



Gerenciamento dos riscos durante o armazenamento de materiais agrícolas em silos.

ROSA Ana Carolina¹, LACASTA Ana Maria², HAURIE Laia², HADDAD Assed¹

1 Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil

2 Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona School of Building Construction, Av. Doctor Marañón 44, 08028 Barcelona, Spain

Informações do Artigo

Histórico:

Recebimento: 26 Outubro 2018

Revisão: 21 Novembro 2018

Aprovação: 21 Dezembro 2018

Palavras-chave:

Silos

Riscos

Explosões

Incêndios

Smoldering

Materiais agrícolas

Resumo:

Devido à alta produtividade de materiais agrícolas, o armazenamento de grãos em estruturas, como silos, tem sido frequentemente estimulado. Apesar dos silos apresentarem grandes benefícios em relação à qualidade e conservação do produto, o armazenamento realizado nestas estruturas está suscetível a diversos riscos. Este trabalho visa efetuar o levantamento dos riscos mais críticos em um silo, os quais estão relacionados ao processo de combustão do material armazenado. Dentre os principais riscos existentes estão os incêndios com chamas e sem chamas (smoldering), explosões com gases e explosões com poeiras. A probabilidade de um determinado risco se desenvolver depende exclusivamente das características do material armazenado, assim como da coexistência dos fatores necessários a cada cenário de risco. A novidade do trabalho consiste na apresentação de uma análise qualitativa dos cenários de incêndios e explosões, utilizando como ferramenta a árvore de falhas. Após a identificação dos principais riscos e análise dos fatores necessários para desencadear os cenários de incêndios e explosões, aplicou-se qualitativamente a ferramenta de árvore de falhas para averiguar os principais eventos intermediários e básicos visando compreender holisticamente os eventos que desencadeiam acidentes de incêndios e explosões, e assim promover informações básicas para especificação de dispositivos de segurança.

1. Introdução

Com a elevada taxa de produção de materiais agrícolas, estes são estocados temporariamente em armazéns ou estruturas próprias para o armazenamento, visando a conservação e a qualidade dos produtos armazenados até sua destinação final para os consumidores. Os silos podem ser descritos como vasos utilizados para o armazenamento de materiais particulados. Geralmente os silos são estruturas com grandes

dimensões, os quais podem ser empregados para o armazenamento em longo prazo de matérias-primas ou produtos. Estes podem ser construídos com diferentes materiais, como metal, concreto, alvenaria ou madeira. Milho, arroz, soja, trigo, dentre outros, são exemplos de grãos comumente armazenados em estruturas metálicas como silos. O comportamento desses materiais durante o armazenamento é diretamente influenciado pelas propriedades intrínsecas de cada grão, como por exemplo,

umidade, densidade, porosidade, tamanho das partículas dos grãos, além das propriedades físicas e mecânicas. Durante este armazenamento, diversos riscos podem ocorrer em instalações com silos. Do ponto de vista da segurança ambiental estão os riscos relacionados à combustão do material, como incêndios e explosões.

De acordo com a norma NFPA 704 [1], os materiais agrícolas apresentam diferentes níveis de combustibilidade que favorecem o desenvolvimento de incêndios e explosões, sendo estes influenciados pelas propriedades físicas e químicas do material armazenado. Dentre as propriedades, um fator que exibe grande influência na taxa de combustão é o tamanho de partícula do grão. Quanto menor o tamanho do grão, maior a área superficial, logo a taxa de combustão será maior. Os acidentes envolvendo incêndios e explosões são extremamente perigosos e podem se alastrar por toda a instalação.

Incêndios e explosões em silos ocorrem frequentemente ao longo dos anos, especialmente em instalações de armazenamento de grãos agrícolas. Ambos os riscos estão diretamente relacionados, um pode anteceder ou suceder o outro [2–5].

