

Proteção de equipamentos sujeitos à explosão interna por deflagração

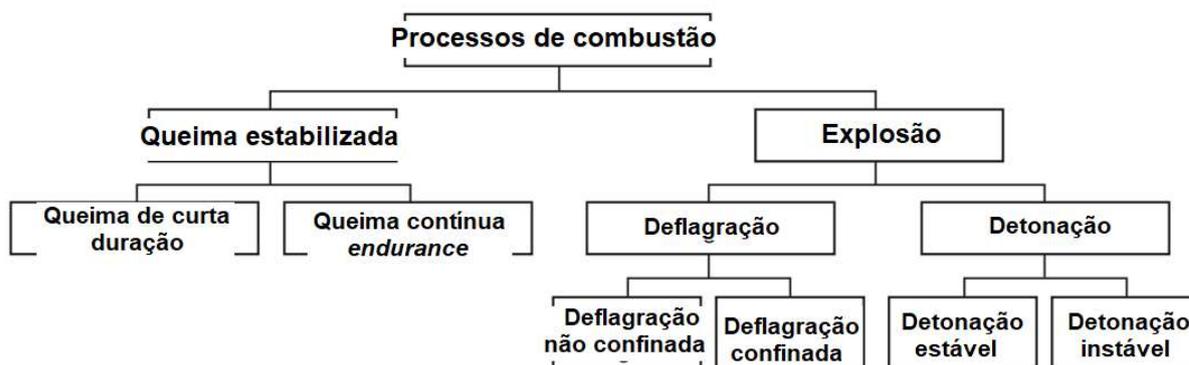
1. Introdução

Os maiores danos relativos à indústria de processamento químico, em geral, como refinarias de petróleo, petroquímicas e fábricas de produtos químicos, são os causados por fogo, explosão ou vazamento tóxico.

Uma explosão pode ser definida como uma liberação rápida e violenta de energia, que produz pressões significativas em termos do potencial de danos, muitas vezes levando a mortes e destruição material.

A explosão que se segue a uma combustão provoca ondas de pressão, ao redor do local onde ocorre, podendo ser classificada de acordo com a velocidade dessas ondas:

- Em caso de ondas subsônicas, tem-se uma deflagração;
- Em caso de ondas supersônicas (ondas de choque), tem-se uma detonação.



Diferenciação dos processos de combustão

Fonte: Norma NFPA 69

A deflagração é a propagação de uma zona de combustão a uma velocidade que é menor que a velocidade do som no meio não reagido; enquanto a detonação é a propagação de uma zona de combustão a uma velocidade que é maior do que a velocidade do som no meio não reagido.

Uma detonação pode produzir efeitos dinâmicos significativos, de ondas de choque e de aumento drástico de pressão, estando fora do escopo deste trabalho.

Este trabalho aborda apenas os carregamentos de menor intensidade e mais lentos produzidos por deflagrações que se propagam em uma fase gasosa.

O aumento de pressão produzido dentro de um equipamento, como vaso de pressão, em uma explosão por deflagração é previsível com razoável certeza.

Os tipos de explosões passíveis de ocorrência em um ambiente industrial são:

- Ignição, propagação da chama e explosão em uma nuvem de gás, com a geração de ondas de choques;
- Ignição e explosão por deflagração em um ambiente confinado, como no interior de vaso de pressão fechado;
- Ignição e explosão por deflagração e empilhamento de pressão *pressure piling* em vasos de pressão interligados a outros vasos de pressão ou equipamentos.

Nota:

Vaso de pressão *pressure vessel* designa genericamente todos os recipientes ou reservatórios estanques, de qualquer tipo, dimensões, formato ou finalidade, capazes de conter um fluido pressurizado, a partir de 1,0 barg (15 psig), e aqueles que operam em pressões negativas ou vácuo.

O risco de explosão em áreas de produção, manipulação ou armazenamento de produtos combustíveis, gases, vapores ou pós/poeiras, e mesmo em minas de carvão, é um evento a ser abordado ainda no projeto básico da planta industrial, ao se proceder a análise de perigo e risco, avaliando as condições que favoreçam este evento, tanto na operação normal do processo, como em possíveis ocorrências de situações anormais.

As consequências de uma explosão são sempre graves e podem provocar fatalidades, colapso de estruturas, ruptura total de equipamentos, como vasos de pressão, incêndios e destruição de instalações vizinhas.

Por isso, é importante buscar ações para prevenir vazamentos, incêndio ou explosão na indústria, dentre as quais:

- a. Análise de risco das áreas da planta industrial;
- b. Elaboração do PPCI-Plano de Prevenção e Proteção Contra Incêndios;
- c. Classificação de área para riscos elétricos;
- d. Implantação de sistemas de proteção.

Os sistemas de proteção contra incêndios e explosões devem ser construídos, inspecionados e testados regularmente, conforme estabelece a Norma NFPA 69, e terem manutenção preventiva e corretiva.

2. Referências

2.1. Códigos e Normas

- ASME BPVC-VIII-1 Section VIII - Rules for Construction of Pressure Vessels Division 1 - Appendix H Guidance to accommodate loadings produced by deflagration
Quando uma deflagração interna, em um vaso de pressão, de misturas vapor-ar ou poeira-ar, é definida pelo usuário como uma condição de carga de pressão a ser considerada no projeto, este Apêndice fornece orientação para o projetista aumentar a capacidade do vaso de pressão, para suportar as forças produzidas nessa condição.
- NFPA 68 Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting
Esta norma aborda projeto, localização, instalação e manutenção de equipamentos apropriados, para processos que manuseiam pós/poeiras combustíveis, como coletores, transportadores, secadores, silos e outros dispositivos, com risco de deflagração no interior, para proteção contra as pressões resultantes, de modo que os danos estruturais e mecânicos sejam minimizados.
- NFPA 69 Standard on Explosion Prevention Systems
Esta norma abrange os requisitos mínimos para projeto, localização, instalação de sistemas de prevenção e contenção de explosão interna por deflagração, em reservatórios que contenham concentrações inflamáveis de gases, vapores, névoas, pós, poeiras ou misturas híbridas.
Esta norma não se aplica a dispositivos ou sistemas projetados para proteger contra explosões por detonação.
- ABNT NBR16531 - Deflagração de gases, vapores inflamáveis e de pós combustíveis - Diretrizes gerais para ensaios dos parâmetros
Esta Norma especifica as diretrizes gerais para a realização de ensaios de parâmetros de deflagração de gases e vapores inflamáveis e de pós combustíveis.
- ABNT NBR16385 - Sistemas de prevenção e proteção contra explosão — Fabricação, processamento e manuseio de partículas sólidas combustíveis - Requisitos
Esta Norma objetiva medidas de segurança à vida e à propriedade para prevenção, proteção e mitigação de incêndios e explosão de pós em instalações industriais, que manuseiam partículas sólidas combustíveis
- ABNT NBR 16955 - Sistemas de prevenção de deflagração - Análise de riscos de incêndio e de explosão – Requisitos
Esta Norma especifica a metodologia e as técnicas usadas na análise de riscos e consequências de incêndio e de explosão, em projetos de processo, básico e executivo de instalações industriais, com sistemas de prevenção de deflagração.
- ABNT NBR 16893 – Sistemas de alívio de deflagrações - Requisitos
Esta Norma especifica os requisitos para projeto, instalação, inspeção e manutenção de dispositivos e sistemas de alívio de deflagração de gases e/ou vapores inflamáveis e de pós combustíveis e de seus componentes.
- ABNT NBR 16978-1 - Sistemas de prevenção de deflagração – Parte 1: Requisitos gerais
Esta Norma especifica os requisitos gerais para projeto, instalação, ensaios, inspeção e manutenção de dispositivos e de sistemas de prevenção de deflagração de gases, vapores e/ou névoas inflamáveis, de pós combustíveis, de misturas híbridas e de seus componentes.
- ABNT NBR 16978-2 - Sistemas de prevenção de deflagração – Parte 2: Resistência mecânica – Requisitos
Esta Norma especifica os requisitos para o projeto, a instalação, a inspeção e a manutenção de dispositivos e dos sistemas de prevenção pela técnica de resistência

mecânica à pressão de deflagração de gases, vapores e/ou névoas inflamáveis, de pós combustíveis, de misturas híbridas e de seus componentes.

- ABNT NBR 16978-3 - Sistemas de prevenção de deflagração – Parte 3: Isolamento – Requisitos
Esta Norma especifica os requisitos para projeto, instalação, inspeção e manutenção de dispositivos e de sistemas de prevenção de deflagração por métodos de isolamento de gases, vapores e/ou névoas inflamáveis, de pós combustíveis, de misturas híbridas e de seus componentes.
- ABNT NBR 16978-4 - Sistemas de prevenção de deflagração – Parte 4: Supressão – Requisitos
Esta Norma especifica os requisitos para projeto, instalação, comissionamento, inspeção e manutenção de dispositivos e de sistemas de prevenção de deflagração pela técnica de supressão aplicada a gases, vapores e/ou névoas inflamáveis, a pó combustíveis, a misturas híbridas e aos seus componentes.
- ABNT NBR 16978-5 - Sistemas de prevenção de deflagração – Parte 5: Detecção e controle de fontes de ignição – Requisitos
Esta Norma especifica os requisitos para projeto, instalação, inspeção e manutenção de dispositivos e do sistema de prevenção de deflagração, por métodos de detecção e controle de fontes de ignição, aplicados a gases, vapores e/ou névoas inflamáveis, pós combustíveis e/ou misturas híbridas e seus componentes associados.
- ABNT NBR 16978-6 - Sistemas de prevenção de deflagração – Parte 6: Métodos de controle de concentração – Requisitos
Esta Norma especifica os requisitos para projeto, instalação, inspeção e manutenção de dispositivos e de sistemas de prevenção de deflagração por métodos de controle de concentração de Oxigênio (oxidante) ou de material inflamável, como gases, vapores e/ou névoas inflamáveis, de pós combustíveis em suspensão, de misturas híbridas e de seus componentes, utilizando gases ou pós inertes.
- EN16447 Explosion isolation flap valves
Esta Norma descreve os requisitos gerais de construção e especifica métodos para avaliar a eficácia de válvulas *flap valves*, que se destinam a isolar a explosão de pó ou poeira combustível, presente em um equipamento, de modo a impedir a propagação através de tubos ou dutos conectados a outros equipamentos ou áreas da planta. A norma só se aplica a explosões de pó e poeira que se iniciam em um equipamento e não em tubulação ou duto.

