



Método de coleta e análise de amostras de poeira para avaliação de riscos de explosões de pós em suspensão em unidades de recebimento e armazenagem de grãos

Dust sample collection and analysis method for assessing the risks of explosions of dust in suspension in grain receiving and storing units

Marcelo Fabiano Costella¹
Silvio Edmundo Pilz¹
Andrisio Bet¹

Resumo: O fogo e a explosão devido à poeira orgânica em suspensão são riscos potencialmente mortais em toda a operação que tem como resultado secundário a formação de materiais pulverulentos em algumas etapas de seu processo produtivo. Este artigo apresenta um método de coleta e análise de amostras de poeira para avaliação de riscos de explosões de pós em suspensão, e foi testado em uma unidade de recebimento, limpeza, secagem, armazenagem e expedição de grãos (soja). O método de pesquisa consiste na avaliação da concentração de poeira total nos setores considerados de maior risco quanto à explosão de pó, sendo, neste estudo de caso, a moega com descarga manual, a moega com descarga através de tombador, o secador, o túnel subterrâneo, o redler, o elevador e a máquina de limpeza. Dentre os resultados destaca-se que as concentrações totais nos setores pesquisados após 8 horas de utilização ultrapassaram o recomendado em quatro locais dos sete amostrados. Observou-se o crescimento da concentração conforme o tempo de operação da unidade, ressaltando que, a partir da análise dos valores encontrados, uma parcela do pó decanta rapidamente e outra, com granulometria menor, permanece suspensa no ar por um longo tempo, o que consiste em um fator de risco altíssimo. Por fim, descreveram-se as medidas preventivas para evitar explosões em locais onde podem ser encontradas concentrações dentro da faixa de explosividade.

Palavras-chave: Gerenciamento de riscos; Segurança do trabalho; Prevenção de acidentes; Explosões de pós; Recebimento e armazenagem de grãos.

Abstract: Fires and explosions resulting from organic dust in suspension represent potentially fatal risks in all operations where the formation of powdery materials in certain stages of the production process is a secondary result. This article presents a dust sample collection and analysis method to assess the risks of explosions of dust in suspension. The research method was tested in a grain (soybean) receiving, cleaning, drying, storing and shipping unit. It consisted in evaluating the total dust concentration in sectors considered at higher risk for dust explosions, which in this case study included the hopper with manual discharge, the hopper with bascule lift discharge, the dryer, the underground tunnel, the redler conveyor, the elevator, and the cleaning machine. The total concentrations in the sectors under study after 8 hours of use exceeded the recommended levels in four of the seven sampled locations. An increase in concentration was observed according to the time of operation of the unit, emphasizing that, based on the analysis of the values found, one portion of the powder settles quickly, whereas the portion with smaller particle size remains suspended in the air for a long time, representing a very high risk factor. Finally, preventive measures to avoid explosions in locations where concentrations within the detonation range can be found are described.

Keywords: Risk management; Workplace safety; Accident prevention; Dust explosions; Receiving and storing of grains.

¹ Programa de Pós-graduação em Tecnologia e Gestão da Inovação, Universidade Comunitária Regional de Chapecó – UNOCHAPECO, Av. Atilio Fontana, 591-E, CEP 89809-000, Chapecó, SC, Brasil, e-mail: costella@unochapeco.edu.br; silvio@unochapeco.edu.br; andrisio@unochapeco.edu.br

1 Introdução

Toda a atividade industrial em seu processo de transformação, devido às perdas e ineficiência no processo, podem gerar resíduos sólidos, líquidos ou gasosos com características diversas, podendo ser inflamáveis e explosivos, afetando trabalhos e partes físicas da indústria, bem como a comunidade vizinha e o meio ambiente, através das emissões do processo para o exterior ou movimento no âmbito interno da indústria.

As indústrias de processamento de produtos que, em alguma de suas fases, se apresentam na forma de pó são instalações com potencial de riscos quanto a incêndios e explosões. São indústrias de armazenagem, secagem e beneficiamento de produtos agrícolas, fabricantes de rações animais balanceadas, indústrias alimentícias, indústrias metalúrgicas, farmacêuticas, plásticas, de carvão e beneficiamento de madeira. Tais instalações devem, antes de sua implantação, efetuar uma análise acurada de seus riscos e tomar as precauções cabíveis, minorando os riscos inerentes (Sá, 1997).

Nas atividades industriais descritas acima, há riscos para os trabalhadores, riscos estes físicos, químicos, biológicos e ergonômicos. No entanto, dentre os principais riscos observados em tais instalações, os acidentes causados por incêndios e explosões por poeiras em suspensão são os que mais danos trazem ao patrimônio, com perdas irreparáveis inclusive de vidas humanas, incontáveis dias de paralisação, perda de mercado, de competitividade, investimento necessário para colocar novamente em operação o complexo, além das consequências psicológicas que isto representa no futuro, pois sempre haverá alguém que participou ou assistiu a catástrofes e que terá dificuldade de conviver com ela novamente.

As explosões de pós em suspensão são fenômenos de pouca frequência, porém, quando um efeito desses acontece, suas consequências são desastrosas. Em razão disso, este fenômeno torna a busca por métodos de

prevenção ainda mais instigante. Por isso, o objetivo deste artigo é a proposta de um método de avaliação de riscos de explosões de pós em suspensão, o qual foi testado em diversos setores de uma unidade de recebimento, secagem, limpeza, armazenagem e expedição de produtos agrícolas, mais precisamente o grão de soja.

2 Explosões em unidades de armazenagem de grãos

2.1 Breve histórico de explosões de pós

Diversos estudos relatam históricos de acidentes com explosões de pós, tais como Abbasi & Abbasi (2007) que apresentam um histórico detalhado de acidentes desde 1911 até 2004. Já Vijayaraghavan (2004) detalha, a partir de informações da Health & Safety Executive, 36 explosões de poeiras com lesão e 123 explosões sem lesões durante o período de 1979 a 1988. Como pode ser observado na Figura 1, os principais itens de equipamentos envolvidos nos acidentes foram as usinas, moinhos e filtros, sendo que os eventos ocorridos em dutos foram classificados na categoria “outros”.

No Brasil, destaca-se a explosão da célula C-2 do silo vertical do Porto de Paranaguá, Curitiba (PR), que causou o falecimento de dois trabalhadores além de cinco ficarem feridos. A provável causa apontada para a explosão teria sido a combustão da poeira de cevada armazenada no local, durante uma operação de limpeza que acontecia no décimo andar do silo, o qual tinha 13 andares e 55 metros de altura (Rangel, 2007).