2. Manuseio e armazenamento de grãos

O manuseio dos grãos envolve diversas atividades desde a recepção dos grãos até o descarregamento do silo. Inclui o manuseio mecânico com várias máquinas e equipamentos, controle de insetos e pragas, monitoramento e controle do ecossistema de armazenamento, recepção dos grãos e saneamento [6]. A sequência de etapas como limpeza, secagem, dentre outras, visam garantir a qualidade do produto até a sua comercialização. Logo, após a colheita dos grãos é essencial que os grãos passem por uma etapa de secagem para serem carregados nos silos com o baixo teor de umidade, de modo a prevenir a infestação por fungos, insetos e a autoignição nos grãos.

De acordo com Krause [7], alguns incêndios acontecem porque os produtos foram armazenados com o teor de umidade elevado, a água presente nos grãos pode apresentar um efeito promotor na ignição e assim desencadear um incêndio dentro do silo. Portanto, caso o produto a ser armazenado seja um material orgânico é importante que este seja rejeitado se a umidade for superior a 16%.

Os silos metálicos são dotados de alguns dispositivos conectados a abertura do topo e da base para auxiliar as etapas de carregamento e descarregamento como elevadores e esteiras. Adicionalmente, para efetuar o monitoramento dos produtos armazenados podem ser utilizados medidores de temperatura e de nível localizados em diversos pontos dentro do silo, indicando qualquer variação na temperatura e no nível que desenvolva qualquer cenário de risco.

3. Riscos associado com o armazenamento de grãos

O manuseio e o armazenamento de grãos estão suscetíveis a diversos riscos relacionados à combustão do material armazenado. Segundo Krause [7], existem três possíveis substâncias capazes de inflamar: gases inflamáveis ou combustíveis, nuvens de poeira e uma camada de material granular ou particulado. O primeiro é produzido durante alguma reação química do material armazenado e o segundo pode ser provocado devido a atividades normais como preenchimento e esvaziamento do silo. A etapa de manuseio pode promover o atrito entre os grãos e desagrega-los em partículas com diâmetros menores como poeira de grãos. Esta característica pode favorecer a formação de nuvens de poeira e também facilitar o início de um processo de combustão devido ao aumento da área de superfície das partículas [8, 9].

Como citado anteriormente, dentre os riscos de incêndios e explosões, um pode desencadear o outro. Entretanto, existem algumas diferenças entre esses dois tipos de fenômeno. Segundo Crowl [10], a diferença depende do período de tempo em que os eventos ocorrem. Incêndios são

eventos que ocorrem mais devagar devido a sua taxa de combustão ser mais lenta. Em comparação, as explosões são eventos de curta duração com liberação súbita de energia, ou seja, a taxa de combustão é mais rápida. Para corroborar a ideia de tempo, Rein [11] explicou a diferença básica entre os riscos, nos incêndios observamos como as chamas se espalham sobre o material e nas explosões analisamos como as chamas se propagam, cuja velocidade é superior que a primeira.

Os principais riscos podem ser classificados em quatro tipos: combustão sem chamas - smoldering , combustão com chamas - incêndios, explosões de gás e explosões com poeiras [12].

Para o desenvolvimento inicial de um cenário de incêndio é necessário a coexistência de três requisitos: combustível, oxidante (oxigênio) e uma fonte de ignição. O conjunto destes três requisitos é conhecido como o “triângulo do fogo” (Figura 1). Em um silo, os requisitos referentes ao combustível e oxigênio sempre estarão presentes, caso haja alguma fonte de ignição com a energia mínima necessária poderá desencadear um incêndio.

As estruturas projetadas para armazenamento como os silos possuem um nível de contenção que favorece o desenvolvimento de cenários de explosões. Segundo Crowl [10], uma explosão pode ser entendida como o conjunto de três características essenciais: a liberação repentina de energia, uma onda de choque em movimento rápido e uma magnitude de explosão grande o suficiente para ser potencialmente



Fonte: Autores, 2018

perigosa.

