

ESTUDO DE EXPLOSÃO EM SILOS VERTICAIS DE CONCRETO

Leonardo Andreu da Costa¹, Andrés Batista Cheung²

¹Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Campo Grande, Brasil
(leonardo.andreu@ufms.br)

²Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Campo Grande, Brasil

Resumo: Estudo comparativo entre NFPA 68:2018 e EN 14491:2012 no dimensionamento de áreas de alívio para explosões em silos verticais. Resultados mostram que a EN 14491 prevê áreas maiores, sobretudo em silos esbeltos, por critérios mais conservadores. Destaca-se a influência de P_{stat} e P_{pred} no dimensionamento, reforçando a importância de ajustes criteriosos para segurança e eficiência.

Palavras-chave: Ventilação em silos; Explosão em silos; Alívio de pressão; Explosão de poeira.

INTRODUÇÃO

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) vem confirmando a perspectiva de uma safra recorde de grãos, agora estimada em 330,3 milhões de toneladas. Nesta safra, a Conab prevê uma produção de 167,9 milhões de toneladas, resultado 20,1 milhões de toneladas superior à safra passada, com 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 por esses sistemas de armazenamento, é de suma importância o conhecimento de todas as variáveis e ações que atuam sobre eles, visando à produção de 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 9.424 estabelecimentos ativos no primeiro semestre de 2024 (IBGE, 2024), evidenciando a consolidação da região Sul do Brasil como a de maior capacidade de armazenamento.

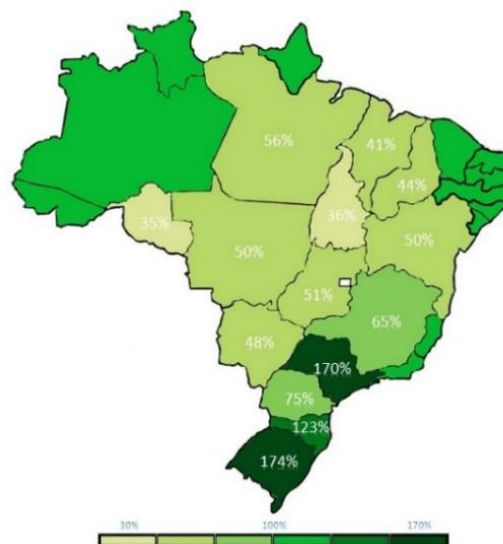


Figura 1. Capacidade de armazenamento / Produção de grãos (%).

A Tabela 1 apresenta a quantidade de unidades armazenadoras em todo o território nacional, destacando, conforme mostrado na 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.

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. A poeira gerada durante a movimentação, o processamento ou a armazenagem de produtos pode

formar misturas inflamáveis no ar, representando um perigo significativo, especialmente em ambientes confinados. 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 essa concentração.

Tabela 1. Quantidade de unidades armazenadoras no território nacional e capacidade estática (t), conforme dados do IBGE (2024).

Região	Quantidade de UA	Capacidade de armazenagem UA (t)
Sul	4.170	80.175.255
Centro-Oeste	3.037	94.526.208
Sudeste	1.220	23.498.475
Nordeste	506	13.597.673
Norte	491	10.503.518
Total	9.424	222.301.129

Nesse contexto, Vijayaraghavan (2004) realizou um levantamento detalhado dos registros de explosões com poeiras em suspensão. Os estudos mostraram 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 que cobrem o período de 1911 a 2004, documentando diversos acidentes relacionados à presença de partículas em suspensão.

Além disso, conforme apresentado por Zarpellon (2018), dados coletados pelo sistema de registro de ocorrências e estatísticas do Corpo de Bombeiros — SYSBM — estimam uma média de 281,6 incêndios por ano. Durante esse período, a região Sul, mais precisamente os estados do Rio Grande do Sul e Paraná, lideram em número de unidades armazenadoras e, conseqüentemente, apresentam mais ocorrências anuais.

Observando o estado do Paraná, que é o segundo com maior volume de unidades armazenadoras, registrou-se um total de 495 casos de incêndios entre 2005 e 2017, de acordo com Zarpellon (2018), conforme apresentado na (Figura 3). As maiores incidências ocorrem nos meses de fevereiro e março, que correspondem ao período da colheita da soja, e entre julho e agosto, período relacionado à colheita do milho.