Recentemente, em 2008, uma enorme explosão ocorreu no Imperial Sugar Refinaria, em Savannah, EUA, matou 14 e feriu 38 pessoas. Embora a causa exata da ignição seja desconhecida, a explosão começou em um transportador de açúcar nos silos da empresa. A explosão primária levantou poeira de açúcar que havia acumulado nos pisos e superfícies horizontais

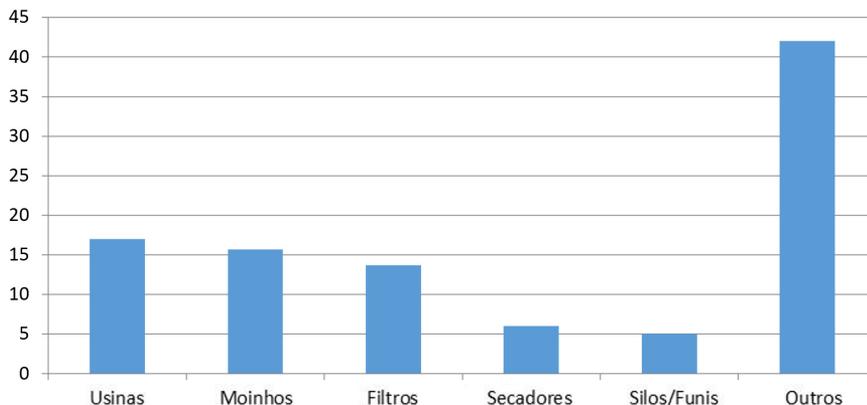


Figura 1. Equipamentos envolvidos em acidentes de explosões de pós. Fonte: adaptado de Vijayaraghavan (2004).

elevadas, propagando mais poeira e explosões através dos edifícios. As explosões de poeiras secundárias ocorreram ao longo dos edifícios de embalagem, peças da refinaria, e edifícios de carregamento de açúcar. As ondas de pressão das explosões geraram desprendimento de pisos de concreto e paredes de tijolo desabaram, bloqueando a escada e outras rotas de saída de emergência, aumentando a tragédia (DEI, 2012).

2.2 Normas brasileiras e estrangeiras

No Brasil, não há nenhuma norma que trate especificadamente sobre o fenômeno explosão de pó. No exterior, os estudos estão mais aprofundados. Nos Estados Unidos, existe a norma NFPA 68, do órgão de mesmo nome que regulamenta os procedimentos para combate a incêndios e explosões (NFPA, 2007). A NFPA trabalha em conjunto com o OSHA. Para evitar o perigo de explosão, regras de proteção em forma de leis, de especificações e normas têm sido desenvolvidas em muitos países e objetivam garantir que um alto nível de segurança seja observado. As condições para a completa harmonização foram criadas na União Europeia pela Diretriz EC 9194. A Diretriz 94/9/EC foi lançada em 1994 para padronizar a proteção contra explosão (EC, 1994).

A ABNT colabora com as norte-americanas NFPA, NEMA, NEC e IEC, assim como as normas europeias EN e DIN, entre outras em nível mundial. No Brasil, as NRs definem padrões de segurança para ambientes considerados perigosos ao trabalho humano. Os produtos de risco são classificados pela NBR 5418 em 4 grupos, I, IIA, IIB, IIC, e é baseada na Instrução Europeia IEC 79/14-1984 (ABNT, 1995).

As regulamentações internacionais usam a IEC 79-10 e distinguem as seguintes categorias de zonas perigosas: zona 0, zona 1 e zona 2. Estas zonas são geográficas, mas os limites entre cada uma delas dificilmente são bem definidos. Uma zona pode se deslocar por diversos motivos: aquecimento dos produtos, ventilação falha do local, variações climáticas, erro de manipulação. Na zona 0, a atmosfera explosiva está sempre presente; na zona 1, a atmosfera explosiva está frequentemente presente; na zona 2, a atmosfera explosiva pode acidentalmente estar presente. A ABNT adota a classificação em zonas. Já a NFPA e NEC adotam a mesma classificação chamando-as de divisões (ABNT, 1995).

A operação de equipamentos elétricos em atmosferas potencialmente explosivas, por sua própria natureza, constitui uma fonte de ignição e deve atender aos requisitos estabelecidos em normas internacionais. A poeira de grãos e farelos é classificada como de classe II, grupo G, estas normas apresentam os critérios para definição de área classificada, em função do potencial de risco das substâncias inflamáveis (NFPA, 2011).

Ainda para equipamentos elétricos, há a classificação em Grupos de Explosão, sendo classificados como grupo II os aparelhos elétricos para todos os outros ambientes potencialmente explosivos remanescentes. Sendo assim, os aparelhos elétricos em instalações de armazenagem de grãos e farelos estão neste grupo. A etiqueta de identificação de equipamentos elétricos deve mostrar para qual grupo de explosão está designada (Schaltgerate & Fordertechnik, 1999).

A norma regulamentadora NR-31 é a diretriz legal que define os requisitos mínimos para a segurança do trabalhador do segmento agrícola e ela traça diretrizes para a execução de instalações seguras de silos (Brasil, 2011).

2.3 Explosões de pós

As indústrias que processam produtos que, em alguma de suas fases, se apresentam na forma de pó são indústrias de alto potencial de risco quanto a incêndios e explosões e devem, antes de sua implantação, efetuar uma análise acurada dos riscos e tomar as precauções cabíveis, pois na fase de projeto as soluções são mais simples e econômicas. As indústrias já implantadas, porém, com o auxílio de um profissional competente, poderão equacionar bem os problemas, minorando os riscos inerentes. Dentre as atividades industriais reconhecidamente perigosas quanto ao risco de incêndios e explosões, destacam-se: indústrias de beneficiamento de produtos agrícolas, indústrias fabricantes de rações animais, indústrias alimentícias, indústrias metalúrgicas, indústrias farmacêuticas, indústrias plásticas, indústrias de beneficiamento de madeira e indústrias do carvão (Eckhoff, 2005).

Para Eckhoff (2009), não se pode deixar de destacar o grande risco de explosões, o qual ocorre frequentemente em unidades processadoras em referência, onde as poeiras tenham propriedades combustíveis. É necessário, porém, que elas estejam dispersas no ar e em concentrações adequadas. Isto ocorre em pontos das instalações em que haja moagem, descarga, movimentação, transporte, entre outros, desde que sem controle de exaustão e desde que, obviamente, existam os fatores desencadeantes.

A poeira suspensa no ar ao entrar em ignição pode gerar grandes explosões, por isso estas misturas combustíveis finamente pulverizadas são, em geral, muito perigosas, sendo ocasionadas por depósitos de poeira combustíveis sobre vigas e sobre as máquinas do local.

Processada a detonação em um dado ponto, a energia calorífica dissipada será utilizada na detonação de outro ponto. Isto estabelecerá uma série de detonações, enquanto houver condições favoráveis que são estabelecidas pela existência dos agentes comburentes e combustível e a ocorrência da temperatura do ponto de detonação. Deste modo,

tem-se que o processo de detonação, rápido, mas não instantâneo, sendo que as séries de detonações podem atingir velocidades de propagação de até 7000 m/s, exercer pressões de até 550 KPa e gerar ondas de choque com velocidades de 300 m/s. (Silva, 1999, p. 1).