As explosões ocorrem devido a coexistência de cinco requisitos, conhecido como “pentágono das explosões” descrito por Amyotte e Eckhoff [13] e ilustrado na Figura 2. Além dos três requisitos do triângulo do fogo, é necessário que o combustível na fase gasosa esteja completamente misturado com o oxigênio, ou seja, a concentração dos gases deve estar entre os limites de explosividade; e que haja uma contenção parcial ou total para promover o aumento da pressão e da temperatura. Se o combustível for um material particulado, como por exemplo, poeira de grãos, as explosões são intituladas como explosões de poeiras. Para este tipo de explosão, a poeira deve estar em suspensão e formar uma nuvem com a concentração dentro dos limites de explosividade. Logo, dentro de um silo é possível a ocorrência de duas explosões: explosão de gás e explosão de poeira.

Figura 2 - Pentágono da explosão



Fonte: Autores, 2018

3.1 Combustão sem chamas – “smoldering”

A combustão sem chamas é um perigo constante em silos que armazenam grãos, pois o material estagnado e as condições físicas estruturais do silo são favoráveis ao auto aquecimento e ignição espontânea deste material [6, 7]. O processo de smoldering pode ser considerado como uma onda de combustão que viaja através de um leito fixo de material particulado sólido. De acordo com Ohlemiller [14], smoldering é uma forma de combustão lenta, com baixas temperaturas e sem chamas, a

qual é alimentada pelo calor emitido da reação em que o oxigênio ataca a superfície de um combustível. Ogle [12] também define o fenômeno como combustão sem chamas e aponta que os grãos agrícolas são suscetíveis a este cenário de ignição. Segundo Rein [11], o processo de combustão pode ser sintetizado em três equações. Principiando com uma reação de pirólise produzindo grão parcialmente queimado - carvão, cinzas e gases de pirólise (Equação 1). Em seguida, ocorre a reação de oxidação heterogênea com o produto do grão parcialmente queimado da reação de pirólise, onde o oxigênio reage com este carvão, produzindo calor, cinzas, dióxido de carbono, água e outros gases (Equação 2). Adicionalmente, paralela a oxidação heterogênea, a reação de oxidação dos gases de pirólise poderá coexistir durante o armazenamento, produzindo mais calor, dióxido de carbono, água e outros gases (Equação 3). Esta reação será a principal para o desenvolvimento de outro risco durante o armazenamento, a combustão com chamas. Em reações de oxidação incompleta poderá também ser gerado monóxido de carbono

Grão (s) + Calor → Gas de Pirólise (g) + Carvão (Grão Queimado) (s) + Cinzas (s) (Equação 1)

Carvão (Grão Queimado) (s) + O₂ (g) → Calor + Cinzas (s) + CO₂ (g) + H₂O (g) + Outros gases (Equação 2)

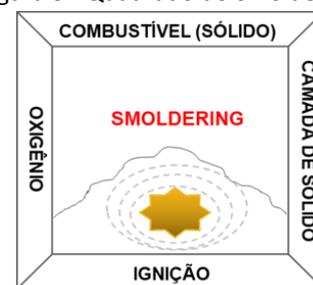
Gases de Pirólise (g) + O₂ → Calor + CO₂ (g) + H₂O (g) + Outros gases (Equação 3)

A ocorrência do processo de smoldering depende de quatro fatores fundamentais: combustível com material poroso, oxidante, espessura mínima de depósito de camada e uma fonte de ignição. A coexistência destes quatro fatores é descrito como “quadrado de smoldering” [12], representado na Figura 3.

Os grãos armazenados precisam apresentar uma estrutura porosa, que permita a ocorrência da reação dentro da estrutura dos grãos. Além disso, a quantidade de oxigênio dentro e entre as partículas deve ser suficiente para sustentar a

reação de oxidação. O tamanho do depósito é um importante fator de influência, pois precisa ser suficientemente grande para garantir que o calor liberado pela reação de oxidação exotérmica possa ser superior ao calor perdido na reação de pirólise e, assim, tornar a combustão autossustentável. A energia da fonte de ignição deve ser suficiente para inflamar uma determinada massa de grãos presente no depósito e iniciar o processo de combustão lenta, pode ser uma fonte externa ou uma fonte interna como uma autoignição do material particulado armazenado.