2.2. Artigos *papers* recomendados

- Gas Explosion Handbook - GEXCON
<https://www.gexcon.com/wp-content/uploads/2020/08/Gas-Explosion-Handbook-1992-version-new-front-page-2019.pdf>
GEXCON é uma empresa líder mundial na área de segurança e gerenciamento de risco e dispersão, explosão e modelagem de incêndio.
- Sistemas de Proteção contra Explosão - P. E. Pascon
https://www.processos.eng.br/wp-content/uploads/2017/07/sistemas_de_protecao.pdf

3. Definições

3.1. Combustão

Combustão é um fenômeno físico-químico caracterizado por reações de oxidação, onde são liberadas grandes quantidades de energia, que ocorrem em uma taxa rápida o suficiente para produzir calor e geralmente luz na forma de brilho ou chama.

A combustão envolve sempre um combustível e um oxidante ou comburente e ocorre em meio gasoso compressível

Compostos químicos orgânicos combustíveis, como os gases de gasolina e outros hidrocarbonetos, e também os pós combustíveis, são susceptíveis à combustão em contato com uma substância comburente (Oxigênio da atmosfera), necessitando apenas de uma energia de ativação, também conhecida como temperatura de ignição.

Esta energia para inflamar o combustível pode ser fornecida através de uma faísca ou de uma chama ou de uma superfície quente.

Após iniciada a reação química de oxidação, também denominada de combustão ou queima, que é uma reação exotérmica, o calor despreendido pela reação mantém o processo em marcha, liberando energia: chamas, calor e luz.

Uma característica importante de combustão das misturas inflamáveis é a velocidade da chama, que pode ser classificada como subsônica ou supersônica.

A deflagração e a detonação são duas formas pelas quais a energia pode ser liberada.

Se o processo de combustão se propaga em velocidades subsônicas (mais lentas que a velocidade do som no meio em combustão), é uma deflagração.

Se o processo de combustão se mover em velocidades supersônicas (mais rápido do que a velocidade do som no meio em combustão), é uma detonação.

Embora a ação da deflagração seja empurrar o ar à sua frente, os objetos atingidos não explodem, porque a taxa de combustão é relativamente lenta.

Já a ação da combustão na detonação é tão rápida que resulta em uma onda de choque, acarretando estilhaços ou pulverização dos obstáculos em seu caminho.

3.2. Deflagração

Deflagração é a explosão e a propagação de uma zona de combustão, em que a frente de chama do meio em combustão avança em alta velocidade, porém inferior à velocidade do som no meio que não reagiu ou no ar, ou seja, se propaga em velocidade subsônica, com as seguintes características:

- presença de chama;
- ruído mais ou menos intenso;
- grande desenvolvimento de calor;
- sem ou fraca onda de choque.

A velocidade de chama é a velocidade com que a frente da chama se desloca através da mistura ar-combustível, inflamando a região ainda não queimada.

A deflagração de uma mistura inflamável acontece em razão de ignição provocada por uma faísca, arco elétrico, eletricidade estática, auto combustão ou fricção entre partículas sólidas em suspensão.

Em uma deflagração, o mecanismo de propagação da reação de explosão no meio ainda não queimado é por transferência de calor e massa.

O material ao redor do local da deflagração é aquecido acima de sua temperatura de autoignição, permitindo que a reação se propague.

A transferência de energia por esses meios é um processo em taxas de propagação menores que a velocidade do som no material não reagido.

Para a ocorrência de uma deflagração, é necessária a combinação dos seguintes componentes:

- concentração do fluido inflamável dentro da faixa de inflamabilidade ou explosividade;
- concentração suficiente de oxidante para suportar a combustão;
- presença de fonte de ignição;
- ambiente aberto ou confinado.

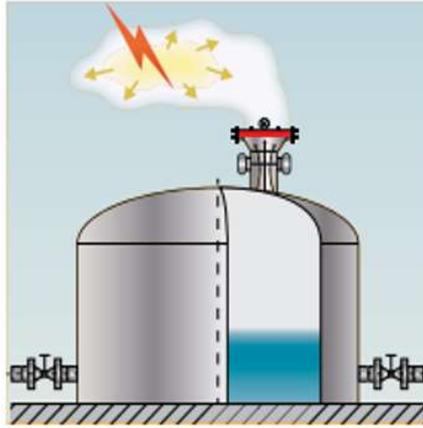
A ignição de uma mistura explosiva inicia uma deflagração, que pode ser atmosférica ou confinada.

a. Deflagração atmosférica

É a que ocorre ao ar livre, sem aumento da pressão, como nos tanques de armazenamento de combustíveis, em que são usados respiros e válvulas de alívio de pressão e vácuo, para permitir a ventilação do tanque e o controle da emissão de vapores inflamáveis.

Os vapores emanados do conteúdo do tanque podem ser ignitados por uma descarga elétrica atmosférica.

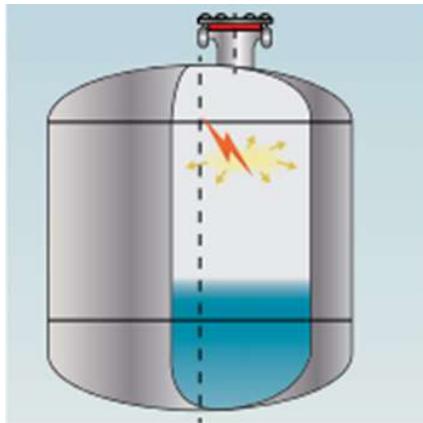
Para impedir a entrada de chamas externas e o risco de explosão interna, os respiros e as válvulas de alívio são utilizados acoplados a dispositivos corta-chamas.



Deflagração atmosférica em tanque de armazenamento de combustível

b. Deflagração de pré-volume ou confinada, com aumento da pressão.

É o que acontece dentro de um vaso de pressão fechado e é iniciada por uma fonte de ignição interna, como faísca ou centelha proveniente de eletricidade estática.



Deflagração interna ou confinada em vaso de pressão fechado

c. Deflagração em linha

É a que acontece dentro de um tubo ou duto, em que a combustão se desloca ao longo do seu eixo, na velocidade de propagação da chama, com potencial para se tornar uma detonação. A deflagração em linha ocorre em tubulações ou dutos, quando a fonte da chama é no interior de um tubo ou duto, e acontece na condição de $L/D < 27$, em que: L- comprimento do trecho percorrido pela chama a partir da fonte de ignição até um equipamento conectado e D - diâmetro do tubo ou duto.

Em equipamentos como vasos de pressão, a deflagração resulta em um aumento de pressão uniforme em todo o vaso, o que não ocorre em um tubo ou duto, onde a velocidade e a pressão de explosão podem variar ao longo do comprimento do tubo ou duto.

Se o fluxo for altamente turbulento e se o tubo ou duto for longo o suficiente, a velocidade de chama pode atingir um valor tal que a detonação ocorre.

3.3. Detonação

Detonação é a explosão e a propagação de uma zona de combustão, em que a frente de chama avança em velocidade acima do som, no meio que não reagiu ou no ar, ou seja, se propaga em velocidade supersônica, e é caracterizada pelo súbito aumento de pressão e por ondas de choque.

Em uma detonação, o mecanismo de propagação da explosão é por aquecimento e por choque compressivo.

A detonação ocorre muito rapidamente devido à transmissão das forças dinâmicas envolvidas e as velocidades de propagação da detonação são sempre maiores do que a velocidade do som no material não reagido.

Por outro lado uma deflagração pode sofrer transição para uma detonação, como pode ocorrer em tubos e dutos, mas é pouco provável que ocorra em equipamentos como vasos de pressão.

A transição de deflagração para detonação, no interior de um tubo ou duto, acontece na condição de $L/D \geq 27$, em que: L- comprimento do trecho percorrido pela chama a partir da fonte de ignição até um equipamento conectado e D - diâmetro do tubo ou duto.

A detonação é instável durante a transição do processo de combustão desde a deflagração até a detonação estável.

A transição ocorre em um período limitado, no qual a velocidade da frente de chama não é constante e onde a pressão da explosão é significativamente maior do que na zona de detonação estável.

A detonação é estável enquanto em progresso através de um ambiente confinado, sem variação significativa de velocidade e pressão características.

As detonações podem ocorrer em tubulações e dutos, mas em equipamentos como vasos de pressão, fornos de processo e caldeiras, as explosões por deflagração são mais comuns.

3.4. Evolução da deflagração para a detonação

A transição de um processo de combustão de uma deflagração para uma detonação estável passa pela detonação instável.

