

# EXPLOSÕES (parte 1)

P.Cartwright e P.E.Pascon

**Fogo e explosão são eventos normalmente abordados quando procedemos na análise de perigo e risco em plantas de processo. Contudo, em alguns casos, os parâmetros básicos que regem estes fenômenos não encontram-se prontamente disponíveis na literatura, e precisam ser levantados através de testes em laboratório (vide Fig. 1), principalmente em se tratando de misturas e condições fora de padrão. Somente de posse destes dados poderemos garantir uma base segura para a operação.**

## Introdução

Muitos compostos manipulados na indústria, em determinadas condições, são passíveis de originar um processo de combustão. Estas condições podem fazer parte da operação normal do processo em questão; ou então, surgirem como decorrência de situações anormais.

**Fogo** ou combustão é um processo químico, descrito também como reação de combustão, acompanhada pela evolução de calor e luz, na qual um composto reage com oxigênio ou outro agente oxidante, normalmente acompanhada de chama e/ou incandescência e/ou emissão de fumaça. Tanto a frequência do “perigo de fogo” como a frequência do “evento fogo” propriamente dito podem ser estimadas através das técnicas de **análise de perigo**.

**Explosão**, de uma forma geral, pode ser definida como uma súbita e violenta liberação de energia. A violência da explosão depende da taxa na qual a energia é liberada. Esta energia pode ser energia de pressão, como no caso da ruptura de um vaso pressurizado; ou energia química, como no caso da combustão rápida de uma nuvem inflamável. Além dos efeitos de sobrepressão, as explosões por combustão também originam radiação térmica; e em função da velocidade da frente de chama se classificam em **defragação ou detonação**.

A perda de contenção de materiais inflamáveis pode resultar numa série de fenômenos correlatos, tais como: fogo em poça, jato de fogo, explosões não confinadas da nuvem de vapor (UVCE), bolas de fogo e explosões do vapor se expandindo do líquido em ebulição (BLEVE). O tipo de fenômeno de combustão exibido dependerá da forma física e das propriedades químicas do material em consideração. As conseqüências de um evento **fogo**

ou **explosão** podem ser das mais variadas: queimaduras em seres vivos, ignição de outras partes da instalação, fusão e colapso de estruturas, ruptura total de vasos, deslocamento de equipamentos e prédios, projeção de mísseis, efeito dominó, etc.... Além da intensidade do fenômeno em si, os danos causados também serão função do tempo de exposição, tipo de construção, distância e perfil biológico.

**Fig. (1) - Teste para energia mínima de ignição**



Uma das formas tradicionalmente utilizadas para representar o processo de combustão é o chamado triângulo do fogo, onde temos como partes componentes o combustível, o oxidante e a fonte de ignição. Entretanto, alguns compostos constituem exceção para esta regra. São aqueles que se auto-decompõem, e que não precisam de um oxidante externo para suportar uma chama, e se a temperatura do produto for maior que a temperatura de auto-ignição, a combustão iniciar-se-á espontaneamente. O exemplo mais conhecido é o acetileno, mas podemos encontrar comportamento similar no caso de etileno, óxido de etileno, tetrafluoretileno, tricloreto de nitrogênio e muitos outros compostos relativamente simples, contendo duplas ou triplas ligações.

Os parâmetros mais comuns de serem utilizados para avaliar a intensidade com que os fenômenos de combustão ocorrem são:

- Limites de inflamabilidade
- Ponto de fulgor
- Temperaturas de auto-ignição
- Velocidades de queima
- Taxas de aumento de pressão em vaso fechado

Estes dados são facilmente aplicáveis para misturas de gases e vapores. Entretanto, os dados equivalentes para pós e névoas são ligeiramente diferentes; e podem surgir dificuldades quando se trata de misturas vapor-névoa devido à presença de arraste ou condensação; e também no caso de misturas entre vapores e pós. Reações líquido-líquido, reações sólido-líquido e materiais líquidos ou sólidos potencialmente explosivos, como combustão em fase condensada, devem ser tratados a parte, e dados diferentes tornam-se necessários. Dados de segurança típicos são:

- temperatura segura máxima
- quantidade segura máxima
- nível mínimo de diluente inerte
- influência de impurezas na estabilidade

Um entendimento claro destes parâmetros é essencial a fim de projetarmos e construirmos plantas e processos seguros.