Figura 3 - Quadrado do Smoldering



Fonte: Autores, 2018

3.2 Combustão com chamas – Incêndios

Além do risco de smoldering, há outros riscos de incêndio nos silos. O gás inflamável gerado a partir das reações de pirólise e das reações de oxidação incompletas pode se tornar um risco de incêndio instantâneo ou de explosão com gás. Outra fonte de combustível para esse risco está relacionada à formação de pequenas nuvens de poeira durante operações de processo em silos, como as etapas de enchimento e esvaziamento.

Uma determinada quantidade de gases inflamáveis ou de nuvem de poeira combustível dispersa dentro de um silo, formando uma concentração explosiva acima do limite inferior de explosividade (LIE) e abaixo do limite superior de explosividade (LSE), pode ser inflamada e resultar em um incêndio instantâneo. A frente de reação deste risco é uma deflagração que não leva a um aumento severo na pressão, portanto não consegue romper a estrutura de armazenamento e não desenvolve uma explosão de gás ou poeira. No entanto, de acordo com Ogle [12], este risco exige que o volume de confinamento seja muito maior que o volume do

gás não queimado ou da nuvem de poeira, ou seja do combustível em potencial.

Alguns fatores irão influenciar a gravidade do risco de incêndios em silos como o tamanho do depósito de poeira, a propensão a gerar gases inflamáveis e o potencial de dispersão de poeira.

3.3 Explosões com gases

Durante o armazenamento, gases inflamáveis podem ser gerados a partir de algumas reações químicas no interior do material granular alocados no interior do silo. Estes gases permeiam os espaços entre os grãos até que se acumulem na parte superior do silo. Com a presença de uma fonte de ignição com energia suficiente para inflamar estes gases, explosões com gases podem ser acionadas dentro da estrutura. Para o desenvolvimento de explosões de gás, é necessário que a concentração dos gases inflamáveis e do oxigênio presentes no interior do silo forme uma mistura dentro dos limites de explosividade. Se esta mistura estiver abaixo do limite inferior ou acima do limite superior, explosões terão baixa probabilidade de ocorrência.

Uma possível fonte de gases inflamáveis são os gases da reação de pirólise, o primeiro passo do processo de *smoldering*. Durante este estágio, alguns gases como CO e CH₄ podem ser liberados durante a reação de pirólise, formando uma mistura inflamável com o oxigênio na parte superior do silo.

3.4 Explosões com Poeiras

Para a combustão inicial, os três requisitos essenciais são um combustível (grãos ou poeiras), um oxidante e uma fonte suficiente de calor ou de ignição. No entanto, para a ocorrência de uma explosão de poeira, o material particulado deve estar disperso, formando uma nuvem de poeira no mesmo instante em que a fonte de ignição está presente [15]. O material combustível deve ser capaz de formar uma nuvem de poeira que inicie e sustente uma explosão. Diversos fatores podem influenciar esse primeiro estágio influenciando a taxa de combustão e conseqüentemente a propagação das chamas.

De acordo com Abbasi e Abbasi [16], a explosão de poeira é iniciada pela combustão rápida de partículas inflamáveis suspensas no ar. O combustível pode ser qualquer material sólido finamente dividido, capaz de reagir rapidamente e exotermicamente com um oxidante gasoso. Neste caso, o combustível é um pó combustível e o tamanho de partícula está normalmente na faixa de 1-100 micrômetros [17]. Partículas menores apresentam um risco maior devido ao seu peso, elas podem permanecer suspensas por um período maior.