A figura, a seguir, ilustra a progressão de uma explosão em tubulação ou duto.

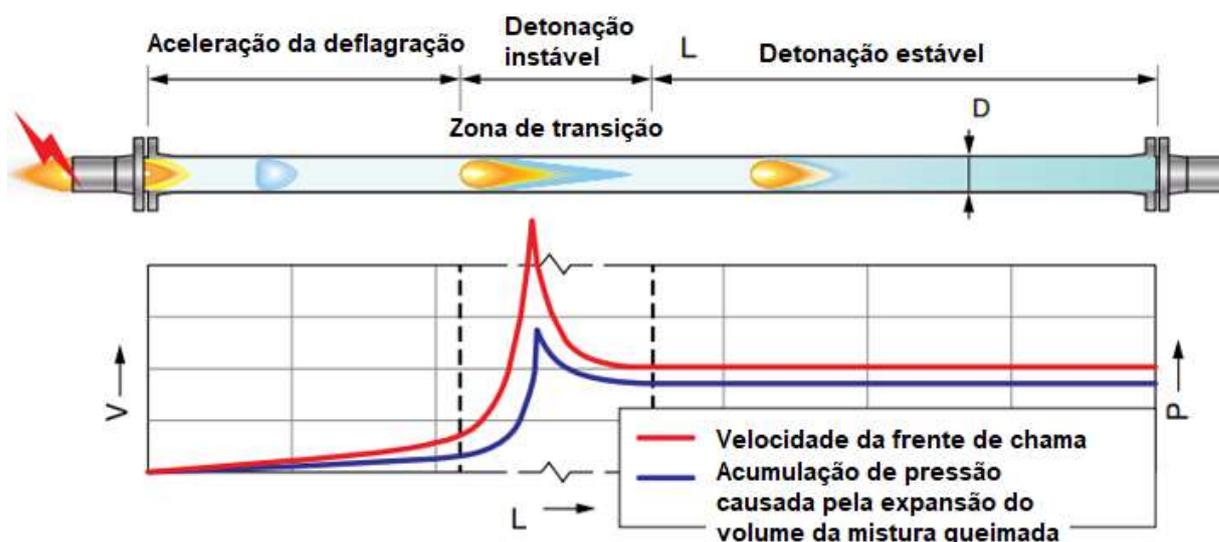


Figura: Uma explosão em-linha, isto é, dentro de um tubo ou duto, se inicia como uma deflagração, evoluindo para uma detonação instável e depois em uma detonação estável.

Um tubo cheio de um gás explosivo é ignitado em uma extremidade e a chama se propaga da fonte de ignição para a outra extremidade do tubo.

Inicialmente, na primeira seção do tubo, a velocidade da frente da chama e a pressão de explosão são baixas, trata-se de uma deflagração.

Em seguida, a velocidade da onda de combustão e a pressão de explosão aumentam rapidamente e a deflagração torna-se uma detonação instável.

Quando a velocidade e a pressão diminuem, o evento se torna uma detonação estável, que independentemente do comprimento do tubo se propaga em velocidade supersônica através do tubo.

3.5. Empilhamento de pressão *pressure piling*

Este fenômeno é referido como pré-compressão ou empilhamento de pressão e é um efeito dinâmico causador de explosão e altas pressões, nos equipamentos envolvidos.

Quando dois ou mais vasos de pressão estão conectados por tubulações, todos contendo uma mistura inflamável combustível-ar, a deflagração em um dos vasos pode pré-comprimir a mistura não queimada nos outro(s) vaso(s).

Com a chegada da frente de chama, denominada "jato de chama", no(s) outro(s) equipamento(s) interligado(s), há uma nova deflagração e a pressão que se desenvolve nos demais vasos pode ser substancialmente maior do que normalmente aconteceria em um único vaso, podendo no limite se tornar uma detonação.

3.6. Explosão

Explosão é uma reação de oxidação abrupta, que produz um aumento expressivo na temperatura, na pressão ou em ambas, simultaneamente, podendo acarretar a ruptura de um invólucro ou recipiente, devido à elevação da pressão interna.

É um processo caracterizado por súbito aumento de volume dos gases ignitados e grande liberação de energia, geralmente acompanhado por altas temperaturas, produção de gases, forte estrondo e ondas de pressão ao redor do local onde ocorre.

Explosões são classificadas de acordo com essas ondas:

- em caso de ondas subsônicas, tem-se uma deflagração,
- em caso de ondas supersônicas, tem-se uma detonação.

Em geral, para que ocorra uma explosão, dentro de um equipamento ou tubulação ou duto, que contenham gases, vapores ou pós combustíveis, em misturas com ar, existem duas possibilidades.

- A primeira é que a explosão ocorre devido a uma fonte de ignição de alta energia que leva, diretamente a uma detonação.
- O segundo cenário, que é a situação mais provável, ocorre devido a uma fonte de ignição de baixa energia. Nesse caso, uma deflagração confinada se desenvolve primeiro, no entanto, se a explosão for dentro de um tubo ou duto, a deflagração apresenta tendência de aceleração após sua ignição, e a frente de chama pode acelerar e sofrer uma transição de deflagração para detonação.

Na deflagração a queima requer combustível para se espalhar, se não houver combustível, o fogo simplesmente se extingue.

Já a detonação libera muita energia em um intervalo de tempo muito curto, sendo uma forma dramática e destrutiva de explosão, como ocorre com os explosivos.

A detonação libera muita energia em um intervalo de tempo muito curto, sendo uma forma dramática e destrutiva de explosão, como ocorre com os explosivos.

4. Tipos de explosões em um ambiente industrial

As misturas combustíveis de gás, vapores ou pós com ar são sempre propensas a ignitar, em presença de faíscas, superfícies quentes ou chama.

Assim recomendam-se:

- Evitar misturas combustíveis que podem causar explosões internas em equipamentos, é uma má prática confiar apenas na eliminação de fontes de ignição.
- Particularmente nos casos de empilhamento de pressão, que pode ocorrer entre equipamento interligados por tubulação e/ou duto, levar em consideração a possibilidade de transição de deflagração para detonação.
- A pressão máxima de uma deflagração confinada, em vasos de pressão, depende da pressão inicial existente no equipamento.

Em pressão inicial acima de 3 barg, a pressão de explosão por deflagração é elevada, de acordo com a metodologia da Norma NFPA 69 acima de 35 barg, portanto se deve impedir, de todas as formas, misturas inflamáveis, em vasos com pressão inicial acima de 3 barg, pois, a pressão da explosão é muito forte e o vaso pode romper e causar uma catástrofe.

Nota:

Conforme informado na Norma NFPA 69, a razão de pressão de deflagração (relação entre a pressão gerada na deflagração e a pressão absoluta inicial ou existente no equipamento) para a maioria das misturas gás-ar é 9, já para as misturas de pó-ar o valor é 13.

E para vasos com pressão inicial superior a 2 barg, a razão de pressão de deflagração máxima deve ser determinada por teste ou cálculos.

- Projetar vasos de pressão com risco de explosão interna protegidos com discos de ruptura, pois aliviam a pressão, quase que instantaneamente, ao contrário das válvulas de segurança que requerem um tempo bem maior para abertura.
- Para a combustão de gás/vapor-ar e pó/poeira-ar, vários métodos para reduzir a probabilidade de ocorrência da explosão são descritos na literatura técnica aplicável, sendo uma boa prática de engenharia adotá-los, independentemente, da capacidade do vaso de pressão em suportar os efeitos da deflagração.

4.1. Ignição e explosão em uma nuvem de gás

Se uma nuvem de gás, formada a partir da liberação de um vazamento, por exemplo, não estiver dentro dos limites de inflamabilidade ou se a fonte de ignição estiver faltando, a nuvem de gás pode diluir-se e desaparecer.

Caso contrário, a ignição pode ocorrer imediatamente ou levar alguns minutos, dependendo das circunstâncias.

No caso de uma ignição imediata, ou seja, antes de ocorrer a mistura do gás com o ar, ocorre apenas um incêndio.

A situação mais perigosa acontece se uma grande nuvem de combustível-ar já misturados se formar, entrar em ignição e gerar uma explosão.

A onda de pressão gerada na explosão depende de quão rápido a chama se propaga e se a pressão pode ou não ser aliviada, isto é, se é ignição na atmosfera ou em ambiente confinado.

4.2. Propagação da chama e aumento da pressão em uma nuvem de gás

Quando um volume ou nuvem de gás é ignitado, a chama pode se propagar em dois modos distintos, através das misturas inflamáveis:

- i) deflagração;
- ii) detonação.

A deflagração é o modo mais comum de propagação da chama em explosões acidentais de gás. É definida como uma explosão em que a frente da chama se propaga em velocidade menor que a do som ou subsônica, na mistura combustível-ar não queimada, que está imediatamente à frente da chama.

A detonação é a explosão em que a velocidade da frente da chama é igual ou maior que a do som ou supersônica, na mistura combustível-ar não queimada, imediatamente à frente da chama, que por sua vez é posta em movimento pelos próprios produtos de combustão em expansão.

Em termos simples, uma onda de detonação pode ser descrita como uma onda de choque imediatamente seguida por uma chama.

A compressão causada pela onda de choque aquece o gás e dispara e mantém a detonação.

Uma detonação pode:

- i) ser iniciada diretamente pela detonação de uma carga altamente explosiva, ou
- ii) ser produzida quando uma deflagração acelera devido a obstáculos e confinamento e transita para uma detonação.