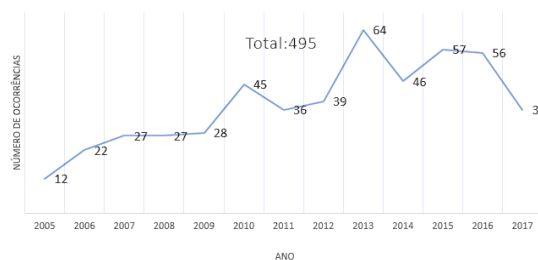


Figura 3. Registros de incêndios no estado do Paraná entre 2005 e 2017.

Devido a todo o processo de beneficiamento dentro das unidades de grãos, que envolve tratamentos mecânicos e químicos, os grãos passam por diversos compartimentos destinados à limpeza e à secagem. Entre esses compartimentos, destacam-se os silos, transportadores de correia, elevadores e sistemas de transporte por túneis. Durante esse percurso, os grãos sofrem processos abrasivos que geram partículas finas. Essas partículas, ao longo de todo o circuito da unidade, tendem a se acumular em diferentes áreas. Devido ao seu tamanho reduzido, a energia necessária para a ignição (e, conseqüentemente, para que ocorram explosões) é extremamente baixa, tornando as instalações de beneficiamento particularmente vulneráveis a incidentes relacionados à poeira em suspensão.

A NFPA 654:2020 e a NFPA 68:2018 estabelecem que qualquer material sólido com diâmetro igual ou inferior a 420 μm é considerado uma 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, p. 35).

Para um dimensionamento adequado, devem ser verificados inicialmente os parâmetros de explosividade do material ensilado. O índice K_{st} (Dust Deflagration Index) é um parâmetro utilizado para avaliar a severidade de explosões de poeira em ambientes confinados. Esse índice é determinado experimentalmente em laboratório, utilizando um recipiente padronizado (geralmente câmaras de 1 m^3 ou esferas de 20 litros) conforme ilustrado na (Figura 4), de acordo com a NBR 6184-1:2007, e calculado pela Equação 1:

$$K = \left(\frac{dp}{dt}\right)_m \times V^{1/3} \quad (1)$$

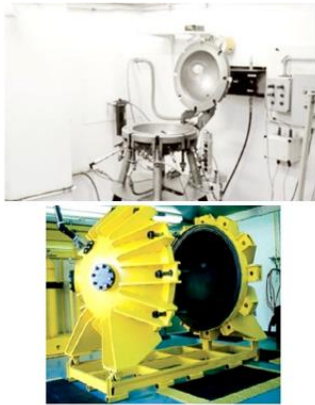


Figura 4. Esfera de 20 L e câmara de 1 m³ para determinação de parâmetros de explosividade de pós combustíveis.

O índice K_{st} pode variar conforme o volume do recipiente utilizado nos testes. Para padronizar e permitir comparações entre diferentes volumes, a fórmula aplica 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.

Os testes laboratoriais também fornecem os seguintes parâmetros:

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;

Concentração mínima de explosividade da mistura ar-combustível, representado por Eckhoff (2003);

Percentual de material combustível em uma determinada parcela de poeira;

Análise da dimensão de partícula – define a distribuição do tamanho das partículas da amostra em conjunto com medições estatísticas;

MEI – Energia mínima para ignitar o pó-combustível;

MIT-Cloud – fornece uma medida relativa de inflamabilidade da poeira,

P_{red} – Máxima pressão de deflagração de alívio

$P_{máx}$ – Máxima pressão sem alívio.

A (Figura 5) apresenta o comportamento da pressão interna de um vaso de pressão durante uma explosão. O projeto inclui duas linhas de referência: a primeira corresponde à pressão de abertura de alívio, denominada P_{stat} , que é calculada para o rompimento da membrana de alívio ou ativação do sistema.