## **Estudo e Análise de Perigos**

Em função do processo fabril em questão, poderá existir uma gama considerável de perigos de fogo e explosão. Muitos vapores, pós suspensos, aerossóis

e gases, certamente irão explodir sob certas condições de combustível-oxidante-fonte de ignição; pós a granel podem se auto-aquecer, provocando combustão espontânea. Podem também decompor e liberar gás, o qual pode por ser inflamável, e em casos extremos os pós podem se decompor com velocidade suficiente para serem classificados como explosivos; com sistemas de reação multicomponente, a liberação de calor e taxas de evolução de gás podem ser tão altas, que podem levar à sobrepressurização e explosão da contenção primária.

Desta forma, como podemos eliminar ou mitigar estas condições, evitando acidentes ou ocorrências perigosas? Como podemos saber se os produtos ou a reação que estamos processando são passíveis de explodir, escapar ao controle ou entrar em ignição? Que precauções precisamos tomar para a proteção dos funcionários, da propriedade e do meio ambiente? A resposta à estas perguntas reside numa análise de perigos formal, mas em certos casos poderá demandar dados experimentais.

Qualquer operação na indústria de processos deveria ser objeto de uma análise de perigos, e dependendo do contexto do empreendimento, de uma análise de riscos também. Esta análise deve começar com a pesquisa dos dados de inflamabilidade dos produtos em questão. Com estes dados é possível identificar todas as situações de perigo na operação em questão. Esta análise pode ser seguida por um plano de gerenciamento, no qual se estabelecem as bases nas quais a operação poderá ser considerada segura. Isto poderia, por exemplo, consistir na eliminação da atmosfera inflamável, na exclusão das fontes de ignição, ou algum equipamento de proteção contra explosão.

As propriedades de inflamabilidade determinadas em laboratório terão uma grande influência no resultado da análise de perigos. Com estes dados será possível estimar com que frequência poderá ocorrer a explosão, qual será o nível de severidade e portanto as conseqüências, e quais seriam as medidas de proteção adequadas para proteger a planta, funcionários e meio ambiente. A interpretação e uso destes dados ainda é uma tarefa difícil para muitos profissionais da indústria. Portanto, a seguir enfocaremos os dados provenientes do laboratório, tanto para explosão de pós como para a explosão de gases, vapores, aerossóis, e seu uso na análise de perigos.

## Explosão de pós

Muitas poeiras finamente divididas, quando dispersas em concentração suficiente no ar, entrarão em ignição e explodirão, enquanto que outras não. Para estabelecermos se uma explosão com um determinado pó é possível, ainda na etapa de identificação de perigos, devemos fazer um teste de classificação de inflamabilidade grupo A/B no cilindro de combustão de 1.0 litro.

Se um pó explosivo é identificado, testes adicionais para determinar a **energia mínima de ignição (MIE)** e **temperatura mínima de ignição (MIT)** da nuvem de pó possibilitarão conhecermos a probabilidade de explosões com este pó.

Os dados de MIE informarão se centelhas eletrostáticas podem causar a ignição do pó e também ajudarão a decidir que precauções tomar. Alguns pós são tão sensitivos à ignição por centelha eletrostática, por exemplo, que o simples uso de “big bags” de polipropileno padrão, ou mesmo o uso de revestimentos de polieteno não são recomendáveis.