Na propagação da chama através de mistura inflamável de gás-ar, há dois mecanismos que causam o aumento da pressão, são eles:

- i) propagação rápida e livre da chama;
- ii) queima em um espaço ou volume confinado.

Na maioria das explosões acidentais, uma combinação desses dois efeitos causa o aumento da pressão.

Em uma explosão de gás de uma nuvem de hidrocarbonetos-ar (inflamada por uma fonte fraca, por exemplo, uma faísca), a chama normalmente começa como uma chama laminar lenta com uma velocidade da ordem de 3-4 m/s.

Se a nuvem estiver realmente não confinada e desobstruída (ou seja, nenhum equipamento ou outras estruturas são engolfados pela nuvem), a chama provavelmente não acelera a velocidade maior de 20-25 m/s, e a sobrepressão será insignificante..

Porém, no interior de um edifício ou em áreas industriais, como as unidades de processo de refinarias de petróleo e os módulos de plataformas de petróleo offshore, com vários equipamentos e vasos de pressão, a chama pode acelerar a várias centenas de metros por segundo. Nestas situações, quando o gás está queimando, a temperatura aumenta e o gás se expande por um fator de até 8 a 10 vezes o volume inicial.

O gás não queimado é, portanto, empurrado para frente da chama e um campo de escoamento ou fluxo turbulento é gerado.

Quando a chama se propaga em um meio turbulento à frente da chama, a taxa de queima efetiva e a velocidade do fluxo aumentam ainda mais.

Este mecanismo causa aceleração da chama e altas pressões de explosão, podendo levar à transição para detonação.

4.3. Ignição e explosão em um ambiente confinado

As fontes de ignição geralmente ocorrem dentro ou fora da planta de processo, mas também podem ocorrer no interior de equipamentos e tubulações.

As fontes de ignição mais comuns incluem:

- (1) Chamas;
- (2) Superfícies quentes;
- (3) Faíscas;

- (4) Produtos químicos:
 - (a) Compostos instáveis;
 - (b) Compostos reativos e catalisadores;
 - (c) Sulfeto de ferro pirofórico;
- (5) Centelhas de eletricidade estática.

Se uma mistura inflamável pode estar presente, devem ser tomadas precauções para eliminar todas as possíveis fontes de ignição.

A ignição também pode ocorrer se a mistura inflamável for aquecida até sua temperatura de autoignição.

A explosão de uma mistura inflamável confinada em um vaso de processo ou tubulação pode ser consequência de uma deflagração ou de uma detonação.

Esses dois tipos de explosão diferem fundamentalmente e exigem contramedidas diferentes. Ambos os tipos, mas particularmente a detonação, podem ser muito destrutivos.

As condições para que ocorra uma deflagração são que a mistura de gases esteja dentro da faixa inflamável e que haja uma fonte de ignição ou que a mistura seja aquecida até sua temperatura de autoignição.

As condições para a ocorrência de uma detonação são semelhantes e as faixas ou *ranges* de inflamabilidade de misturas ar-combustível, para ocorrência de detonação, são assumidas como as da deflagração, embora sejam geralmente mais estreitas que na deflagração.

As consequências de uma explosão dependem do ambiente em que o volume da mistura gás-ar, vapor-ar ou pó-ar está contido.

Portanto, é comum classificar uma explosão conforme o ambiente onde a explosão ocorre:

- i) Explosões confinadas dentro de vasos, tubulações, canais, minas ou túneis;
- ii) Explosões parcialmente confinadas em compartimentos, edifícios, ou instalações de refinaria de petróleo, petroquímicas e plataformas *offshore* de produção de petróleo;
- iii) Explosões não confinadas ou sem obstruções.

Deve ressaltar-se que esses termos não são estritamente definidos.

Em um evento acidental, pode ser difícil classificar a explosão.

Como exemplo, uma explosão, a princípio não confinada, pode ocorrer em áreas localizadas que são parcialmente confinadas, envolvidas pela nuvem de gás que vazou, de uma planta de processamento sem grandes obstruções, acarretando altas pressões e fogo.

Um vaso de pressão tem aberturas, relativamente pequenas, como tubulações conectadas e válvulas de alívio, através das quais a pressão poderia ser aliviada, durante uma explosão. Na verdade, o processo de alívio é frequentemente muito lento, para reduzir a pressão rapidamente, e o vaso se comporta como um vaso totalmente fechado ou hermético, em relação ao aumento súbito de pressão.

Nos vasos fechados, a pressão inicial, que é a pressão interna no instante da explosão, é um parâmetro que influencia a pressão gerada na explosão em condições de volume constante ou confinada, isto é, quanto maior a pressão inicial, maior a energia da explosão.

5. Explosão por deflagração em Vaso de Pressão fechado

Uma explosão de deflagração em vaso de pressão depende de cinco elementos: combustível, Oxigênio, dispersão, fonte de ignição e um espaço confinado.

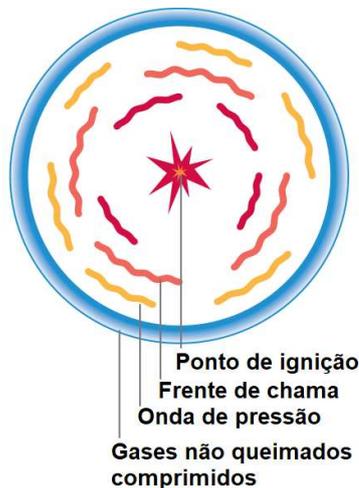
O combustível pode ser um material a granel disperso como uma nuvem de partículas finas, um gás inflamável ou um produto químico volátil que pode criar vapores inflamáveis.

O Oxigênio está presente na maioria dos processos industriais.

A ignição pode ser gerada por uma chama, um arco de solda, uma combustão espontânea ou por faísca de fricção/eletrostática.

Por fim, a maioria dos processos industriais pode propiciar o espaço confinado, como o interior de um equipamento.

Quando os cinco elementos se juntam, existe o potencial para explosão no equipamento e na unidade industrial.



Explosão por deflagração confinada

5.1. Deflagração interna em equipamento ou vaso de pressão

Se a explosão de um volume de mistura estequiométrica de combustível-ar acontece dentro de um vaso de pressão fechado, a expansão do gás ao queimar e a propagação rápida da chama, nesta condição confinada, não necessariamente geram um aumento expressivo da pressão interna.

Ou seja, em um vaso de pressão fechado, na ocorrência de explosão por deflagração, uma alta velocidade de chama não é um requisito para a geração de pressão muito elevada.

Assim, a transição para a detonação não é provável em vasos de pressão, a não ser em situações especiais como empilhamento de pressão em vasos interligados ou vasos com vários compartimentos internos.

As detonações, geralmente, ocorrem em tubulações e dutos, mas são pouco comuns em vasos de pressão.

A proteção contra explosão por deflagração, conforme descrito na Norma NFPA 69, inclui vários procedimentos, dentre eles: aberturas ou painéis de alívio, eliminação de faíscas para supressão de explosão, redução da concentração de oxidante, redução da concentração de combustível, isolamento de explosão e contenção da explosão.

Na contenção da deflagração, a pressão máxima de explosão por deflagração, de uma mistura combustível-ar, no interior de um vaso, pode ser calculada conforme indicado na Norma NFPA 69 *Standard on Explosion Prevention Systems*.

Nota:

A Norma NFPA 69 recomenda os valores para a razão "R", entre a pressão de deflagração máxima e a pressão inicial máxima do equipamento ou tubulação.

"R" é uma relação adimensional para misturas inflamáveis de gás ou vapor-ar e pó-ar.

Os sistemas de alívio de explosão, isolamento da explosão, supressão de explosão e contenção de explosão não devem ser usados nos casos em que a detonação é considerada um risco confiável. Nesses casos, o risco de explosão deve ser mitigado evitando a formação de misturas que podem detonar, como os métodos de redução da concentração do combustível ou do oxidante.

5.2. Empilhamento de pressão *pressure piling*

As consequências da explosão por deflagração dentro de um vaso de pressão dependem se o vaso está ou não interligado a outro(s) vaso(s).

Nas unidades de processamento de petróleo, refinarias, petroquímicas e plataformas offshore, há grandes volumes de combustíveis, em vasos de pressão e tanques de armazenamento, interligados por tubulações ou dutos.

No caso de uma explosão interna, em um ou mais desses equipamentos, essas interligações podem causar um aumento muito forte de pressão nos demais equipamentos conectados.

Este fenômeno conhecido como empilhamento *pressure piling* de pressão é um efeito dinâmico causador de explosão e altas pressões, nos equipamentos interligados.

A explicação é que quando ocorre uma deflagração em um determinado vaso de pressão, a pressão interna aumenta e um volume de gás não queimado flui para os equipamentos interconectados, pré-comprimindo os conteúdos existentes.

A frente de chama ao entrar em um ou mais desses vasos, onde o gás está pré-comprimido, causa um aumento de pressão muito rápido, muito maior do que no vaso em que se iniciou a deflagração, devido ao empilhamento ou sobreposição de pressão.

Empilhamento de pressão ou *pressure piling* é, pois, a condição durante a deflagração, em que a pressão aumenta no meio não reagido, situado à frente da zona de propagação de combustão.

Pressure piling ou sobreposição de pressões descreve fenômenos relacionados à combustão de gases em vasos interconectados por tubulações a outros equipamentos.

O empilhamento de pressão também pode acontecer com a deflagração em um vaso subdividido por câmaras internas.

A explosão de gases em vasos interligados por tubulações ou com câmaras internas é chamada de "acúmulo ou empilhamento de pressão" ou "*pressure piling*".