O mecanismo de explosões de poeira é exemplificado na Figura 4, que representa a sequência de eventos que podem disparar as explosões primárias. Para a ocorrência da primeira explosão com poeira, é necessário que o pó esteja suspenso e atinja a concentração mínima no ar que se tornará explosivo, formando assim uma nuvem de poeira que diante de uma fonte de ignição com energia mínima suficiente pode ser inflamado. Após a ignição da poeira, o processo de propagação da chama e da onda de pressão ocorre e se o local onde a ignição da nuvem de poeira ocorreu apresentar algum nível de contenção, o aumento da pressão pode tornar-se suficientemente alto para quebrar a estrutura do confinamento e desencadear a primeira explosão com poeira.

Figura 4 - Sequência de eventos em uma explosão com poeiras



Fonte: Autores, 2018

4 Análise dos cenários de riscos

4.1 Árvore de Falhas de Incêndios

Uma árvore de falhas simplificada foi desenvolvida com o objetivo de identificar a sequência de eventos relacionados a cenários de incêndios e *smoldering* em silos, apresentados na

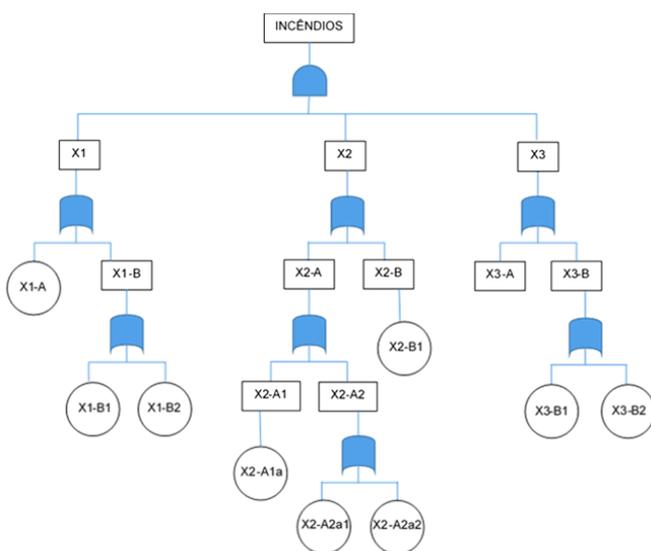
Figura 5 e na Tabela 1. Conforme mencionado anteriormente, os cenários de incêndio exigem três fatores para iniciar uma reação de combustão: oxigênio, combustível e uma fonte de ignição. Estes três fatores são alocados com eventos intermediários na árvore de falhas

Tabela 1 - Possíveis falhas em um cenário de incêndios

X1	CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO > LOC
X1-A	AUSÊNCIA DE GÁS INERTE
X1-B	ENTRADA DE OXIGÊNIO
X1-B1	RUPTURA
X1-B2	FALHA NO BLOQUEIO DO SILO
X2	COMBUSTÍVEL
X2-A	FASE GASOSA UFL < CONCENTRAÇÃO < LFL
X2-A1	REAÇÃO DE OXIDAÇÃO DO GRÃO PARCIALMENTE QUEIMADO
X2-A1a	SMOLDERING – COMBUSTÃO SEM CHAMAS
X2-A2	REAÇÃO DE PIRÓLISE
X2-A2a1	NUVEM DE POEIRAS
X2-A2a2	CAMADA DE MATERIAL PARTICULADO
X2-B	FASE SÓLIDA PIRÓLISE DO GRÃO
X2-B1	SMOLDERING – COMBUSTÃO SEM CHAMAS
X3	ENERGIA DE IGNIÇÃO > MIE E MIT
X3-A	FONTE DE IGNIÇÃO EXTERNA
X3-B	FONTE DE IGNIÇÃO POR AUTOAQUECIMENTO
X3-B1	MICROBIOLÓGICA
X3-B2	BRASAS QUENTES OU PARTES METÁLICAS AQUECIDAS

Fonte: Autores, 2018.

Figura 5 - Árvore de falhas para cenários de explosões



Fonte: Autores, 2018.