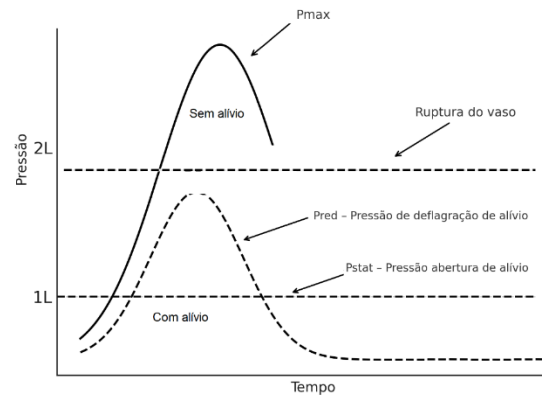


Figura 5. Comportamento da pressão interna do vaso ao longo do tempo, com e sem alívio.

Conforme apresentado na (Figura 6), os principais produtos que lideram as ocorrências de explosões e incêndios são também os mais produzidos no Brasil. O milho representa mais de 50% de todos os casos, sendo o grão mais perigoso, seguido da soja, com pouco mais de 20% (Pereira, 2018).

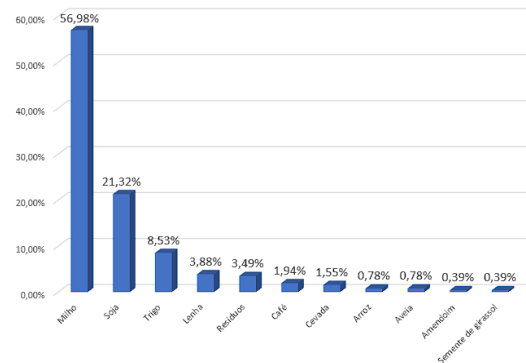


Figura 6. Influência do tipo de produto nas ocorrências de incêndios e explosões.

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 (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. 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.

Nesse contexto, as unidades armazenadoras apresentam 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.

Dessa forma, este estudo busca compreender o modelo de dimensionamento de sistemas de alívio de pressão para combater e mitigar os possíveis danos gerados por explosões em silos, em consonância com o 9º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Além disso, relaciona-se também 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 contribui para manter a integridade dos alimentos armazenados, prevenindo perdas.

Este estudo tem como objetivo entender as variações na área de alívio de pressão, comparando as normas EN 14491:2012 e NFPA 68:2018.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada neste estudo fundamenta-se na análise comparativa entre a norma norte-americana NFPA 68:2018 e a norma europeia EN 14491:2012. O objetivo principal é compreender a variação no dimensionamento da área de alívio de pressão em silos de concreto, considerando os efeitos da pressão residual resultante P_{pred} , bem como fixar um valor para P_{pred} e simular alteração na pressão estática P_{stat} , que esta relacionada aos dispositivos de alívio de pressão.

Características do silo analisado:

- **Material ensilado:** Farelo de soja
- $K_{st} = 110 \text{ bar.m/s}$
- $P_{m\acute{a}x} = 9,2 \text{ bar}$
- **Altura do silo** = 40 m
- **Diâmetro do silo** = 25m
- **H/D** = 1,6
- **V** = 15.700m³

Conforme Tabela 2. Será estabelecido 4 valores para P_{pred} , para ambas as normas e utilizaremos o valor de $P_{stat} = 0,1$ posteriormente, faremos a fixação do valor de $P_{pred} = 0,3$ e faremos variações no valor de P_{stat} para entender como cada um afeta a área de ventilação necessária para o dimensionamento para silos.

Tabela 2. Variações de P_{stat} e P_{pred}

Testes	P_{pred}	P_{stat}
Teste 1	0,1	0,05
Teste 2	0,3	0,08
Teste 3	0,6	0,1
Teste 4	0,9	0,12

Utilizou-se o software Mathcad 15 da PTC (Parametric Technology Corporation) para a execução das equações das normas analisadas.

A pesquisa adotou uma abordagem mista, envolvendo métodos qualitativos e quantitativos. A abordagem qualitativa baseou-se na revisão bibliográfica das normas mencionadas, enquanto a quantitativa fundamentou-se na aplicação dos cálculos previstos por essas normas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As equações utilizadas foram extraídas, respectivamente, da norma americana NFPA 68:2018 e da norma europeia EN 14491:2012.

$$A_{v0-NFPA} = 1 \times 10^{-4} \times (1 + 1,54 \times P^{4/3}_{stat}) \times K_{st} \times V^{3/4} \times \sqrt{\frac{P_{max}}{P_{red}}} - 1 \quad (2)$$

Para a utilização desta equação, a pressão inicial $P_{inicial}$ deve ser verificada e estar entre -0,2 bar e 0,2 bar, ou seja, não pode estar elevada nem subatmosférica. Caso contrário, devem ser utilizadas as equações apresentadas no item 8.2.1.2.-NFPA. Além disso, a equação é válida para $H/D \leq 2,0$; caso o valor esteja entre $2 < H/D \leq 6$, deve-se aplicar a Equação 3.