O empilhamento de pressão é reconhecido como um perigo de explosão especial, muito violenta e destrutiva, em vasos subdivididos em compartimentos separados e/ou conectados por tubos ou dutos.

Há evidências que a deflagração da mistura inflamável em um vaso pode propagar-se para outro, produzindo picos de pressão, várias vezes maiores do que a explosão em um único vaso, é um efeito conhecido como empilhamento de pressão ou *pressure piling*.

Se uma deflagração em um vaso de pressão, se propagar de um vaso para outro através de uma tubulação, o aumento da turbulência, a pré-compressão e, em seguida, a ignição pelo jato da frente de chama, resultam em uma pressão de deflagração muito maior do que a anterior.

Para explicar o fenômeno, considere um par de vasos conectados entre si por um tubo, com ambos os vasos contendo a mesma mistura inflamável e a mesma pressão interna inicial. Se ocorrer a deflagração na mistura do 1º vaso, a frente de chama resultante se expande, causando um aumento simultâneo na pressão.

Isso produz imediatamente uma diferença de pressão entre o 1º e o 2º vasos, fazendo com que o gás não queimado seja expulso para o 2º vaso e comprima o seu conteúdo.

Este processo continua até que a chama se propague para o 2º vaso, provoque a ignição do gás já pré-comprimido dentro dele e produza uma violenta explosão.

Portanto, em um sistema com vários vasos conectados por tubulações, a ignição de mistura inflamável em um dos vasos (explosão 'primária') leva ao empilhamento de pressão nos demais vasos, provocando uma deflagração (explosão 'secundária'), que pode evoluir para detonação, com pressões de explosão tão elevadas, que os equipamentos não resistem.

O cálculo analítico dessas pressões e taxas de aumento de pressão ainda não é possível.

Nota:

A Norma NFPA 69 apresenta, somente para fins informativos, no Annex G *Deflagration Containment Calculation Method for Two Interconnected Vessels*, um método para estimar a pressão resultante do empilhamento, entre apenas dois vasos de pressão interligados, com base na relação de volume dos vasos e no diâmetro da tubulação de interconexão.

6. Sistemas de proteção em atmosferas potencialmente explosivas

As Normas NFPA 68 e NFPA 69 indicam várias técnicas de prevenir, aliviar e resistir às deflagrações internas em equipamentos de processamento de fluidos líquidos e gases combustíveis e inflamáveis e sistemas de misturas de pó.

A proteção contra explosão interna por deflagração em vasos de pressão, tubos e dutos, pode ser exercida com as seguintes técnicas:

- a. Técnicas de prevenção de deflagração
 - Redução da concentração de combustível;
 - Redução da concentração de oxidante.
 - Purga e inertização *blanketing* de equipamento.
- b. Técnicas de controle de efeitos da deflagração
 - Abertura de alívio de explosão por deflagração;
 - Supressão automática de deflagração;
 - Isolamento automático de deflagração.
 - Abafadores ou corta-chamas *flame arresters*;
 - Contenção da pressão.

As Normas da ABNT que abordam estas técnicas são:

- NBR 16893 – Sistemas de alívio de deflagrações – Requisitos

Especifica os requisitos para projeto, instalação, inspeção e manutenção de dispositivos e sistemas de alívio de deflagração de gases e/ou vapores inflamáveis e de pós combustíveis e de seus componentes.

- NBR 16978-1 - Sistemas de prevenção de deflagração – Parte 1: Requisitos gerais
Especifica os requisitos gerais para projeto, instalação, ensaios, inspeção e manutenção de dispositivos e de sistemas de prevenção de deflagração de gases, vapores e/ou névoas inflamáveis, de pós combustíveis, de misturas híbridas e de seus componentes.

- NBR 16978-2 - Sistemas de prevenção de deflagração – Parte 2: Resistência mecânica – Requisitos

Especifica os requisitos para o projeto, a instalação, a inspeção e a manutenção de dispositivos e dos sistemas de prevenção pela técnica de resistência mecânica à pressão de deflagração de gases, vapores e/ou névoas inflamáveis, de pós combustíveis, de misturas híbridas e de seus componentes.

- NBR 16978-3 - Sistemas de prevenção de deflagração – Parte 3: Isolamento – Requisitos

Especifica os requisitos para projeto, instalação, inspeção e manutenção de dispositivos e de sistemas de prevenção de deflagração por métodos de isolamento de gases, vapores e/ou névoas inflamáveis, de pós combustíveis, de misturas híbridas e de seus componentes.

- NBR 16978-4 - Sistemas de prevenção de deflagração – Parte 4: Supressão – Requisitos

Especifica os requisitos para projeto, instalação, comissionamento, inspeção e manutenção de dispositivos e de sistemas de prevenção de deflagração pela técnica de supressão aplicada a gases, vapores e/ou névoas inflamáveis, a pó combustíveis, a misturas híbridas e aos seus componentes.

- NBR 16978-5 - Sistemas de prevenção de deflagração – Parte 5: Detecção e controle de fontes de ignição – Requisitos

Especifica os requisitos para projeto, instalação, inspeção e manutenção de dispositivos e do sistema de prevenção de deflagração, por métodos de detecção e controle de fontes de ignição, aplicados a gases, vapores e/ou névoas inflamáveis, pós combustíveis e/ou misturas híbridas e seus componentes associados.

- NBR 16978-6 - Sistemas de prevenção de deflagração – Parte 6: Métodos de controle de concentração – Requisitos

Especifica os requisitos para projeto, instalação, inspeção e manutenção de dispositivos e de sistemas de prevenção de deflagração por métodos de controle de concentração de oxigênio (oxidante) ou de material inflamável, como gases, vapores e/ou névoas inflamáveis, de pós combustíveis em suspensão, de misturas híbridas e de seus componentes, utilizando gases ou pós inertes.

6.1. Técnicas ou métodos de prevenção da deflagração

Conforme a Norma NFPA 69, *Standard on Explosion Prevention Systems*, os seguintes métodos devem ser considerados na prevenção do risco da combustão, assegurando a formação e a manutenção de uma atmosfera não inflamável no interior do equipamento, baseado no controle das misturas de gases ou pós inflamáveis:

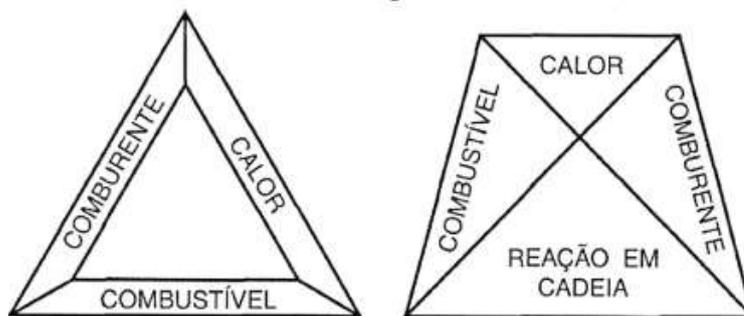
- a. Redução da concentração de combustível;
- b. Redução da concentração de oxidante;
- c. Purga e inertização *blanketing* de equipamento.

6.1.1. Redução da concentração de combustível

Os elementos que compõem ou promovem a combustão e a explosão são:

- Combustível - hidrocarbonetos em geral;
- Comburente ou oxidante - Oxigênio do ar atmosférico;
- Calor - chama, faísca, superfície quente etc.;
- Reação em cadeia - combustão, explosão.

Esse quarto elemento, “reação em cadeia”, compõe o quadrado do fogo, substituindo o antigo triângulo do fogo.



Uma das formas de se prevenir a explosão por deflagração é reduzir ou aumentar a concentração do combustível, na mistura inflamável, de modo a fugir da faixa *range* ou limites de inflamabilidade, tornando a mistura combustível-ar “mistura pobre” ou “mistura rica”.

Nota:

- Limites Inflamabilidade

São as concentrações mínima e máxima de um material combustível, em uma mistura homogênea com um oxidante gasoso, que irá propagar uma chama.

- Limite inferior de inflamabilidade (LII)

É a menor concentração de uma substância combustível em um oxidante gasoso que irá propagar uma chama.

- Limite Superior de Inflamabilidade (LSI)

É a maior concentração de uma substância combustível em um oxidante gasoso que irá propagar uma chama.

- Faixa *range* de inflamabilidade

É a faixa de concentrações entre os limites inferior e superior de inflamabilidade.

Concentrações de gás abaixo do LII (Limite Inferior de inflamabilidade) não são combustíveis pois, nesta condição, tem-se excesso de Oxigênio e pequena quantidade do produto para que a combustão ocorra. Esta condição é chamada de “mistura pobre”.

Concentrações de gás acima do LSI (Limite Superior de Inflamabilidade) não são combustíveis pois, nesta condição, tem-se excesso de produto e pequena quantidade de Oxigênio para que a combustão ocorra. Esta condição é chamada “mistura rica”.

O limite de inflamabilidade é a faixa de concentração, no ar, dos vapores de um fluido inflamável, entre os quais uma mistura gasosa é explosiva ou inflamável.

Para um gás ou vapor inflamável queimar é necessária que exista, além da fonte de ignição, uma mistura chamada “ideal ou estequiométrica” entre o ar atmosférico (Oxigênio) e o gás combustível.

A quantidade de Oxigênio no ar é praticamente constante, em torno de 21% em volume.