Segundo Abbasi & Abbasi (2007), enquanto o fogo é causado por três fatores (combustível, oxidante e ignição), denominado de “o triângulo do fogo”, uma explosão de pó exige mais dois fatores: mistura de poeira e ar, além de confinamento (da nuvem de poeira). Assim “o pentágono da explosão de pó” é formado quando estes cinco fatores ocorrem em conjunto:

1. Presença de pó combustível numa forma finamente dividida;
2. Disponibilidade de oxidante;
3. Presença de uma fonte de ignição;
4. Algum grau de confinamento;
5. Estado de reagentes mistos.

O perigo de uma determinada classe de poeira está relacionado com sua facilidade de ignição e com a gravidade da explosão resultante. Para tal, foi criado nos Estados Unidos um equipamento experimental para testar poeiras explosivas, com sensores diversos para permitir conhecer as características das poeiras explosivas. A sensibilidade de ignição é função da temperatura de ignição e da energia necessária, enquanto que a gravidade de explosão vem determinada pela pressão máxima de explosão e pela máxima velocidade de crescimento da pressão. Para facilitar as comparações dos dados de explosividade derivados dos ensaios mencionados, todos os resultados se relacionam com uma poeira de carvão conhecida de “Pittsburg” tomando na amostra uma concentração de 0,5 kg/m³, kg de pó de carvão por m³ de ar, exceto dos pós metálicos. Quanto menor for a dimensão da partícula de pó, é mais fácil a nuvem entrar em ignição, visto ser maior a superfície exposta por unidade de peso da matéria (superfície específica). As dimensões da partícula influem também sobre a velocidade de crescimento da pressão: para uma concentração dada de pó em peso, um pó formado por partículas grossas mostra uma velocidade de aumento de pressão mais baixa que o mesmo pó fino. A concentração mínima necessária para que haja explosão, a temperatura de ignição, e a energia necessária para ignição são reduzidas ao diminuir a dimensão da partícula de pó. Numerosos estudos indicam este efeito em grande variedade de poeiras. A dimensão do tamanho da partícula faz aumentar também a capacidade elétrica das nuvens de pó, ou seja, o tamanho das cargas elétricas que podem se acumular na partícula da nuvem (Sá, 1998).

Segundo o mesmo autor, observa-se que as explosões mais violentas se produzem com uma concentração ligeiramente superior à necessária para que se tenha a reação com todo o oxigênio que haja na atmosfera. Com as concentrações menores, gera-se menos calor e se criam menores pressões de ponta. Com concentrações maiores das que causam explosões violentas, a absorção do calor pela poeira não queimada pode ser a razão para que se produzam pressões menores de explosão que a máxima.

Para Sá (1998), o gás inerte é eficaz na prevenção das explosões de pós, uma vez que dilui o O₂ a uma concentração muito baixa. Ao selecionar o gás inerte mais adequado, deve-se cuidar para que este não entre em reação com o pó; é o caso de certas poeiras metálicas que entram em reação com o CO₂ ou com o N₂, neste caso deve usar-se o Hélio ou Argônio.

A alta concentração de poeira gerada pela manipulação dos grãos é o principal combustível para a ocorrência de explosões. Nos estados de Goiás, Mato Grosso, Minas Gerais e Bahia, onde também é intensa a atividade de manipulação de grãos, os riscos são ainda maiores em função da baixa umidade relativa do ar, transformando as unidades armazenadoras de grãos em verdadeiros barris de pólvora. A concentração da incidência de incêndio e explosões nos silos brasileiros ainda é uma incógnita para os especialistas.

A possibilidade da explosão de uma nuvem de pó está condicionada pela dimensão de suas partículas, sua concentração, as impurezas, a concentração de oxigênio e a potência da fonte de ignição. As explosões de pó se produzem frequentemente em série, muitas vezes a deflagração inicial é muito pequena em quantidade, porém de suficiente intensidade para colocar o pó em suspensão ou romper peças de máquinas ou instalações dentro do edifício, como os coletores de pó, com o que se cria uma nuvem maior através da qual podem se propagar explosões secundárias e até mesmo de um edifício ao outro (Eckhoff, 2003).

Em relação à concentração, segundo estudos de Couto (2007), a faixa mais perigosa para gerar uma explosão varia entre 20 g/m³ e 4.000 g/m³, a qual foi adotada neste trabalho. Os efeitos de uma explosão são geralmente grandiosos e se processam continuamente, enquanto houver condições favoráveis. Já Abbasi & Abbasi (2007) relatam que a concentração de poeira passível de explosão varia de 50-100 g/m³ até 2000-3000 g/m³.

2.4 Medidas preventivas capazes de evitar explosões

Segundo Eckhoff (2009), as principais medidas preventivas para evitar explosões podem ser classificadas em três classes:

- Prevenção de explosão de nuvem de poeira;
- Prevenção de fontes de ignição;
- Mitigação de explosões.

Dentre as medidas preventivas contra explosão de nuvem de poeira pode-se citar: apurado controle de umidade relativa do ar, sendo que abaixo de 50% caracteriza-se faixa crítica de risco; limpar periodicamente os sistemas de captação de pó, trocando os filtros nos períodos definidos pelos fabricantes; proceder à limpeza diária da poeira residual depositada nas máquinas, equipamentos e instalações; treinar os operadores e demais funcionários quanto aos potenciais riscos de explosões; fazer manutenções periódicas dos equipamentos eletromecânicos; certificar periodicamente os estados dos cabos elétricos; tomar os devidos cuidados ao utilizar aparelhos de solda nos serviços de manutenção; evitar que pessoas fumem no interior e nas proximidades dos silos; conservação e manutenção das edificações (São Paulo, 2010).

Segundo Schoeff (2004), a explosão de pó não pode ocorrer sem ter a presença da própria poeira. Assim, o melhor método de prevenção é um bom serviço de limpeza, pelo fato de a poeira ao se acumular ser visualizada, não sendo acumulada imediatamente. Portanto o serviço de limpeza é tão importante, se não o mais importante, sendo de responsabilidade de todos os trabalhadores. Gestores têm de perceber que, para manter esses locais seguros, eles têm que cuidar da poeira, sendo assim, o foco deve estar no controle da poeira, mantendo-a fora da suspensão ou controlando a concentração.

Já para a prevenção de fontes de ignição, destacam-se o controle de concentração de pó no ambiente, avisos com proibição de fumar, manutenção de redes elétricas, utilização de protetores para lâmpadas e emprego de motores blindados são básicos e fundamentais. Outras medidas preventivas preveem instalações elétricas nos silos à prova de explosão como enclausuramento de lâmpadas e tomadas; apurado o controle da umidade relativa do ar (abaixo de 50%, caracteriza-se faixa crítica de risco); controle da eletricidade estática, por meio de sistema de aterramento dos silos; controle de chamas abertas com o uso de aparelhos de soldagem, fósforos e operações de esmerilhamento de metais; além da instalação de para-raios.

Taveau (2012) destaca duas principais maneiras, dentre as melhores práticas para atenuar os efeitos das explosões:

- Usar técnicas de ventilação, para libertação do excesso de pressão no ambiente, ainda sistemas de extinção ou equipamentos resistentes para limitar as consequências de uma explosão primária;

- Sistemas de isolamento de instalação de explosão, como válvulas, rotativos, fechaduras, e corta-chamas para evitar a propagação da explosão primária.