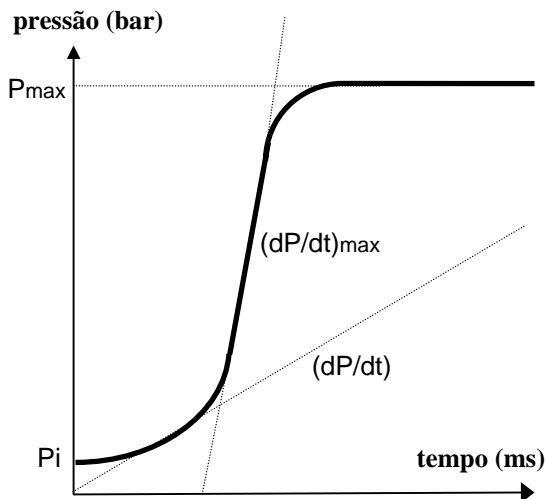


Fig. (2) - Curva da elevação da pressão em função do tempo para uma explosão

Os dados de MIT informarão a temperatura de superfície acima da qual uma nuvem de pó pode entrar em ignição espontânea. Além do uso mais óbvio de garantir que temperaturas de secagem sejam suficientemente baixas para evitar ignição, (por exemplo, em “spray-drying”); os dados de MIT também são usados como um dos parâmetros para especificar a temperatura “T” de equipamentos elétricos em atmosferas de pó. Quando usado em

conjunto com MIE, serve para avaliar a probabilidade de ignição por centelha de impacto em operações tais como transporte e moagem de pó.

As conseqüências de uma explosão com pó dependerá não só da força da explosão em si, mas também dos detalhes construtivos da planta, sua localização e distribuição populacional. Na realidade, a severidade da explosão de alguns pós, excede a de muitos solventes tradicionais.

O teste em esfera de 20 litros foi concebido para medir a força da explosão através do parâmetro **Kst**, que é uma taxa normalizada do aumento de pressão ou característica específica do produto (vide Fig. 2 e 3). Este parâmetro é correlacionado com  $(dP/dt)_{max}$  através do que conhecemos por Lei Cúbica :

$$(dP/dt)_{max} \cdot V^{1/3} = Kst$$

onde  $V$  é o volume do vaso.

Produtos alimentícios situam-se na parte mais baixa desta faixa, tipicamente até 200 bar.m/s. Produtos de química fina e farmacêuticos prolongam esta faixa até cerca de 300 bar.m/s, enquanto que flocos de alumínio finamente divididos poderiam alcançar valores  $Kst = 600$  bar.m/s ou mais. Para efeito de comparação, a explosão de uma mistura de hidrogênio no ar tem um valor  $Kg = 550$  bar.m/s.

Embora se reconheça que muitos combustíveis tradicionais, em determinadas condições, possam ocasionar explosões; isto também se aplica a muitos produtos que normalmente são considerados não-combustíveis, tais como: alumínio, zinco, milho, açúcar, etc..., quando se encontram na forma de pó finamente dividido.

Fig. (3) - Teste em esfera de 20 litros



**Tab. (1) -Testes de inflamabilidade para pós**

parâmetro testado	identificação de perigos e medidas de proteção
grupo A/B	inflamabilidade
energia mínima de ignição (MIE)	sensibilidade à eletricidade estática
temperatura de auto-ignição (AIT)	sensibilidade à centelhas de impacto
	probabilidade de ignição em superfícies quentes
	especificação de equipamentos elétricos
índice Kst	
pressão máxima da explosão	projeto de sistemas para proteção contra explosão
evolução de gás	
concentração mínima explosiva	
concentração máxima de oxigênio	projeto de sistemas para prevenção de explosão

Farinha, malte, café instantâneo, açúcar e leite em pó tem sido a causa de muitas explosões na indústria alimentícia em anos recentes. As estatísticas mostram que mais de 30% das explosões envolvendo pós ocorreram na indústria alimentícia e de ração animal. Além de danos físicos e fatalidades, estas explosões acabam por causar interrupção de negócios e perdas financeiras. Dependendo da severidade do incidente, o tempo de parada e as perdas de produção podem se estender de semanas até meses. Pagamento de indenizações, tempo necessário para conduzir uma investigação, fazer mudanças na planta existente e re-projetar, adquirir e comissionar novas instalações acabam sendo o resultado de lições aprendidas tardiamente. Em alguns casos a planta poderá estar totalmente condenada (vide Fig. 4).