Já a quantidade de gás combustível necessário para a queima, varia para cada produto e está dimensionada através de duas constantes: o Limite Inferior de Inflamabilidade (ou explosividade) (LII) e o Limite Superior de Inflamabilidade (LSI).

O LII (Limite Inferior de inflamabilidade) é a mínima concentração de gás que, misturada ao ar atmosférico, é capaz de provocar a combustão do produto, a partir do contato com uma fonte de ignição. Concentrações de gás abaixo do LII não são combustíveis pois, nesta condição, tem-se excesso de Oxigênio e pequena quantidade do produto para a queima. Esta condição é chamada de “mistura pobre”.

Já o LSI (Limite Superior de Inflamabilidade) é a máxima concentração de gás que misturada ao ar atmosférico é capaz de provocar a combustão do produto, a partir de uma fonte de ignição. Concentrações de gás acima do LSI não são combustíveis pois, nesta condição, tem-se excesso de produto e pequena quantidade de Oxigênio para que a combustão ocorra, é a chamada “mistura rica”.

Pode-se então concluir que o combustível só queima quando sua percentagem em volume estiver entre os limites (inferior e superior) de inflamabilidade, que é a “mistura ideal” para a combustão.

6.1.2. Redução da concentração de comburente ou oxidante

Outra forma de se prevenir a explosão por deflagração é reduzir a concentração do comburente ou oxidante, na mistura potencialmente inflamável.

O teor mínimo de Oxigênio necessário para iniciar e manter o fogo na presença de combustível é conhecido por *LOC - Limiting Oxygen Concentration*.

Abaixo da concentração mínima *LOC* a reação não gera energia suficiente para aquecer a mistura toda de gases (inclusive inertes) de modo a se auto propagar.

LOC é a concentração de oxidante abaixo da qual uma deflagração não pode ocorrer em uma mistura combustível-ar especificada.

Os *LOCs* para gases e vapores inflamáveis comuns, usando um diluente como Nitrogênio ou dióxido de Carbono, estão listados nas Tabelas C.1 da Norma NFPA 69, que devem ser utilizadas como base para a determinação das concentrações oxidantes limitantes de gases inflamáveis ou suspensões de poeiras combustíveis.

A Tabela C.1 (a), Tabela C.1 (b) e Tabela C.1 (c) fornecem valores para limitar a concentração de oxidante (*LOC - Limiting Oxygen Concentration*). para gases inflamáveis, usando Nitrogênio, dióxido de Carbono e poeira inerte como diluentes.

A Tabela C.1 (a) fornece os valores *LOC* para gases inflamáveis.

A Tabela C.1 (b) e a Tabela C.1 (c) fornecem dados para suspensões de poeira combustível.

Uma margem de segurança deve ser mantida entre o *LOC* e a concentração de oxidante normal de trabalho no sistema, normalmente, de 2 a 4 pontos percentuais abaixo do *LOC*.

6.1.3. Purga e inertização *blanketing* de equipamento

São técnicas de se evitar a existência de uma mistura inflamável dentro de um equipamento, com base no *LOC - Limiting Oxygen Concentration*.

a. Purga *purging* é a técnica pela qual uma mistura combustível-ar em um equipamento se torna não inflamável pela injeção, intermitente ou ocasional (por ex. durante o período em que o equipamento está fora de operação), de um gás inerte, a fim de manter o grau necessário de deficiência de oxidante.

b. Gás de purga é um gás inerte que é contínua ou intermitentemente adicionado a um sistema para tornar a atmosfera não inflamável.

c. Inertização *blanketing* é a técnica de manter uma atmosfera que seja inerte no espaço de vapor de um contêiner ou recipiente, com a injeção contínua de um gás inerte, a fim de manter o grau necessário de deficiência de oxidante, e condições seguras durante a operação normal.

A purga é uma técnica de grande utilidade na prevenção da deflagração interna em vasos e equipamentos, ao reduzir a concentração de oxidante no conteúdo interno do equipamento. É o ato de remover ou diluir o conteúdo de um tubo, vaso, coluna, tanque ou outro equipamento, substituindo por outro fluido, que não seja combustível, ou seja por um gás inerte.

A purga de equipamentos, normalmente, com gases inertes é utilizada para prevenir incêndios e explosões nos espaços de vapor de equipamentos.

A seleção correta da taxa de fluxo do gás inerte e a medição da concentração máxima de Oxigênio dentro do equipamento, a ser tolerada após a purga, são essenciais para garantir a segurança.

A purga e a inertização são duas práticas comuns, mas distintas, para controlar a concentração de Oxigênio em vasos e equipamentos de processo, reduzindo assim os riscos de incêndio e explosão.

A purga geralmente se refere à injeção, durante um curto prazo de um gás inerte (por exemplo, Nitrogênio ou dióxido de Carbono), em tanque de armazenamento, vaso de processo ou outro equipamento, que contém vapores ou gases inflamáveis, para tornar o espaço não inflamável, por um período de tempo específico (por ex. preparação para partida, durante uma interrupção de manutenção).

Em contrapartida, a inertização é a injeção e conservação por longo prazo de uma atmosfera inerte no espaço de vapor de um tanque de armazenamento, vaso de processo ou outro equipamento, que contém vapores ou gases inflamáveis, durante a operação, para impedir a formação de uma mistura inflamável ou proteger o conteúdo de possível oxidação.

O objetivo desses métodos é reduzir a concentração de Oxigênio em um equipamento abaixo da concentração limite (*LOC-Limiting Oxygen Concentration*), em que a deflagração não pode ocorrer em uma mistura ar-combustível

A purga é uma técnica de grande utilidade na prevenção da deflagração interna em vasos e equipamentos, em que explosões internas são possíveis, quando há contaminação com entrada de ar, particularmente durante as atividades de partida (start up) ou parada (shut down).

Em termos simples, a purga pode ser definida como o ato de remover ou diluir o conteúdo de um tubo, vaso, coluna, tanque ou outro equipamento e o substituir por outro gás, que não seja combustível.

A purga para deslocar o ar ou misturas com gás combustível deve ocorrer imediatamente após um teste de pressão hidrostático ou pneumático satisfatório do vaso de pressão e mantido com o fluido da purga até a entrada em operação.

Os gases efluentes do equipamento, vaso ou tanque, sendo purgados, devem ser removidos e destinados para um local seguro.

O gás de purga ou para inertização deve ser introduzido e mantido para que a mistura eficaz seja assegurada e a redução desejada na concentração de oxidante seja mantida em todo o sistema que está sendo protegido.

É importante a existência de múltiplas entradas e saídas para promover a distribuição do diluente e remoção do ar.

Nota:

Após a parada da instalação industrial ou unidade de processo, na liberação dos equipamentos e tubulações, para os serviços de manutenção e/ou reparos, é importante executar a degaseificação, isto é, a lavagem com vapor d'água ou "steam out" para remover vapores e gases combustíveis ou tóxicos, residuais, dos equipamentos e sistemas de tubulações.

De forma similar, antes da partida da instalação industrial ou unidade de processo, a lavagem com vapor é essencial para remover e substituir o ar no interior dos equipamentos e tubulações, que operam com fluidos combustíveis.

O tempo da lavagem é determinado, em cada situação pelo teste com explosímetro, à saída do vapor, do equipamento ou da tubulação.

Durante o "steam out", todos os bocais de "vents" e drenos dos equipamentos e sistemas de tubulação devem estar totalmente abertos.

Não fechar esses bocais, pois o vapor d'água residual pode condensar e o equipamento falhar pelo vácuo criado.

Referência: <http://www.petroblog.com.br/wp-content/uploads/Lavagem-com-vapor-Steam-out-tubula%C3%A7%C3%A3o-e-equipamento.pdf>

Table 1. LOCs for selected gases and vapors.		
Gas or Vapor	LOC for N₂/Air O₂ vol. %	LOC for CO₂/Air O₂ vol. %
Cyclopropane	11.5	14
Natural gas (Pittsburgh)	12	14.5
n-butyl chloride	14	—
Acetone	11.5	14
Carbon disulfide	5	7.5
Ethanol	10.5	13
Hydrogen	5	5.2
Methyl ether	10.5	13
Methyl ethyl ketone	11	13.5

Exemplo de tabela de LOC - Limiting Oxygen Concentration

Considerações práticas

1. A purga de pressão é um método usado para garantir a formação e a manutenção de uma atmosfera não combustível em um equipamento a ser protegido.

Neste método, os equipamentos podem ser purgados, introduzindo gás de purga sob pressão e, após o gás se ter difundido, ventilando o equipamento para a atmosfera.

É necessário amostrar o gás que está sendo expelido para conferir o teor de oxidante ainda presente.

Mais de um ciclo de pressão pode ser necessário para reduzir o teor de oxidante à porcentagem desejada.

2. Quando dois ou mais vasos ou tanques são unidos por um coletor e devem ser purgados como um conjunto só, o conteúdo de vapor que sai de cada recipiente ou tanque deve ser verificado para determinar se a qualidade da purga desejada foi alcançada.

3. Quando um equipamento cheio de material combustível deve ser esvaziado e, em seguida, purgado, o gás de purga deve ser aplicado ao espaço de vapor a uma pressão, consistente com as limitações de projeto do equipamento, realizando assim tanto o esvaziamento do recipiente quanto a purga do espaço de vapor ao mesmo tempo.

4. A operação de um sistema com uma concentração de Oxigênio baixa o suficiente para evitar uma deflagração, não significa necessariamente que incêndios incipientes sejam absolutamente evitados.

As propriedades físicas e químicas dos materiais inflamáveis ou combustíveis envolvidos determinam o tipo e a pureza exigida do gás de purga necessário.