2.4.1 Possíveis fontes de ignição

As possíveis fontes de ignição para ocorrer uma explosão são decorrentes de: acúmulo de cargas eletrostáticas; curtos circuitos; descargas atmosféricas; atrito de componentes metálicos; descuidos quanto ao uso de aparelhos de soldagem.

Segundo estatísticas (Beteneuser et al., 2005), as principais fontes de ignição causadoras de acidentes com explosões de pó são: faíscas mecânicas (50%); eletricidade estática, corte e solda, faíscas a arco (35%) e sobreaquecimento (15%).

Os principais equipamentos e/ou locais críticos ao surgimento destes acidentes são: moinhos e trituradores (40%); elevadores (35%); transportadores (35%); coletores de pó e silos (15%); e secadores (10%) (Beteneuser et al., 2005).

Segundo estatísticas de DEI (2012), uma explosão de pó irá ocorrer apenas se um pó é disperso no ar ou oxigênio dentro do intervalo explosivo e se, ao mesmo tempo, uma fonte adequada de ignição está presente, podendo ocorrer principalmente por presença de chamas e superfícies quentes, aquecimento espontâneo, faíscas de atrito, planta elétrica, eletricidade estática, dentre outros.

3 Procedimentos metodológicos

3.1 Método de coleta e análise de amostras de poeira para avaliação de riscos de explosões de pós em suspensão

3.1.1 Identificação dos locais geradores de pó

Inicialmente, para poder analisar os principais locais geradores de poeira, deve-se entrevistar os funcionários que trabalham na unidade, identificando assim estes locais, os quais podem-se citar como principais receptores deste: moega de recebimento do grão com descarga manual e descarga por tombador, secador de secagem do produto, redler de transporte horizontal do produto, máquinas de limpeza, galeria subterrânea e elevador de transporte horizontal.

A análise destes locais ocorre devido ao fato de a maioria das etapas do processo de armazenamento dos grãos gerar ameaça de explosões nos silos que não possuem as adequadas medidas de segurança. Desde a moega (local de recepção do grão), passando pelas correias localizadas nos túneis, pelas máquinas de limpeza, secagem até os silos de armazenagem.

3.1.2 Coleta das amostras de poeira

Os procedimentos de coleta são realizados nos locais de maior incidência de poeira. Nesta pesquisa, são descritos os principais locais geradores de poeira em uma indústria de grãos, sendo recomendado retirar as amostras na moega, na galeria subterrânea, na máquina de limpeza, no redler de transporte, no elevador de transporte e no secador. As amostras são coletadas por meio de três medições, todas no mesmo local e em dias distintos, sendo que uma coleta é realizada no início da operação, outra após 4 horas e a última após 8 horas de funcionamento da unidade.

3.1.2.1 Coleta de amostras com utilização de filtros

Os filtros de membrana a serem utilizados na coleta das amostras são retirados cuidadosamente da embalagem original, com o auxílio de uma pinça, e depositados sobre os corpos inferiores dos porta-filtros já preparados com os suportes dos filtros. Nesse momento, é verificado possível defeito (descartando filtros defeituosos). A seguir, são escolhidos dois filtros da mesma embalagem que foi utilizada para preparação dos filtros para coleta, sendo montados como descrito no item acima. Em seguida, é escolhido um código para cada embalagem original de 100 a 50 filtros e identificados os porta-filtros com esse código: Embalagem A (filtros A-01 a A-100).

Posteriormente, são fechados os porta-filtros contendo os filtros já pesados manualmente com o auxílio de uma placa de madeira e, posteriormente, os encaixes dos porta-filtros são vedados com 3 camadas de fita teflon.

Os filtros devem ser utilizados um dia após a pesagem para não haver modificações na balança ou nas condições de estabilização do laboratório, entre as pesagens antes e após a coleta, afetando os resultados analíticos. Pode ser notado o prazo de validade no corpo do porta-filtro, havendo geralmente limite de uma semana após a pesagem. Uma das fontes de erro frequentes na coleta por filtração é a vedação do porta-filtro. Para assegurar que todo o material coletado passe através do filtro, os porta-filtros são testados quanto à vedação e também quanto a possível ruptura do próprio filtro, pela medição de perda de carga.

O método utilizado para a coleta de poeira no ambiente de trabalho deve seguir a NBR 12085: Agentes químicos no ar – coleta de aerodispersóides por filtração (ABNT, 1991). Seguindo o método de análise gravimétrica de aerodispersóides sólidos coletados sobre filtros de membrana, realizam-se a pesagem do filtro de membrana, antes e depois da coleta da poeira suspensa no ar, e posteriormente a determinação da massa da amostra por diferença,

considerando as variações ocorridas entre essas duas pesagens.

3.1.2.2 Coleta de amostras com a utilização de bombas de vazão volumétrica

As bombas de amostragem possuem um sistema de controle de vazão volumétrica constante, que consiste de um sensor de variação de pressão instalado na tomada de ar e de um sensor de rotações por minuto da bomba. Os dados coletados por esses dois sensores são constantemente comparados com parâmetros internos da bomba, permitindo a monitoração contínua da vazão. Um programa de monitoramento ajusta instantaneamente o fluxo da bomba para mantê-la dentro da faixa de vazão escolhida pelo próprio usuário que, no caso, é de 1,7 l/min, mesmo variando a altitude.

As amostras de poeira são obtidas por meio de um dispositivo de coleta apropriado, pelo qual se faz passar um volume determinado de ar através de um filtro de membrana de policloreto de vinila (PVC), de 37 milímetros (mm) de diâmetro e 5 micrometros (um) de poro. Esse é acoplado diretamente por uma mangueira à bomba de amostragem. Para medir com precisão o tempo de coleta das amostras em cada processo da atividade considerada com risco de explosão, é utilizado um cronômetro.

3.1.3 Procedimentos laboratoriais executados após a coleta em campo

Na análise das amostras de poeira por gravimetria, utiliza-se uma balança analítica com sensibilidade de 0,01 mg, previamente aferida com padrões rastreáveis na faixa de interesse analítico. Já a calibração da bomba deve ser executada utilizando um calibrador de vazão, conforme a norma NBR105-62: Calibração de vazão pelo método da bolha de sabão, de bombas de baixa vazão utilizadas na avaliação de agentes químicos no ar (ABNT, 1988).

O local para instalação da balança analítica deve ser uma sala provida de sistema de ar-condicionado com controle da umidade. A balança é instalada sobre uma mesa, a qual serve para protegê-la de possíveis vibrações. O local destinado às pesagens é reservado e independente de outras atividades que possam interferir no seu bom andamento, local sem incidência da luz solar e área de pouca circulação de pessoas.

A temperatura da sala de pesagem nesta pesquisa variou na faixa de 20 a 25 °C, considerando a região de Chapecó, provida por sistema de ar-condicionado. Porém esta faixa de umidade deve ser fixada considerando-se as características da região pesquisada, sendo controlada dentro de 10% entre a mínima e a máxima encontradas durante o ano.