Com relação à concentração de oxigênio, esta deve estar acima do nível mínimo para alimentar a reação de combustão. Possíveis falhas básicas para este evento são a falta de gás inerte dentro do silo durante as operações ou a entrada de oxigênio no silo devido a uma ruptura na estrutura ou a uma falha na vedação.

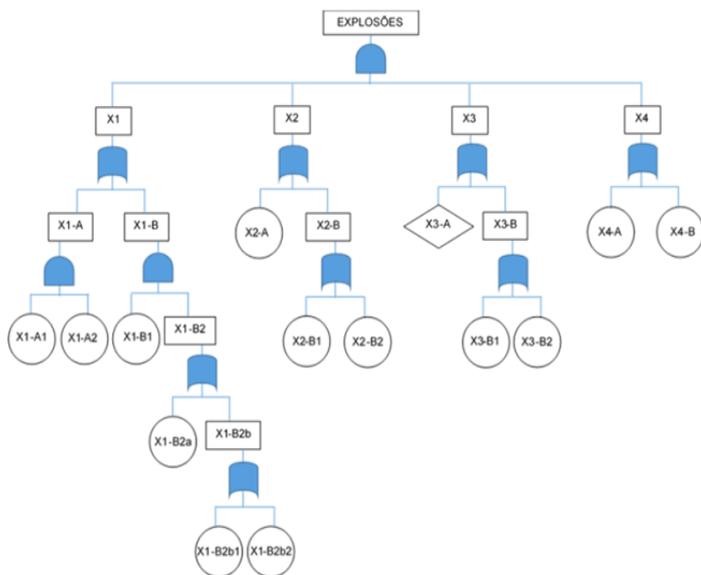
No caso da fonte de combustível, este pode ser de fase gasosa ou sólida. A fase gasosa deve estar entre os limites inferior e superior de inflamabilidade e pode ser originada tanto da reação de oxidação do grão parcialmente queimado quanto da reação de pirólise. O evento básico da origem dos gases é proveniente do processo de smoldering ou da etapa de pirólise, como no caso das nuvens de poeira e da camada de grãos depositados no silo. Outra possibilidade de combustível é o material sólido do grão queimado durante a reação de pirólise, obtido durante a reação de oxidação no processo de smoldering.

A energia da fonte de ignição deve ser maior do que a energia mínima de ignição (MIE) e pode ser originada a partir de uma fonte externa ou um autoaquecimento devido à ação microbiológica ou alguma massa de grãos aquecidos durante o processo de secagem que foi incorporada posteriormente ao depósito no silo.

4.2 Árvore de Falhas de Explosões

Para compreender os eventos relacionados às explosões com o objetivo de compreender a totalidade dos eventos que desencadeiam os acidentes, e assim promover informações básicas para especificação de dispositivos de segurança, foi elaborada uma análise de árvore de falhas com os eventos para explosões com gás e com poeiras. A Figura 6 mostra a árvore de falhas esquematizada com possíveis eventos básicos e intermediários para o desenvolvimento de uma explosão, detalhados na Tabela 2.