5. Atenção. Se uma pessoa entrar em contato com uma atmosfera de gás inerte, por ex. Nitrogênio, ela pode perder a consciência sem nenhum sintoma de aviso em apenas 20 segundos. A morte pode ocorrer em 3–4 minutos. A pessoa cai como se tivesse levado uma pancada na cabeça.

Sempre que o Nitrogênio (ou outro gás asfixiante) for usado para inertização ou purga, o treinamento de funcionários, a adesão estrita a um procedimento de entrada em espaço confinado e o sistema de autorizações e a rotulagem de recipientes são essenciais.

6.2. Métodos ou técnicas de controle dos efeitos da deflagração

Os seguintes métodos devem ser considerados para a limitação de danos, na ocorrência da deflagração:

- a. Aberturas ou janelas de alívio da explosão por deflagração;
- b. Abafador de chamas ou corta chamas;
- c. Supressão automática de deflagração;
- d. Isolamento automático de deflagração;
- e. Contenção de pressão gerada na deflagração;
- f. Dispositivo de alívio da pressão.

6.2.1. Aberturas ou painéis de alívio de deflagração

A Norma NFPA 68 *Explosion Protection by Deflagration Venting* visa fornecer ao usuário critérios para projeto, localização, instalação, manutenção e uso de dispositivos, chamados de abertura ou janela de deflagração *deflagration vent*, e de componentes associados, de abertura total, sem fragmentação e não reutilizável.

A função é liberar gases de combustão e pressões resultantes de uma deflagração dentro de equipamento, tubulação ou duto, por meio de uma abertura projetada para romper a uma pressão definida, de modo que danos estruturais e mecânicos sejam minimizados.

Também são conhecidos como painel ou vent de explosão *explosion vent* ou ventilação de alívio *vent opening*.

A abertura possibilita um caminho para que o fluxo dos gases da deflagração escape com segurança, reduzindo a sobrepressão gerada e evitando a ruptura do equipamento.

Esses dispositivos de proteção contra explosão possibilitam aliviar a pressão gerada pela deflagração dentro de um equipamento, mantendo a integridade física do mesmo, em caso de tal ocorrência.

Esse dispositivo, quando instalado em tubos ou dutos, não impede a propagação da frente da chama para outro equipamento interligado, ele apenas provê o alívio das pressões geradas durante uma deflagração.

Aplica-se para todas as fases de fabricação, processamento, mistura, transporte pneumático, estocagem, embalagem e manuseio de gases ou vapores inflamáveis e de partículas sólidas combustíveis ou misturas híbridas, independentemente da concentração e do tamanho de partícula, quando as substâncias apresentam perigo de incêndio ou explosão.

Esta técnica de painel de explosão para o alívio de deflagrações é mais comumente utilizada em sistemas de processamento de misturas de pó, poeira e fluidos pulverizados, em pressões relativamente baixas, isto é, abaixo de 1 barg, que empregam dutos de transporte pneumático, e geralmente instalados em silos, filtros, moinhos, trituradores, separadores, extratores, coletores, transportadores e etc..

Existem diferentes tipos e tamanhos de painéis de explosão, compreendendo os formatos retangulares ou circulares e, podendo ser fabricados em uma única chapa metálica ou em composição com outros elementos.

Isso permite que sejam utilizados em uma vasta gama de aplicações.

O fechamento da abertura é, normalmente, um tampo que é colocado sobre a abertura.

A localização do *vent* de deflagração é na parte superior ou lateral do coletor de poeira, do recipiente de processo ou equipamento, e envolve o uso de um painel de aço inoxidável, conhecido como membrana de ventilação ou painel de ruptura ou porta de explosão.

Fisicamente pode ser:

- Painel de dobradiça em que o fechamento da abertura é um tampo articulado em um dos lados, como uma janela.
- Painel deslizante em que o fechamento da abertura é um tampo que se desprende da abertura, durante uma atuação de alívio, e se desloca para frente, permitindo o fluxo de gases.

Indicadores integrados aos painéis de explosão permitem o monitoramento remoto do dispositivo, informando sobre a abertura do mesmo em caso de deflagrações.

Os painéis de explosão são aplicados com base na determinação da área de alívio necessária, para garantir a integridade do equipamento, sendo que seu dimensionamento leva em consideração as variáveis de processo, as características do material combustível, o volume do invólucro, dentre outros.

Uma abertura de deflagração é um dispositivo de segurança, não reutilizável, projetado para romper a uma pressão definida, aliviando a pressão interna, e fornecendo um caminho para que os gases de deflagração escapem com segurança.

É uma forma testada de alívio de explosão.

A abertura de deflagração *deflagration vent*, com tampo projetado para se romper com segurança, é uma medida de proteção contra explosão interna em um equipamento ou duto, ao permitir, por meio da abertura, o fluxo de emergência do conteúdo do equipamento ou duto e, conseqüentemente, a redução da pressão decorrente da deflagração. A pressão de deflagração escapa pela abertura e isso evita que a explosão ganhe força e tenha conseqüências violentas. Desta forma, a ruptura do equipamento por sobrepressão é evitada.

Não há restrições para sua aplicação em equipamentos posicionados em locais externos, desde que a área próxima esteja livre de interferências e não haja circulação de pessoas na direção dos dispositivos.

Por outro lado, também é possível instalar painéis de explosão em equipamentos que ficam posicionados no interior das edificações, para isso, deve ser prevista a utilização de dutos de alívio de explosão, para direcionar as chamas e os gases da combustão para fora da edificação, e abafadores de chamas, os quais permitirão uma maior mobilidade para ambientes internos, caso não haja outras alternativas.

O painel ou *vent* de deflagração é, enfim, uma abertura em um invólucro através da qual os gases, produtos da combustão interna, se expandem e fluem, aliviando a pressão.

Se nenhum alívio é previsto, as pressões máximas desenvolvidas durante a deflagração de uma mistura ótima de combustível-ar são normalmente entre 8 e 10 vezes a pressão absoluta inicial.

Em muitos casos, é impraticável e economicamente proibitivo construir um equipamento que possa suportar ou conter tais pressões, em outras vezes, entretanto, é possível projetar o equipamento para a contenção de uma deflagração.

Embora mais direcionadas para indústrias de pó combustível, essa técnica de alívio de deflagração também pode ser utilizada em outras instalações.

Um exemplo de aplicação em unidades industriais de óleo&gás, são as portas de explosão, de fornos de processo e em caldeiras de vapor.

A porta de alívio de pressão ou porta de explosão em fornos de processo é prevista para o topo da zona de radiação do forno. O objetivo é, no caso de explosão interna, servir para evitar grandes danos, enquanto em fornos sem porta a chaparia da carcaça do forno estufaria. Em caldeiras de geração de vapor as portas de explosão são localizadas geralmente na tampa dianteira ou frontal da caldeira, no lado dos gases, para proteger a câmara de combustão em caso de explosão, permitindo o alívio da pressão durante a partida da caldeira, caso haja combustível não queimado acumulado na fornalha.

O uso da técnica de abertura ou painel de alívio de deflagração não é recomendada em sistemas com equipamentos interligados por tubulações ou dutos, devido ao risco de empilhamento de pressão, que eleva muito a pressão máxima resultante da deflagração, e o alívio pelo painel de deflagração não garante a integridade de todos os equipamentos conectados.

Nestes casos, a proteção contra explosão por deflagração deve ser pelos sistemas de prevenção ou de contenção da explosão.

Também não se aplica a: detonações, autoignição de gases ou deflagrações não confinadas, como explosões externas de nuvens de vapor ou de gases.

6.2.2. Abafador de chamas ou corta chamas

O abafador de chamas ou corta chamas é um dispositivo utilizado conectado a painel ou janela de explosão retangular, quadrado e circular, em indústrias de processamento de pó/poeira combustível, e pode ser usado em ambientes internos e externos.

O equipamento é caracterizado por malhas em aço inoxidável trançadas e intercaladas, que absorvem altas temperaturas e proporcionam o alívio por ventilação em ambiente interno, sem liberar as chamas, impedindo que as chamas se dispersem para o exterior do ambiente.

Nota:

O abafador de chamas ou corta-chamas é um dispositivo que impede a transmissão de uma chama de mistura inflamável de gás/ar, extinguindo a chama na superfície de um conjunto de pequenas passagens de uma malha metálica, pelas quais a chama não consegue passar.

A abertura da malha varia conforme o “Grupo de Explosividade-MESG - Máximo Espaçamento Experimental Seguro”, que é a classificação ou ranking de misturas combustíveis-ar inflamáveis.

O MESG é determinado experimentalmente em ensaio de laboratório e corresponde ao máximo espaçamento que a mistura em chamas não consegue ultrapassar.

O abafador de chamas é uma solução eficiente para a extinção de chamas, redução de pressão e calor em ambientes próximos, quando usados dentro de suas limitações.

Fabricação em corpo de aço Carbono, com ou sem revestimento interno, malhas de aço inoxidável, com sensor de ruptura da tampa do painel.



Ilustração de abafador de chamas montado em um painel de alívio de explosão

Fornecedor de Abafadores de Chama

<https://www.atexbrasil.com.br/abafadores-de-chama>

A função do abafador de chamas é permitir o alívio da explosão e impedir a propagação de chamas e partículas fumegantes.

Durante o estágio inicial de uma explosão, o painel de alívio se rompe e a chama, o pó queimado e o não queimado penetram no elemento do corta-chamas.