Vale ressaltar que a NFPA 68:2018 considera a Equação 3 como um fator de correção, pois silos mais esbeltos ($H/D > 2,0$) funcionam como um canal para aceleração vertical, aumentando a velocidade de propagação da chama. Assim, será necessária uma área de ventilação maior.

$$A_{v1} = A_{v0} = [1 + 0,6 \times \left(\frac{H}{D} - 2\right)^{0,75} \times \exp\left(-0,95 \times \left(\frac{P_{red}}{1+P_{inicial}}\right)^2\right)] \quad (3)$$

Para a norma europeia teremos:

$$A = B \times (1 + C \times \log H/D) \quad (4)$$

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

$$C = (-4,305 \times \log P_{red,max} + 0,758) \quad (6)$$

A Equação 4 deverá ser utilizada quando a pressão máxima de P_{pred} for $0,1 \leq P_{pred,m\acute{a}x} < 1,5$ bar, se P_{pred} for $1,5 \leq P_{pred,m\acute{a}x} < 2,0$ bar então $A = B$.

Seguindo para os cálculos, utilizando os valores da Tabela 2. para norma americana variando o valor de P_{pred} obtemos:

$$A_{v0=1 \times 10^{-4}} \times (1 + 1.54 \times P_{stat}^{4/3}) \times K_{st} \times V^{3/4} \times \sqrt{\frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{red}} - 1} = 157.70$$

$$A_{v0=1 \times 10^{-4}} \times (1 + 1.54 \times P_{stat}^{4/3}) \times K_{st} \times V^{3/4} \times \sqrt{\frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{red}} - 1} = 90.04$$

$$A_{v0=1 \times 10^{-4}} \times (1 + 1.54 \times P_{stat}^{4/3}) \times K_{st} \times V^{3/4} \times \sqrt{\frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{red}} - 1} = 62.58$$

$$A_{v0=1 \times 10^{-4}} \times (1 + 1.54 \times P_{stat}^{4/3}) \times K_{st} \times V^{3/4} \times \sqrt{\frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{red}} - 1} = 50.20$$

Para variação de P_{stat} da norma americana obtemos:

$$A_{v0=1 \times 10^{-4}} \times (1 + 1.54 \times P_{stat}^{4/3}) \times K_{st} \times V^{3/4} \times \sqrt{\frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{red}} - 1} = 86.42$$

$$A_{v0=1 \times 10^{-4}} \times (1 + 1.54 \times P_{stat}^{4/3}) \times K_{st} \times V^{3/4} \times \sqrt{\frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{red}} - 1} = 88.49$$

$$A_{v0=1 \times 10^{-4}} \times (1 + 1.54 \times P_{stat}^{4/3}) \times K_{st} \times V^{3/4} \times \sqrt{\frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{red}} - 1} = 90.04$$

$$A_{v0=1 \times 10^{-4}} \times (1 + 1.54 \times P_{stat}^{4/3}) \times K_{st} \times V^{3/4} \times \sqrt{\frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{red}} - 1} = 91.69$$