Figura 6 - Árvore de falhas para cenários de explosões



Fonte: Autores, 2018

Tabela 2 - Possíveis falhas em um cenário de explosão

X1	CONCENTRAÇÃO EXPLOSIVA
X1-A	GASES INFLAMÁVEIS
X1-A1	SMOLDERING – COMBUSTÃO SEM CHAMAS
X1-A2	REAÇÃO DE PIROLISE
X1-B	NUVEM DE POEIRA
X1-B1	TAMANHO DE PARTICULA DENTRO DA FAIXA DE EXPLOSIVIDADE
X1-B2	POEIRA EM SUSPENSÃO
X1-B2a	CARREGAMENTO E DESCARREGAMENTO
X1-B2b	POEIRA RESUPENSA
X1-B2b1	OPERAÇÃO IMPRÓPRIA
X1-B2b2	ONDA DE PRESSÃO DA EXPLOSÃO
X2	CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO > LOC
X2-A	AUSÊNCIA DE GAS INERTE
X2-B	ENTRADA DE OXIGÊNIO
X2-B1	RUPTURA
X2-B2	FALHA NO BLOQUEIO DO SILO
X3	ENERGIA DE IGNIÇÃO > MIE E MIT
X3-A	FONTE DE IGNIÇÃO EXTERNA
X3-B	FONTE DE IGNIÇÃO POR AUTOAQUECIMENTO
X3-B1	MICROBIOLÓGICA
X3-B2	BRASAS QUENTES OU PARTES METÁLICAS AQUECIDAS
X4	CONFINAMENTO (AUMENTO DE PRESSÃO)
X4-A	FALHA NO DISPOSITIVO DE VENTILAÇÃO
X4-B	FALHA NA RESISTÊNCIA ESTRUTURAL DO SILO

Fonte: Autores, 2018

Analisando a árvore, observamos que existem quatro eventos intermediários para desencadear as explosões, que são baseados nos cinco fatores necessários para uma explosão de poeira ou gás. Os combustíveis que alimentam

uma explosão em um silo podem ser gases inflamáveis gerados a partir das etapas do processo de smoldering no material armazenado (reações de pirólise e oxidação) ou nuvens de poeira. No entanto, as partículas da nuvem de poeira precisam ter o diâmetro dentro de uma faixa explosiva e devem estar em suspensão. Estas nuvens podem ser formadas durante o procedimento de carga ou descarga ou durante alguma operação inadequada ou mesmo após explosões primárias, onde as ondas de pressão podem deixar as partículas em suspensão em alguma conexão com o silo.

O oxigênio é um elemento que sempre estará presente dentro do silo e para evitar qualquer acidente de explosões é necessário que este seja mantido abaixo do limite de concentração de oxigênio (LOC).

As possíveis falhas referentes a este elemento estão relacionadas a falha durante a adição de gases inertes no interior do silo, a qual pode permitir que a concentração de oxigênio esteja acima ou próximo do limite. Outro cenário possível de falha é a entrada inadvertida de oxigênio no interior do silo, devido a uma ruptura no silo ou em alguma conexão dele, ou alguma falha no bloqueio da entrada de ar do silo.

Para que uma fonte de ignição se torne eficaz é necessário que atinja a energia mínima necessária para inflamar o material armazenado no interior do silo, este parâmetro é normalmente avaliado em experimentos em laboratório pela energia mínima de ignição ou pela temperatura mínima de ignição. Dentre as possíveis fontes de ignição, pode haver falhas em fontes externas ou internas. As internas têm origem no autoaquecimento desencadeado pela ação microbológica ou por brasas quentes ou peças metálicas aquecidas que podem cair no material armazenado e estimular o auto aquecimento do material. Dentre as fontes de ignição externa, as possíveis falhas estão relacionadas a chamas, corrente elétrica, eletricidade estática, sólidos quentes etc.

No entanto, de acordo com Krause [7], alguns experimentos determinaram que

temperaturas muito altas são necessárias para inflamar um gás e que tanto áreas muito grandes quanto temperaturas muito altas são necessárias para inflamar as nuvens de poeira por meio de um sólido quente.

O último fator necessário é o confinamento parcial ou total, que é uma característica elementar da estrutura de um silo, permitindo um aumento da temperatura e consequentemente um aumento na pressão. Existem alguns dispositivos, como dispositivos de ventilação, que auxiliam no alívio da pressão máxima de explosão do silo. Caso ocorra uma falha neste dispositivo, pode desencadear uma elevação mais alta da pressão interna e uma falha na resistência da estrutura. Logo, este evento pode causar a ruptura do silo e disparar uma explosão liberando a energia acumulada no interior do silo.