Depois da coleta em campo, os seguintes procedimentos laboratoriais são adotados: pesagem dos filtros após a coleta, limpeza de materiais e da balança, expressão dos resultados, notas de procedimento, análises das amostras e determinações das concentrações de poeira.

Para expressar os resultados, determina-se a massa da amostra coletada sobre o filtro, calculando-se a diferença entre a massa do filtro carregado e a massa do filtro virgem (Equação 1).

$$MASSA DA AMOSTRA = (massa do filtro carregado) - (massa do filtro virgem) \quad (1)$$

Em seguida, determina-se o fator de correção das pesagens da seguinte forma (Equação 2):

$$F = ((c - a) + (d - b)) / 2 \quad (2)$$

- Em que: F = fator de correção

a = massa inicial do filtro testemunho T₁

b = massa inicial do filtro testemunho T₂

c = massa final do filtro testemunho T₁

d = massa final do filtro testemunho T₂

As amostras que apresentam material desprendido do filtro são consideradas invalidadas, porém podem ser pesadas apenas para uma estimativa da massa amostrada. Os resultados de análise gravimétrica dessas amostras não devem ser considerados para efeito de cálculo de concentrações, e devem ser sempre acompanhados das observações sobre o estado da amostra no momento da pesagem.

A análise das amostras é realizada em laboratório pelo método de gravimetria, possibilitando assim a determinação da massa da poeira total coletada nos filtros de membrana previamente pesados e fornecidos pelo laboratório.

As concentrações de poeira são determinadas como concentração de poeira total. Para o cálculo delas nos diversos ambientes de trabalho, consideram-se apenas as amostras de poeira que se apresentam dentro dos critérios de qualidade estabelecidos pela Fundacentro. A técnica analítica a ser utilizada na análise da poeira é a análise gravimétrica de aerodispersóides sólidos coletados sobre filtros de membrana (FUNDACENTRO, 2001).

3.2 Definição do estudo de caso

A escolha da unidade de recebimento e armazenagem de grãos se deu por estar localizada na cidade de Chapecó, por possuir na mesma unidade todas as atividades do processo, desde recebimento, transporte, secagem, limpeza, armazenagem e expedição de grãos, sendo eles milho, soja e trigo. Outro ponto importante para a escolha foi a grande capacidade de armazenagem e movimentação do produto, possuindo uma capacidade de armazenagem de 75.000 toneladas de produto e

uma movimentação de 180.000 toneladas por ano, pois é uma unidade centralizada que abastece uma indústria de óleo vegetal e uma indústria de farinha de trigo localizadas na mesma cidade.

No estudo de caso, validou-se o método proposto para a coleta e a análise de amostras da poeira gerada na unidade. Os métodos selecionados foram definidos de forma a identificar a concentração em massa de pó suspenso no ar em todos os ambientes de trabalho considerados propensos à explosão como: *moega* (local de recebimento do grão com descarga manual e por tombador), *galeria subterrânea* (local confinado responsável pelo transporte do produto através de correias transportadoras), *máquinas de limpeza* (nas quais é feita a limpeza do produto, retirando as impurezas existentes), *redlers* (equipamento que transporta o produto horizontalmente), *elevadores* (responsável pelo transporte vertical por meio de canecas levando o produto da galeria subterrânea à passarela superior) e *secador* (em que é feita a secagem do produto, possibilitando a armazenagem em condições ideais e inertes de deterioração).

Estes pontos citados estão identificados na Figura 2 e servem de local para coleta das amostras para o estudo de caso, para verificação da sua concentração total.

3.3 Teste na maquete experimental

Este teste, não obrigatório, foi realizado com o auxílio de uma maquete experimental utilizada para treinamento aos trabalhadores expostos a riscos quanto à explosividade de grãos. Para isso, coleta-se a poeira de soja nos locais onde foram realizadas as medições e, proporcionalmente ao volume de ar da maquete, é pesada a quantidade de pó (Figura 3), verificando, segundo concentrações encontradas, a ocorrência ou não da explosão. Pela verificação do peso da poeira coletada confirma-se a massa unitária do pó de soja em estudo em 284 Kg/m³.

Todas as concentrações encontradas foram testadas quanto à explosão, e introduziu-se o oxigênio e a fagulha elétrica necessários para que, juntamente com a poeira, ocorresse uma explosão. A Figura 4, apresenta uma foto da maquete em que foram realizados os testes de explosões para esta pesquisa.

3.4 Avaliação qualitativa de riscos

Uma outra forma de corroborar os resultados, além do método proposto e da maquete experimental, é por meio da utilização de uma técnica de avaliação de riscos. A técnica de avaliação qualitativa de riscos (Cardella, 1999) foi realizada na empresa por meio de um seminário com a participação dos autores do artigo, do engenheiro de segurança do trabalho e de dois técnicos de segurança da unidade estudada. A avaliação consistiu em avaliar a probabilidade e

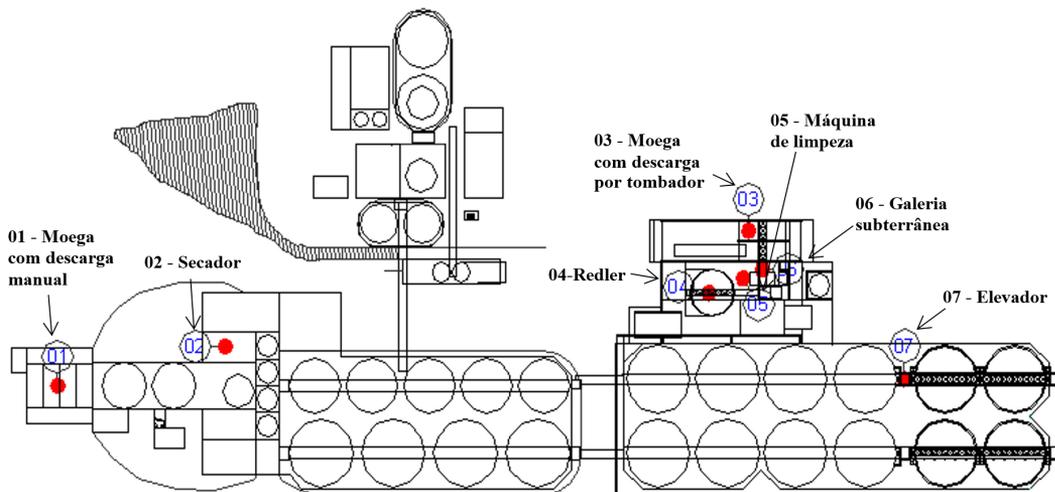


Figura 2. Identificação dos pontos geradores de pó e coletas das amostra. Fonte: Elaboração dos autores.