Conforme item 5.2 da norma EN 14491:2012 P_{stat} deve estar entre $0,1 \text{ bar} \leq P_{stat} \leq 1 \text{ bar}$; para $P_{stat} < 0,1 \text{ bar}$, utilizar $P_{stat} = 0,1 \text{ bar}$. Para a norma europeia obtemos para variação de P_{pred} :

$$c = (-4.305 \times \text{Log}(P_{red}) + 0.758) = 5.06$$

$$B = [(3.264 \times 10^{-5}) \times (P_{m\acute{a}x} \times K_{st} \times P_{red}^{-0.569}) + 0.27 \times (P_{stat} - 0.1) \times P_{red}^{-0.5}] \times V^{0.753} = 176.78$$

$$A_{EN} = B \times \left(1 + C \times \text{Log}\left(\frac{H}{D}\right)\right) = 359.48$$

$$c = (-4.305 \times \text{Log}(P_{red}) + 0.758) = 3.01$$

$$B = [(3.264 \times 10^{-5}) \times (P_{m\acute{a}x} \times K_{st} \times P_{red}^{-0.569}) + 0.27 \times (P_{stat} - 0.1) \times P_{red}^{-0.5}] \times V^{0.753} = 94.61$$

$$A_{EN} = B \times \left(1 + C \times \text{Log}\left(\frac{H}{D}\right)\right) = 152.72$$

$$c = (-4.305 \times \text{Log}(P_{red}) + 0.758) = 1.71$$

$$B = [(3.264 \times 10^{-5}) \times (P_{m\acute{a}x} \times K_{st} \times P_{red}^{-0.569}) + 0.27 \times (P_{stat} - 0.1) \times P_{red}^{-0.5}] \times V^{0.753} = 63.78$$

$$A_{EN} = B \times \left(1 + C \times \text{Log}\left(\frac{H}{D}\right)\right) = 86.08$$

$$c = (-4.305 \times \text{Log}(P_{red}) + 0.758) = 0.95$$

$$B = [(3.264 \times 10^{-5}) \times (P_{m\acute{a}x} \times K_{st} \times P_{red}^{-0.569}) + 0.27 \times (P_{stat} - 0.1) \times P_{red}^{-0.5}] \times V^{0.753} = 50.63$$

$$A_{EN} = B \times \left(1 + C \times \text{Log}\left(\frac{H}{D}\right)\right) = 60.51$$

Para variação de P_{stat} da norma Europeia obtemos:

$$c = (-4.305 \times \text{Log}(P_{red}) + 0.758) = 3.01$$

$$B = [(3.264 \times 10^{-5}) \times (P_{m\acute{a}x} \times K_{st} \times P_{red}^{-0.569}) + 0.27 \times (P_{stat} - 0.1) \times P_{red}^{-0.5}] \times V^{0.753} = 94.61$$

$$A_{EN} = B \times \left(1 + C \times \text{Log}\left(\frac{H}{D}\right)\right) = 152.72$$

$$c = (-4.305 \times \text{Log}(P_{red}) + 0.758) = 3.01$$

$$B = [(3.264 \times 10^{-5}) \times (P_{m\acute{a}x} \times K_{st} \times P_{red}^{-0.569}) + 0.27 \times (P_{stat} - 0.1) \times P_{red}^{-0.5}] \times V^{0.753} = 94.61$$

$$A_{EN} = B \times \left(1 + C \times \text{Log}\left(\frac{H}{D}\right)\right) = 152.72$$

$$c = (-4.305 \times \text{Log}(P_{red}) + 0.758) = 3.01$$

$$B = [(3.264 \times 10^{-5}) \times (P_{m\acute{a}x} \times K_{st} \times P_{red}^{-0.569}) + 0.27 \times (P_{stat} - 0.1) \times P_{red}^{-0.5}] \times V^{0.753} = 94.61$$

$$A_{EN} = B \times \left(1 + C \times \text{Log}\left(\frac{H}{D}\right)\right) = 152.72$$

$$c = (-4.305 \times \text{Log}(P_{red}) + 0.758) = 3.01$$

$$B = [(3.264 \times 10^{-5}) \times (P_{m\acute{a}x} \times K_{st} \times P_{red}^{-0.569}) + 0.27 \times (P_{stat} - 0.1) \times P_{red}^{-0.5}] \times V^{0.753} = 108.85$$

$$A_{EN} = B \times \left(1 + C \times \text{Log} \left(\frac{H}{D}\right)\right) = 175.70$$

Desta forma podemos organizar os resultados conforme (Figura 7 e 8).