5. Conclusão

Neste estudo, a análise de risco referente a cenários relacionados a combustão do material armazenado no interior de um silo baseou-se na elaboração de duas principais árvores de falhas com a finalidade de encontrar os eventos básicos relacionados aos incêndios e explosões. Dentre os riscos existentes em instalações com silos, destacam-se os riscos de incêndios e explosões, os quais podem exibir uma elevada probabilidade de danos, pessoais e ao patrimônio. Tanto os cenários de incêndios quanto os de explosões envolvem reações de combustão e necessitam a coexistência de alguns fatores essenciais para o desencadeamento destes fenômenos. O oxigênio e o combustível sólido são elementos que sempre estarão presentes no interior do silo, no entanto, o que definirá a evolução para um destes cenários são as concentrações dos reagentes – oxigênio e combustível (sólido ou gasoso) – dentro da faixa de inflamabilidade ou explosividade.

As configurações mais prováveis dos eventos das causas raiz que desencadeiam incêndios ou explosões foram identificados. De acordo com as árvores de falhas é possível observar que o evento referente ao processo de

smoldering, combustão sem chamas, está diretamente relacionado a eventos com incêndios e explosões com gás, assim como a reação de pirólise. Já os cenários com explosões com poeiras dependem exclusivamente da formação de uma nuvem de poeiras com determinada concentração, o que pode ser obtido durante alguma operação no silo.

As análises dos cenários de riscos dos modelos sugeridos das árvores de falhas de incêndios e explosões podem ser comparadas com as análises dos cenários de acidentes reais e, assim, verificada a representatividade do modelo desenvolvido.

6. Referências

- [1] “NFPA 704.” National Fire Protection Association , Quincy, MA, pp. 11–14, 2007.
- [2] P. Russo, A. De Rosa, and M. Mazzaro, “Silo Explosion from Smoldering Combustion: A Case Study” , vol. 9999, pp. 1–9, 2017.
- [3] R. A. Ogle, S. E. Dillon, and M. Fecke, “Explosion from a Smoldering Silo Fire”, vol. 33, no. 1, 2014.
- [4] R. K. Eckhoff, *Explosion Hazards in the Process Industries*. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 2005.
- [5] U.S. CSB, “Investigation Report, COMBUSTIBLE DUST HAZARD STUDY”, U. S. Chem. Saf. Hazard Investig. Board, 2006.
- [6] B. Engineering, “Workers Health and Safety in Bulk Handling Of Grains for Storage in Metallic Silos”, vol. 2, no. 9, pp. 78– 83, 2013.
- [7] U. Krause, *Fire in Silos: Hazard, Prevention and Fire Fighting*. WILEY-VCH, 2009.
- [8] G. Zhen and W. Leuckel, “Determination of Dust-Dispersion-Induced Turbulence and its Influence on Dust

Explosions”, *Combust. Sci. Technol.*, vol. 113:1, no. February 2015, pp. 629–639, 1996.

[9] R. K. Eckhoff, *Dust Explosion in the Process Industries*, 3rd Ed. Gulf Professional Publishing, Elsevier Science, Amsterdam, 2003.

[10] D. a. Crowl, *Understanding Explosions*. New York, 2003.

[11] G. Rein, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 5th Ed. 2016.

[12] R. A. Ogle, *Dust Explosion Dynamics*. 2016.

[13] P. R. Amyotte and R. K. Eckhoff, “Dust explosion causation, prevention and mitigation: An overview”, 2009.

[14] T. J. Ohlemiller, “Smoldering combustion” *National Bureau of Standards*, p. 38, 1986.

[15] K. L. Cashdollar, “Overview of dust explosibility characteristics”, vol. 13, pp. 183–199, 2000.

[16] T. Abbasi and S. A. Abbasi, “Dust explosions – Cases, causes, consequences, and control”, vol. 140, pp. 7–44, 2007.

[17] T. Skjold and R. K. Eckhoff, “Dust Explosions in the Process Industries: Research in the Twenty-first Century”, vol. 48, pp. 337–342, 2016.

*Ana Carolina Souza Rosa é mestranda do Programa de Engenharia Ambiental (PEA/POLI-UFRJ)