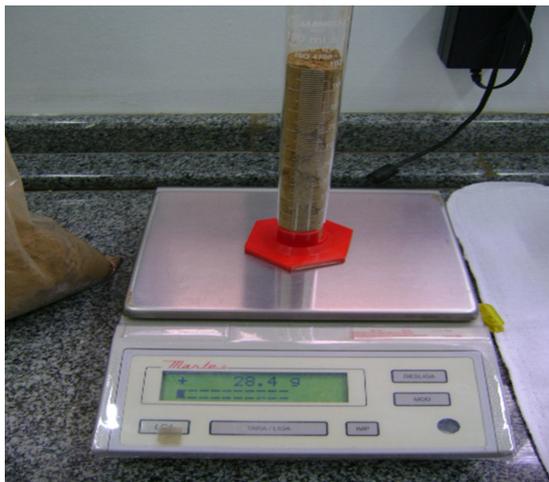


Figura 3. Pesagem do pó dos locais de medição para simulação em maquete. Fonte: Elaboração dos autores.



Figura 4. Maquete experimental utilizada para simulações de explosões. Fonte: Elaboração dos autores.

a severidade de explosões de pó no elevador e no redler após 8 horas de operação. A probabilidade foi avaliada por meio da avaliação da frequência do acidente e a severidade por meio da análise das consequências da explosão.

4 Resultados e análise das amostras

4.1 Concentração de poeiras na unidade e possibilidade de explosão

Os resultados da avaliação da poeira são apresentados como concentração de poeira total, em gramas por metros cúbicos (g/m^3). Foram agrupados os setores ou etapas do processo de recebimento, armazenagem e expedição de grãos contemplando moega com descarga manual e descarga com tombador, túnel subterrâneo, máquinas de limpeza, elevador de transporte, secador e redlers. As concentrações se referem às amostras coletadas no início de operação da unidade, após 4 horas e após 8 horas de funcionamento da unidade.

As três etapas foram medidas no mesmo local para obter melhor análise das concentrações e informações sobre a decantação e a variação da concentração total de pó, em decorrência do tempo de funcionamento da unidade. A Tabela 1 apresenta os resultados finais desta pesquisa das concentrações encontradas nas três medições realizadas.

Os resultados das concentrações totais encontradas na *moega com descarga manual* apresentaram pouca preocupação quanto à explosão de pó, pois as três medições realizadas nesse local ficaram abaixo da faixa de explosividade, entre $20 \text{ g}/\text{m}^3$ e $4.000 \text{ g}/\text{m}^3$. Ao analisar o resultado das concentrações nesse local, foram atribuídos esses valores por ser a moega um ambiente considerado de grande porte e aberto em dois de seus lados, no sentido de entrada e saída dos caminhões, contribuindo também por ser a descarga

Tabela 1. Resultado das concentrações totais encontradas nos locais de coleta.

LOCAL	CONCENTRAÇÃO TOTAL DE POEIRA		
	Início da operação (g / m ³)	Após 4 h de operação (g / m ³)	Após 8 h de operação (g / m ³)
<i>Moega - Descarga manual</i>	0,33	2,62	4,45
<i>Moega - Descarga tombador</i>	0,80	16,17	31,18
<i>Secador</i>	0,84	10,87	17,31
<i>Túnel subterrâneo</i>	0,94	21,43	41,25
<i>Máquina de limpeza</i>	0,04	0,23	0,43
<i>Elevador de transporte</i>	7,99	99,65	122,65
<i>Redler de transporte</i>	7,62	98,76	113,39

Fonte: Elaboração dos autores.

manual considerada lenta, possibilitando que a maior parte do pó gerado nesse local se espalhe pelo ambiente ou até mesmo seja levado pelo vento para fora da moega se dissipando no ambiente externo. Mesmo encontrando concentrações baixas, será conveniente treinar os operadores e demais funcionários quanto aos potenciais riscos de explosões, procedendo cuidadosamente com relação à limpeza das instalações, evitando o acúmulo de pó, mantendo assim o local limpo e evitando qualquer tipo de situação que possa gerar fagulha.

Diante dos resultados das concentrações totais encontradas na *moega com descarga por tombador*, observa-se uma preocupação quanto à explosão de pó na coleta feita após 8 horas de funcionamento da unidade, com uma concentração total de 31,18 g/m³, essa sim dentro da faixa de explosividade. Como medida de segurança específica para este local, seria recomendada a instalação de sistemas de captação do pó para moegas, conseguindo assim diminuir a concentração do pó em suspensão e evitar fagulha nesse local.

Analisando as concentrações totais encontradas no *secador de grãos* nas três medições realizadas, observa-se que, mesmo ficando abaixo da faixa de explosividade após 8 horas de operação, encontrou-se uma concentração de 17,31 g/m³, muito próxima do limite inferior de explosividade. Conclui-se como sendo um local propício à existência de fagulha, com possibilidade de dar ignição e causando assim uma explosão. Como medidas de segurança, procura-se treinar os operadores e demais funcionários quanto aos potenciais riscos de explosões, orienta-se para a limpeza periódica do local e verifica-se com cuidado o duto quebra-chama entre a fornalha e o secador para que ela não permita conduzir fagulha para a massa de grão.

No *túnel subterrâneo*, além de ser um local considerado confinado, em duas das três medições realizadas, foram encontradas concentrações dentro da faixa de explosividade, sendo elas de 21,43 g/m³ e 41,25 g/m³, respectivamente nas 4 e 8 horas de funcionamento da unidade. Analisando as medições, observou-se que a cada hora a mais de funcionamento

da fita transportadora, a tendência da concentração de pó é aumentar, pois se trata de um local confinado em que o pó não tem para onde se deslocar. Foram destacadas como medidas de segurança, a orientação para a limpeza diária do local e que as correias de transmissão devem ser mantidas esticadas, evitando assim o atrito entre estas e a polia motora, e, como medida principal, fazer a instalação de sistemas de captação do pó nesses túneis, conseguindo assim diminuir a concentração do pó em suspensão.

Nas *máquinas de limpeza*, encontrou-se uma baixa concentração de pó, sendo que, nas três medições realizadas, foi encontrado um índice muito abaixo da faixa inferior de explosividade. Mesmo assim foram destacadas como medidas de segurança o treinamento dos operadores e funcionários quanto aos potenciais riscos de explosões e para limpeza diária do local.

Diante dos resultados das concentrações totais encontradas no *elevador de transporte*, compreende-se que é grande a preocupação quanto à explosividade nesse local, sendo que, em duas das três medições realizadas, foram encontradas concentrações dentro da faixa de explosividade, sendo elas após 4 horas de funcionamento, com 99,65 g/m³, e após 8 horas de funcionamento, com 122,65 g/m³. As duas concentrações estão muito acima do limite inferior de explosividade e, como resultado, observou-se que a concentração de pó aumenta com o passar do tempo de funcionamento do equipamento. Como medidas de segurança adotadas para este local, podem-se instalar: aberturas na cabeça do elevador e fazer a cobertura apenas com um cone tipo chapéu chinês, evitando assim o rompimento de outras partes; sistema de supressão de explosões para evitar a propagação de chamas para o exterior em caso de uma explosão; janelas de explosão para descarga de pressão, quando ocorrer; motores dos elevadores à prova de explosão; maior cuidado no uso de aparelhos de solda; canecas de plástico; realizar manutenção preventiva; entre outros.