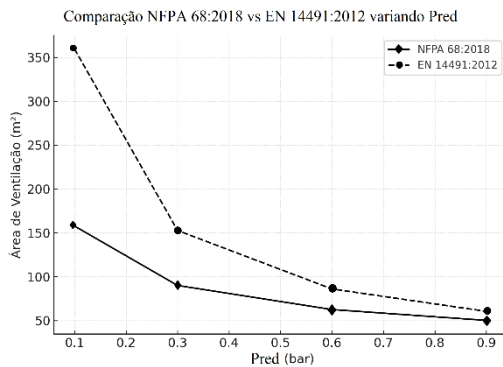


Figura 7. Comparação NFA 68:2018 vs EN 14491:2012 variando o valor de P_{pred} .

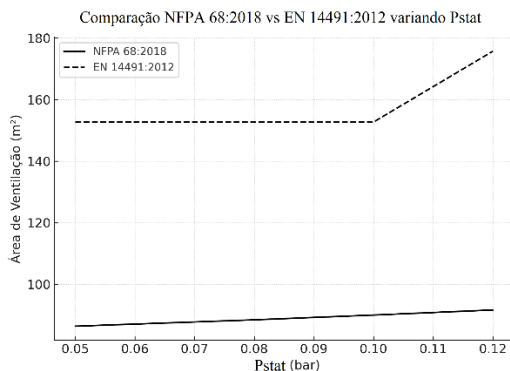


Figura 8. Comparação NFA 68:2018 vs EN 14491:2012 variando o valor de P_{stat} .

A (Figura 7) demonstra que os valores obtidos pela norma EN 14491:2012 são consistentemente maiores que os da NFA 68:2018. Isso se deve a uma abordagem mais conservadora da norma europeia, que inclui fatores rigorosos para geometrias esbeltas (H/D elevado) e deflagrações intensas. Tornando-se mais viável a utilização quando $(H/D)=1,0$.

Observou-se que o aumento de P_{stat} implica maior área de ventilação, pois reduz a sensibilidade do acionamento dos dispositivos, exigindo compensação pela maior energia liberada. Por outro lado, o aumento de P_{pred} permite uma área menor, já que se tolera maior pressão residual.

As diferenças evidenciam a influência das metodologias normativas no dimensionamento dos sistemas de alívio de explosão. Ambas as normas

integram fatores de correção para a relação altura/diâmetro (H/D) e limites de validade específicos para a pressão inicial, o que reforça a necessidade de selecionar adequadamente a norma de referência em função das características do processo, dos requisitos regulatórios e da análise de risco.

Ao analisar os cálculos, observa-se um comportamento característico da área de ventilação em função das variáveis P_{stat} e P_{pred} . O aumento de P_{stat} em ambas as normas, resulta no aumento da área de ventilação requerida. Esse comportamento está associado à redução da sensibilidade de disparo do dispositivo de alívio: ao se permitir uma pressão estática de ruptura mais alta, ocorre um atraso na abertura do painel, exigindo uma área adicional para compensar o aumento da energia liberada durante a deflagração. Em outras palavras, um P_{stat} mais elevado implica a necessidade de maior capacidade de alívio, a fim de garantir a contenção segura dos efeitos da explosão.

Para ambas as normas, o aumento de P_{pred} (pressão de explosão reduzida admissível no recipiente protegido) leva à redução da área de ventilação calculada. Isso ocorre porque, ao se permitir um limite superior de pressão residual no interior do equipamento, reduz-se a necessidade de uma área de alívio tão extensa. Especificamente, tolerar um valor mais elevado de P_{stat} implica aceitar maiores esforços internos durante o evento, permitindo a redução proporcional da área de ventilação necessária para manter a explosão contida dentro do limite especificado.

Essas relações reforçam a importância de uma abordagem criteriosa no ajuste dos parâmetros de projeto, considerando não apenas os requisitos normativos, mas também o equilíbrio entre desempenho de segurança, integridade estrutural do equipamento e custo de implantação do sistema de alívio.

CONCLUSÃO

A comparação entre os resultados obtidos pelas normas NFA 68:2018 e EN 14491:2012 evidencia diferenças significativas no dimensionamento das áreas de alívio para explosões em silos, especialmente em cenários com relações altura/diâmetro elevadas. Os valores sistematicamente superiores calculados pela EN 14491:2012 refletem uma abordagem mais conservadora, que busca mitigar os efeitos do aumento na velocidade de propagação da chama em geometrias esbeltas, por meio de fatores de correção mais rigorosos. Soma-se a isso o fato de o primeiro teste apresentar o menor valor de P_{pred} , o que, aliado à relação (H/D) , resultou em um valor bastante



conservador para a norma europeia em comparação com a norma americana.