**Fig. (4) - Caso de uma planta após explosão**



## Explosões com gases, vapores e aerossóis

A identificação dos perigos em qualquer operação onde seja possível uma explosão com gases ou

vapores iniciar-se-á com o ponto de fulgor. O ponto de fulgor é a temperatura mínima na qual um líquido gera vapor suficiente para formar uma mistura que possa entrar em ignição com o ar. Em geral, um líquido com um ponto de fulgor alto em relação à sua temperatura de processo não apresentará perigo de explosão, embora haja situações da qual o avaliador deveria estar ciente, onde isto não se aplique. Quando uma névoa ou aerossol de um líquido de alto ponto de fulgor é formada, pode haver mais combustível presente no meio oxidante do que ocorreria com o vapor em equilíbrio com seu líquido. Conseqüentemente, os aerossóis podem ser prontamente levados à ignição abaixo do seu ponto de fulgor. Em caso de dúvidas, ou condições específicas de operação, devemos testar a inflamabilidade destes aerossóis experimentalmente.

Assim como para os pós, informações importantes da probabilidade de ignição pode ser obtida com dados de energia mínima de ignição (MIE) e temperatura de auto-ignição (AIT). Esta informação pode ser usada pelo pessoal de planta para eliminar fontes de ignição. Entretanto, diferentemente dos pós, os dados de MIE de muitos solventes comuns estão numa faixa estreita - tipicamente de 0,1 a 1,0 mJ; mas há exceções notáveis tais como as misturas de hidrogênio com ar (MIE = 0,017 mJ) ou dissulfeto de carbono com ar (MIE = 0,015 mJ). Estes valores excepcionalmente baixos para estes solventes e gases exigem cuidados especiais no seu manuseio.

Os dados de AIT, por sua vez, podem ser comparados com as temperaturas de processo para assegurar que sejam tomadas as medidas preventivas contra ignição; e empregados na fase de

especificação dos equipamentos elétricos da planta. Novamente, as conseqüências da explosão podem ser examinadas através do uso de uma medida da violência da explosão, ou seja, a taxa normalizada do aumento de pressão **Kg**; juntamente com os dados construtivos da planta, sua localização e distribuição populacional. Felizmente, muitos solventes tradicionais tem valores de **Kg** na região de 40 a 80 bar.m/s; mas novamente há exceções, tal como as misturas de acetileno e hidrogênio no ar. De modo geral, o comportamento das nuvens de gases e vapores é mais previsível do que o das nuvens de pó.

Existem muitos dados sobre inflamabilidade de gases e vapores na literatura, mas há ocasiões em que testes experimentais ou um julgamento mais cuidadoso são necessários. Por exemplo, no caso de misturas de solventes, parâmetros como ponto de fulgor, MIE, AIT e limites de inflamabilidade

freqüentemente não são encontrados; e uma estimativa pode não ser suficiente. Neste caso, é necessário uma medição. Testes são particularmente úteis, nos casos onde oxidantes não usuais estão envolvidos, uma vez que estes dados dificilmente serão encontrados na literatura. Estes oxidantes incluem cloro e óxidos de nitrogênio, tais como óxido nitroso, óxido nítrico e tetróxido de nitrogênio. E condições ambientais atípicas, tais como temperaturas ou pressões mais altas, ou se os níveis de oxigênio se desviam dos atmosféricos. Muitos parâmetros variam em condições ambientais modificadas ou oxidantes fora de padrão, e freqüentemente de formas imprevisíveis.

Finalmente, testes de inflamabilidade podem ser necessários sempre que um terceiro componente, tal como nitrogênio ou vapor, é acrescentado a uma mistura de combustível e oxidante, necessitando da geração dos chamados diagramas ternários.