Nas concentrações encontradas no *redler de transporte*, observa-se uma grande preocupação quanto à explosividade nesse local. Dentre duas

das três medições realizadas, foram encontradas concentrações dentro da faixa de explosividade, uma com 98,76 g/m³ e outra com 113,39 g/m³, respectivamente nas 4 e 8 horas de funcionamento da unidade. Em seu interior, podem ocorrer faíscas através do contato entre partes metálicas e é um local onde é realizada manutenção com solda. Também nos elevadores, observa-se que a cada hora de funcionamento do redler a tendência da concentração de pó é aumentar. Como medida de segurança, recomenda-se fazer a instalação de janelas de alívio de explosão para descarga de pressão em caso de ocorrência, instalar motores dos redlers à prova de explosão, ter cuidado no uso de aparelhos de solda, instalação de canecas de plástico e fazer a manutenção preventiva.

A Figura 5 apresenta os locais e instantes em que as amostras apontam como concentrações ideais para

ocorrência de explosão. Observa-se que existem pontos de concentrações propícios a causar uma explosão na moega com descarga com tombador, no túnel subterrâneo, no elevador e no redler.

4.2 Testes na maquete experimental

Os resultados dos testes realizados na maquete experimental no intuito de corroborar o potencial de explosão de pós é apresentado na Figura 6.

Na Figura 6, pode-se observar o grande risco e probabilidade de ocorrer uma explosão no elevador, redler, túnel e moega com descarga através de tombador, pois estudos já realizados e comprovados pelos testes definem que a concentração encontrada está dentro do limite de explosividade.

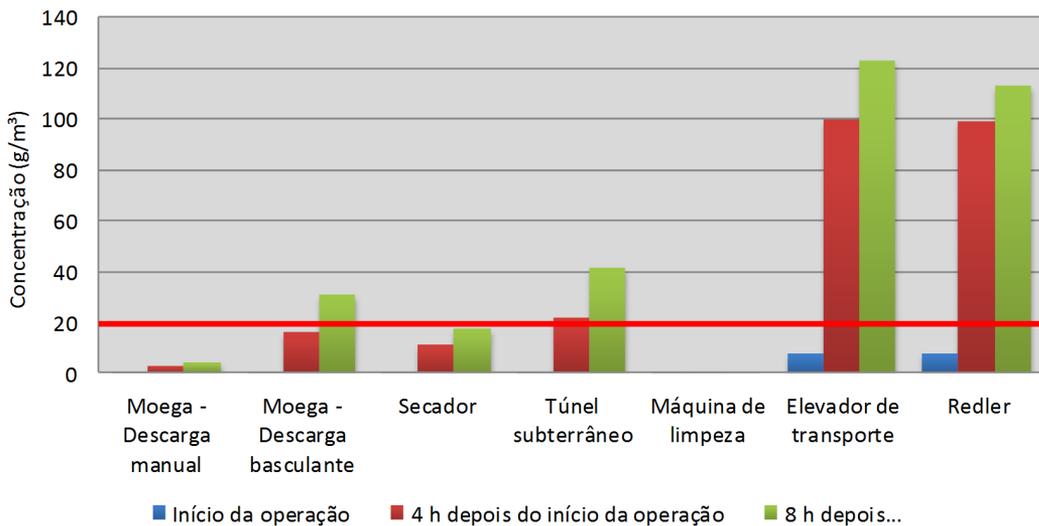


Figura 5. Concentração total de poeira acima do limite inferior de explosividade de 20 g/m³. Fonte: Elaboração dos autores.

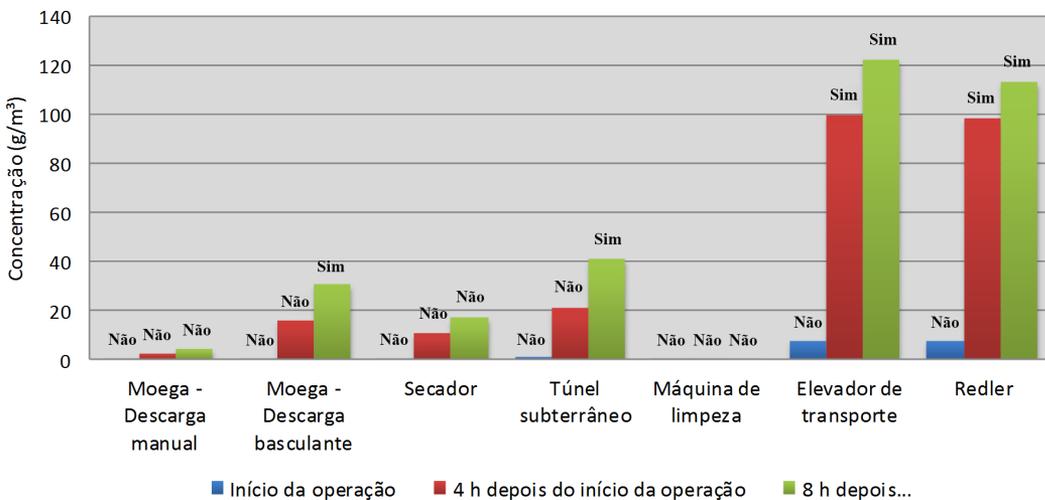


Figura 6. Resultado dos testes realizados com as concentrações encontradas para verificar a ocorrência ou não de explosão. Fonte: Elaboração dos autores.

Categoria de frequência	Categorias de consequência									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Categorias de risco									
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
1	0	0	1	1	2	2	2	3	3	3
2	2	2	2	3	3	4	4	5	5	5
3	2	3	4	5	5	5	6	7	8	8
4	3	4	4	5	6	6	7	8	9	9

Figura 7. Resultado da avaliação qualitativa de riscos no elevador e redler após 8 horas de operação. Fonte: Elaboração dos autores.

4.3 Avaliação qualitativa de riscos

Os resultados da avaliação qualitativa de riscos não tiveram o intuito de realizar avaliações pontuais, como as realizadas durante a coleta de dados. Para a avaliação de riscos, foi definido que seriam avaliados os locais que, na identificação de perigos conduzida pela empresa para confecção do Programa de Prevenção de Riscos Ambientais (PPRA), apresentavam maior perigo de explosão após 8 horas de operação: o elevador e o redler.

O resultado da avaliação de riscos é apresentado na Figura 7, o qual resultou em uma categoria de frequência 2, a qual corresponde a um evento que espera-se que possa ocorrer raramente no exercício da atividade ou na vida útil da instalação, e uma categoria de consequência 8, a qual espera-se que, em caso de explosão, possam ocorrer algumas mortes. Isso resulta em uma categoria de risco 5, a qual é de alerta e representa um risco médio não tolerado, o qual requer programa específico de controle de riscos. Esse controle foi implantado de modo que os elevadores e sistemas de alimentação dos silos devem ser projetados e operados de forma que evitem o acúmulo de poeiras, em especial nos pontos em que seja possível a geração de centelha por eletricidade estática.