Conforme item 5.2 da norma EN 14491:2012 P_{stat} deve estar entre $0,1 \text{ bar} \leq P_{stat} \leq 1 \text{ bar}$; para $P_{stat} < 0,1 \text{ bar}$, utilizar $P_{stat} = 0,1 \text{ bar}$, desta forma para a análise de P_{stat} fixando o valor de $P_{red} = 0,3$ não tivemos alteração nos três primeiros testes.

Além disso, os resultados demonstraram a sensibilidade do dimensionamento em função dos parâmetros de projeto. O aumento do valor de P_{stat} implicou a elevação da área de ventilação calculada, uma vez que reduz a sensibilidade de acionamento do dispositivo, exigindo maior capacidade de alívio para compensar o atraso na ruptura. Por outro lado, o aumento do valor de P_{pred} resultou na redução da área necessária, pois admite maiores pressões residuais no interior do recipiente protegido.

Esses resultados reforçam a importância de uma análise criteriosa na definição dos parâmetros de projeto, considerando não apenas os requisitos normativos e regulatórios, mas também as características geométricas do equipamento, as propriedades dos pós combustíveis e o equilíbrio entre segurança operacional e viabilidade econômica. Adotar uma metodologia de dimensionamento alinhada às condições específicas do processo é essencial para garantir a proteção adequada contra explosões, evitando tanto o superdimensionamento excessivo quanto o comprometimento da integridade estrutural e da segurança dos operadores.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Eficiência Energética e Sustentabilidade – Curso de Mestrado Profissional, pelo apoio institucional concedido ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABBASI, T., & ABBASI, S. A. Dust explosions: cases, causes, consequences, and control. **Journal of Hazardous Materials**, 140(1-2), 7-44. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.11.007>>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6184-1**: Sistemas de proteção contra explosão – Parte 1: Determinação dos índices de explosão de misturas ar/combustível em equipamentos fechados. Rio de Janeiro, 2019.

CONAB: **Acompanhamento da safra brasileira, grãos safra 2024/25 7º**

Levantamento da Safra de Grãos. Disponível em: <<https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-graos-e-estimada-em-330-3-milhoes-de-toneladas-na-safra-2024-25>>. Acesso em 17 abr. 2025.

CROWL, D. A. **Understanding Explosions.** New York: Wiley-AIChE, 2003. p. 22

ECKHOFF, Rolf K. **Dust explosions in the process industries.** 3. ed. Amsterdam: Gulf Professional Publishing, 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14491:2012.** Dust explosion venting protective systems. Brussels: CEN, 2012.

IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Pesquisa de Estoques janeiro/junho 2024, Disponível em: <https://ftp.ibge.gov.br/Estoque/Pesquisa_de_Estoques_%5Bsemestral%5D/2024_1_semestre/BR_1_semestre2024.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2025.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 68:2018.** Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting. Quincy, MA: NFPA, 2018.

PEREIRA, Marcos Aurélio Alves. **Análise de incêndios em unidades armazenadoras de produtos agrícolas com base em dados do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais.** 2018. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Acesso: 30 set. 2024.

VIJAYARAGHAVAN, G. **Impact assessment, modelling, and control of dust explosions in chemical process industries** (Dissertação de mestrado). Department of Chemical Engineering, Coimbatore Institute of Technology, Coimbatore 2004.

ZARPELLON, L. E.; MOREJON, C. F. M.. Estudo prospectivo dos incêndios e explosões em unidades industriais de beneficiamento e armazenamento de grãos o estado do Paraná. **Revista FLAMMAE**: Revista Científica do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco, Foz do Iguaçu - PR, Vol. 04, Nº 11, pg. 155–169, nov. de 2018, Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/slideshow/estudo-prospectivo-dos-incndios-e-exploeses-em-unidades-industriais-de-beneficiamento-e-armazenamento-de-gros-no-estado-do-paran/129066301>>- edicao-atual-3. Acesso em: 17 abr. 2025.