**Tab. (2) - Testes de inflamabilidade para gases e vapores**

parâmetro testado	identificação de perigos e medidas de proteção
ponto de fulgor energia mínima de ignição (MIE) temperatura de auto-ignição (AIT)	inflamabilidade sensibilidade à eletricidade estática probabilidade de ignição em superfícies quentes especificação de equipamentos elétricos
índice Kg pressão máxima da explosão limites superior e inferior de inflamabilidade concentração máxima de oxigênio	projeto de sistemas para proteção contra explosão  projeto de sistemas para prevenção de explosão

## Misturas híbridas

Diversos processos industriais poderão envolver operações em que haja misturas de pós, fibras ou flocos com gases ou vapores. Exemplos típicos são a indústria siderúrgica, carboquímica e de mineração. Também nestes casos é bastante recomendável uma avaliação experimental das respectivas misturas nas condições de operação a que serão submetidas.

É sabido que a sensibilidade de uma nuvem de pó à ignição, medida através da energia mínima de ignição, será aumentada pela adição de pequenas quantidades do vapor de um solvente, abaixo do limite inferior de explosividade. O limite inferior de explosividade também será reduzido, e a

violência da explosão da nuvem, medida através de **Kst**, poderá aumentar bastante.

## Operação segura

Os parâmetros de inflamabilidade discutidos acima serão necessários para estabelecer as bases adequadas de uma operação segura. Por exemplo, se for decidido proteger uma planta pela instalação de alívio, então precisaremos dos valores de **Kst**, obtidos através da esfera de 20 litros. De forma similar, um equipamento de supressão de explosão requer os dados de **Kst** para decidir quantos, que tamanho e que tipo de supressores utilizar. Se a

opção for a de contenção, servirá para estabelecer a pressão de projeto do vaso ou container.

Se a segurança deve ser justificada com base na exclusão das fontes de ignição, então precisaremos dos testes referentes a MIT e MIE. No caso de um processo de secagem, por exemplo, além dos dados de MIT e MIE, precisaremos também dos testes de estabilidade térmica para assegurar que eletricidade estática, auto-ignição e auto-aquecimento não causarão uma explosão. Outros dados experimentais também podem ser precisos uma vez que todas as condições de operação normais e anormais deveriam ser consideradas.

Para sistemas de armazenamento de pós, pode ocorrer evolução de gás sem haver uma explosão, numa taxa tão rápida que dá origem a aumentos significativos de pressão, quando o equipamento é fechado. O fenômeno decorre da decomposição do produto, e pode ocorrer tanto sob vácuo como em atmosfera de nitrogênio. Em decomposição não há limite de pressão, e podem ocorrer valores maiores do que aqueles gerados em explosões com concentração mínima de oxigênio (MOC).

Para armazenamento de solventes altamente inflamáveis adota-se o controle da atmosfera existente no espaço vapor, através de um terceiro

#### **Autores:**

**P. Cartwright** é diretor da **Chilworth Technology**, empresa baseada em Southampton - U.K. Suas áreas de especialização incluem testes para controle de eletricidade estática e explosão de pós, interpretação de dados e aplicação prática para prevenção e proteção contra explosão na indústria.



**Fig. (5) - Teste em escala industrial**

componente; chamado também de agente inertizante, que normalmente é nitrogênio, vapor, tetracloreto de carbono ou dióxido de carbono, o qual mantém a mistura fora de sua faixa de inflamabilidade. Aqui é necessário usar-se os diagramas ternários para determinarmos a vazão requerida para o agente inertizante.

**P. E. Pascon**, Eng. Químico, faz parte da equipe profissional da **Processos - Soluções de Engenharia**, empresa especializada nas disciplinas de segurança de processos, prevenção de perdas e proteção ambiental ([www.processos.eng.br](http://www.processos.eng.br) / [processos@processos.eng.br](mailto:processos@processos.eng.br))

