts**. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/863912940/Combustible-dust-OSHA>. Acesso em: 19 mai. 2025.

P. E. Pascon. **Sistemas de Proteção contra Explosão**. Processos e Soluções de Engenharia, 2017. Disponível em: https://www.processos.eng.br/wp-content/uploads/2017/07/sistemas_de_protecaoo.pdf. Acesso em: 11 nov. 2024.

PERELLI ET AL. **Analysis of Dust Fires and Explosions in the Food Processing Industry**. Chemical Engineering Transactions, v. 104, p. 169–174, 2023. <https://doi.org/10.3303/CET23104029>

SAFARAIN E HARRIS. **Design and Construction of Silos and Bunkers**, 1985.

TASCÓN, Alberto; AGUADO, Pedro J. **CFD Simulations To Study Parameters Affecting Dust Explosion Venting in Silos**. Powder Technology, v. 272, p. 132–141, 1 mar. 2015. [10.1016/j.powtec.2014.11.031](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.11.031)

TASCÓN, Alberto; AGUADO, Pedro J; RAMÍREZ, Alvaro. **Dust Explosion Venting in silos: A Comparison of Standards NFPA 68 and EN 14491**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 22, n. 2, p. 204–209, mar. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2008.12.006>

VIJAYARAGHAVAN, G. **Impact assessment, modelling, and control of dust explosions in chemical process industries**. Gest. Prod., São Carlos, v. 23, n. 3, p. 503-514, 2016. <https://doi.org/10.1590/0104-530X1324-15>

ZARPELLON, Luís; MOREJON, Camilo. **Estudo Prospectivo dos Incêndios e Explosões em Unidades Industriais de Beneficiamento e Armazenamento de Grãos no Estado do Paraná**. Revista FLAMMAE XVIII Seminário Nacional de Bombeiros – Foz do Iguaçu PR, Vol.04 Nº11 - Edição Especial XVIII SENABOM - ISSN 2359-4829, 2018. <https://10.17648/2359-4837/flammae.v4n11.p155-169>

ZARPELLON, Luís Eduardo. **Tecnologia alternativa para a secagem de grãos com efeito técnico inovador que maximiza o desempenho e minimiza o risco de incêndios**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Engenharia e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Toledo, 2020. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/5699>. Acesso em 18 set. 2025.