5 Considerações finais

O estudo realizado permite avaliar a concentração de poeira total nos setores considerados de maior risco quanto à explosão de pó e demonstrar ao leitor como realizar estes testes em outras indústrias do ramo. Considerou de maior risco a moega com descarga manual, a moega com descarga através de tombador, o secador, o túnel subterrâneo, o redler, o elevador e a máquina de limpeza.

Em face do resultado da concentração total encontrada nas três fases de medição (início da operação, após 4 horas e 8 horas de funcionamento

normal da unidade), observou-se grande variação dos valores, e foi possível visualizar exatamente quais os locais de maior preocupação quanto ao risco de explosividade, buscando assim medidas preventivas nos pontos críticos comprovados.

Ao analisar as concentrações gerais encontradas na moega com descarga por tombador, no túnel subterrâneo, nos redlers e nos elevadores, em ordem crescente de concentração, é sabido que estes locais possuem concentrações elevadas de poeira e, portanto, recomenda-se ter maior preocupação quanto à explosão de pó em uma unidade de recebimento e armazenagem de grão. Os resultados foram corroborados por meio de um teste em maquete experimental e por meio de uma avaliação qualitativa de riscos.

Diante das concentrações totais encontradas em diversas etapas do processo de funcionamento da unidade em estudo, observa-se o crescimento da concentração conforme o tempo de operação da unidade e conclui-se que uma parcela do pó decanta rapidamente e outra, com granulometria menor, permanece suspensa no ar por um longo tempo.

Assim, torna-se necessário o desenvolvimento de estudos sobre os efeitos da estática formada pelo atrito entre as partículas de pó em suspensão e as superfícies de equipamentos e construções. Com isso, novos sistemas e equipamentos devem surgir para neutralizar a formação dos fatores e situações que influenciam e/ou minimizam os danos na ocorrência de explosões por pó.

Referências

Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2007). Dust explosions: cases, causes, consequences, and control. *Journal of Hazardous Materials*, 140(1-2), 7-44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.11.007>. PMID:17194531.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (1988). *NBR-10562: calibração de vazão, pelo método da*

- bolha de sabão, de bombas de baixa vazão utilizadas na avaliação de agentes químicos no ar*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (1991). *NBR-12085: agentes químicos no ar: coleta de aerodispersóides por filtração: método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (1995). *NBR 5418: instalações elétricas em atmosferas explosivas: procedimento*. Rio de Janeiro.
- Betenheuser, C., Ferreira, C. R., Oliveira, O. T. C. (2005). *Explosão de pó em unidades armazenadoras e processadoras de produtos agrícolas e seus derivados estudo de caso* (Monografia em Engenharia de Segurança do Trabalho). Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa.
- Brasil. Ministério do Trabalho e Emprego. (2011). *NR-31: Segurança e Saúde no Trabalho na Agricultura, Pecuária Silvicultura, Exploração Florestal e Aquicultura*. Brasília. Recuperado em 2 de dezembro de 2012, de <http://portal.mte.gov.br/>
- Cardella, B. (1999). *Segurança no trabalho e prevenção de acidentes: uma abordagem holística: segurança integrada à missão organizacional com produtividade, qualidade, prevenção ambiental e desenvolvimento de pessoas*. São Paulo: Atlas.
- Couto, J. L. V. (2007). *Riscos no trabalho em Silos e Armazém*. Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Recuperado em 15 de agosto de 2013, de <http://www.ufrj.br/institutos/it/de/acidentes/silo.htm>
- DustExplosionInfo – DEI. (2012). *Imperial sugar dust explosion*. Washington. Recuperado em 15 de agosto de 2013, de <http://www.dustexplosion.info>
- Eckhoff, R. K. (2003). *Dust explosions: in the process industries*. Amsterdam: Gulf Professional Publishing. Recuperado em 15 de agosto de 2013, de http://books.google.com.br/books?id=y4HkuKYqvoYC&hl=ptBR&source=gbs_navlinks
- Eckhoff, R. K. (2005). Current status and expected future trends in dust explosion research. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18(4-6), 225. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2005.06.012>.
- Eckhoff, R. K. (2009). Dust explosion prevention and mitigation, status and developments in basic knowledge and in practical application. *International Journal of Chemical Engineering*, 2009, 1-12. <http://dx.doi.org/10.1155/2009/569825>.
- European Commission – EC. (1994). *ATEX 94/9/EC: directive 94/9/EC (Atex 100a) on the approximation of the laws of the member states concerning equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres*. Brussels.
- Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho – FUNDACENTRO. (2001). *NHO-03: análise gravimétrica de aerodispersóides coletados sobre filtros de membrana (Método de ensaio)* (Normas de Higiene Ocupacional). São Paulo. 34 p.
- National Fire Protection Association – NFPA. (2007). *NFPA 68: standard on explosion protection by deflagration venting*. Quincy.
- National Fire Protection Association – NFPA. (2011). *NFPA 497: recommended practice for the classification of flammable liquids, gases, or vapors and of hazardous (classified) locations for electrical installations in chemical process areas*. Quincy. Recuperado em 23 de agosto de 2013, de <http://www.nfpa.org/Assets/files/AboutTheCodes/497/497-F2011-ROP.pdf>
- Rangel, E. (2007). As normas brasileiras sobre instalações elétricas em atmosferas explosivas. In *Anais do III ESW Brasil: Seminário Internacional de Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho*. Rio de Janeiro: IEEE.
- Sá, A. (1997). Risco de explosão. *Revista Proteção*, 61. Recuperado em 10 de agosto de 2010, de <http://www.safetyguide.com.br/artigos/perigexpl.htm>
- Sá, A. (1998). Explosões: o perigo dos grãos. *Revista Proteção*, 98. Recuperado em 10 de agosto de 2010, de <http://www.safetyguide.com.br/artigos/explograos.htm>
- São Paulo. Secretaria Segurança Pública – SSP. (2010). *Instrução técnica nº 027/2010*. São Paulo. Recuperado em 10 de agosto de 2010, de http://www.ccb.polmil.sp.gov.br/rev_it/IT27.pdf
- Schaltgerate, S., & Fordertechnik, S. (1999). *Basics of explosion protection*. Künzelsau: Stahl. Recuperado em 27 de julho de 2010, de <http://www.stahl.de>
- Schoeff, R. (2004). *Dust explosions: the potent power of powder*. Kansas: Kansas State University. Recuperado em 16 de agosto de 2013, de <http://www.biotech.iitm.ac.in>
- Silva, L. C. (1999). *Explosões em unidades armazenadoras de grãos*. Cascavel: Unioeste. Recuperado em 21 de agosto de 2010, de <http://www.unioeste.br>
- Taveau, J. (2012). Secondary dust explosions: how to prevent them or mitigate their effects? *Process Safety Progress*, 31(1), 36-50. <http://dx.doi.org/10.1002/prs.10478>.
- Vijayaraghavan, G. (2004). *Impact assessment, modelling, and control of dust explosions in chemical process industries* (Dissertação de mestrado). Department of Chemical Engineering, Coimbatore Institute of Technology, Coimbatore. Recuperado em 6 de março de 2014, de <http://www.technicaljournalsonline.com>