A propagação da chama para fora do equipamento é impedida pela dissipação de energia no elemento malha-filtrante, reduzindo abaixo da temperatura de ignição o combustível queimado.

O pó também é retido e somente os gases da explosão são expelidos pelo dispositivo para a atmosfera externa.

6.2.3. Supressão automática de deflagração

Supressão de deflagração é a técnica de detectar e interromper a combustão em um espaço confinado, enquanto a combustão ainda está em seu estágio inicial, evitando assim o desenvolvimento de pressões, que poderiam resultar em uma explosão.

Consiste no emprego do método de extinção de faíscas, em que a energia radiante de uma faísca ou brasa é detectada e a centelha ou brasa é extinguida.

O sistema de extinção de faíscas deve operar por meio de detectores, que identificam a radiação de uma partícula quente ou incandescente, que pode se tornar a fonte de ignição para um incêndio ou explosão, e acionam um sistema extintor especial que extingue a partícula.

A detecção pode ser feita pela radiação da faísca e/ou pelo aumento local da pressão. .

O sistema é utilizado para prevenção de riscos de incêndio e explosão, particularmente, em indústrias que trabalham com pó ou poeira combustível, em coletores, dutos pneumáticos, equipamentos e transportadores, evitando e reduzindo os riscos de incêndio e explosão, através de:

- Detecção de faíscas, chamas e partículas quentes com detectores de infravermelho;
- Extinção imediata de faíscas, chamas e partículas quentes, com a injeção do agente supressor;
- Ativação de sistemas de alarme;
- Ativação de sistema automatizado de parada do processo, para desativar a alimentação de material combustível;
- Fornecer sinal para ativar outros dispositivos ou válvulas de controle de processo;
- Operação com modo automático contínuo, com supervisão de todos os circuitos críticos do sistema, para alarme imediato em caso de risco de falha.

Fonte: **BS&B SparkEx® Sistema de detecção de faísca e sistema de extinção**
https://www.bsipd.com/BR/spark_detection_extinguish.html

É um sistema que promove a segurança de equipamentos, em processos que apresentam uma atmosfera potencialmente perigosa em seu interior, devido à presença de gases ou pós/poeiras combustíveis em suspensão, ou seja, que possuem riscos de explosão por deflagração.

A supressão depende de equipamentos de alta confiabilidade.

Um sistema típico de supressão compreende detectores de explosão, injetores e reservatórios ou garrafas de agente supressor e uma unidade de controle central.

A supressão de deflagração pressupõe o uso de detectores de chama e/ou de aumento de pressão, de agentes supressores e é bem-sucedida apenas onde o supressor é injetado e distribuído durante os estágios iniciais do desenvolvimento da chama.

Nota:

Supressor químico ou agente supressor de explosão é substância química que, quando dispersada dentro de um recipiente, é capaz de interromper o desenvolvimento de uma explosão por deflagração naquele recipiente

O supressor deve ser compatível com o material combustível no equipamento a ser protegido.

O supressor deve ser eficaz nas altas temperaturas esperados no equipamento.

A deflagração deve ser detectada através do aumento da pressão ou da energia radiante do processo de combustão.

Os detectores devem ser protegidos do acúmulo de materiais estranhos e do obscurecimento dos detectores de energia radiante, que impedem o funcionamento.

O supressor deve conter o agente extintor adequado e um gás propulsor, geralmente o Nitrogênio.

A técnica de supressão da deflagração pode ser empregada para a maioria dos gases inflamáveis, névoas combustíveis ou pós combustíveis que estão sujeitos à deflagração na presença de um oxidante em fase gasosa.

Os equipamentos e ambientes que podem ser protegidos por um sistema de supressão de deflagração incluem, mas não se limitam aos seguintes:

- Equipamentos de processamento, como vasos de pressão, reatores de processo, misturadores, moinhos pulverizadores, secadores, fornos, filtros, telas e coletores de pó e poeira;
- Equipamentos de armazenamento, como silos, tanques atmosféricos ou de baixa pressão, tanques pressurizados;

- Equipamentos de manuseio de materiais, como transportadores pneumáticos e de parafuso e elevadores de caçamba;
- Equipamentos de planta piloto e de laboratório.

O funcionamento de um sistema de supressão de explosão pode ser exemplificado conforme descrição a seguir.

Na ocorrência de um evento de deflagração, no interior de um equipamento, uma bola de fogo se expande do núcleo da ignição e as ondas de pressão (criadas pelo súbito aumento na temperatura), que surgem no início da reação em cadeia, se deslocam à frente da frente de chama, e são captadas por detectores de pressão, assim como possíveis fontes de luminosidade originadas pela irradiação das chamas, as quais são captadas por detectores ópticos infravermelhos, caracterizando a detecção da explosão em seus estágios incipientes.

Após a unidade de controle de supressão de explosão, reconhecer o evento identificado pelos detectores, é enviado um sinal elétrico, responsável por abrir as válvulas das garrafas de agente supressor e liberar o supressor no interior do equipamento, através dos injetores ou bicos aspersores.

As garrafas de agente supressor são mantidas pressurizadas com Nitrogênio e permanecem isoladas dos injetores por um selo, que se rompe pelo fluido acionado pela unidade de controle, ao iniciar-se a explosão no equipamento a ser protegido.

O agente supressor é injetado na forma pulverizada, em grande quantidade e alta velocidade, e dispersado no interior do equipamento, suprimindo instantaneamente a explosão, visto que a explosão deve ser suprimida em até 60 milissegundos.

Isso resfria a bola de fogo rapidamente, mitigando a combustão e reduzindo a pressão de explosão.

Deve garantir-se que os bicos aspersores tenham um *design* e quantidade que permitam a distribuição uniforme em todo o equipamento.

O sistema de supressão de deflagração deve ter permissão para acionar outros dispositivos e sistemas, como:

- a. Fechamento de válvulas de isolamento mecânico, de alta velocidade, posicionados nas tubulações e dutos de interligação da unidade, com o intuito de evitar a possível propagação das chamas;
- b. Desligamento rápido do sistema de transporte pneumático;
- c. Interrupção *shutdown* de produção da unidade

O uso dessa tecnologia é uma alternativa de proteção de forma rápida contra a explosão por deflagração, de garantia da integridade física das pessoas e a preservação do meio ambiente.

6.2.4. Isolamento automático de deflagração

O isolamento da deflagração é uma técnica empregada como complemento e em consonância com as outras técnicas, para evitar ou mitigar os danos de uma explosão por deflagração.

O objetivo é isolar o equipamento ou sistema que está em vias de uma explosão por deflagração, empregando procedimentos que interrompem a propagação de uma frente de deflagração da chama, além de um ponto predeterminado.

Os dispositivos de isolamento de deflagração são as Válvulas de Isolamento Automáticas de ação rápida *Automatic Fast-acting Valves* ou Válvulas de Isolamento de Explosão *Explosion Isolation Valves*, que estabelecem uma barreira física resistente, impedindo a propagação da explosão para outras áreas da planta de processo, evitando que uma explosão atinja outros equipamentos da produção.

Segundo a Norma NFPA 68 é importante instalar barreiras de isolamento de explosão, como válvulas de isolamento de alta velocidade, para mitigar a propagação de explosão entre equipamentos de processo interligados.

As aplicações típicas para a válvula incluem isolamento de explosão de deflagração em vasos de pressão, coletores de poeira, moinhos, ventiladores, secadores e outros equipamentos de processamento interconectados.

6.2.4.1. Tipos de Válvulas de isolamento de explosão *Explosion Isolation Valves*

A válvula deve ser capaz de suportar as pressões, esperadas durante um evento de deflagração, para assegurar o rápido isolamento físico dos equipamentos pressurizados interligados.

A correta seleção de válvula de isolamento depende da pressão máxima de deflagração que deve resistir, devendo ser instalada em dutos e tubulações, que interconectam a unidade de processamento.

Os seguintes tipos de válvulas de isolamento de explosão *Explosion Isolation Valves* são projetados e fabricados.

a. Válvula de Isolamento tipo de Alta Velocidade *High Speed Isolation Valve*

A válvula de isolamento de alta velocidade é uma solução para aplicações nas indústrias que trabalham com gases, vapores e pós combustíveis.

O fechamento é atingido em milissegundos, pela descarga rápida de Nitrogênio em um atuador hidráulico de pistão, e assegura uma barreira mecânica dentro da tubulação interligada ao vaso de pressão. O Nitrogênio pressurizado é fornecido por um botijões de alta taxa de descarga.

A detecção da deflagração é por detectores de pressão, monitorados por uma unidade de controle, que fornece supervisão, alarme, ação do sistema e processo de desligamento.

A válvula de isolamento de alta velocidade possui um corpo de aço inoxidável que incorpora um obturador, tipo comporta ou gaveta, também de aço inoxidável.

A válvula deve ser capaz de suportar as pressões, esperadas durante um evento de deflagração, sem deformação do obturador, tipo comporta ou gaveta, para assegurar o rápido isolamento físico dos equipamentos pressurizados interligados.

A válvula de isolamento mecânico deve ser projetada para suportar a pressão máxima de explosão, P_{max} , correspondente ao material do processo.

No mercado de fabricantes fornecedores são encontradas Válvulas de Isolamento de Explosão, com pressão de projeto que pode variar de 50 barg, nas versões de pequeno diâmetro, até 30 bar nas versões maiores, durante as ocorrências de explosão de misturas combustíveis-ar de gás e poeira.

Além disso, toda tubulação, duto e equipamentos, à montante da válvula de isolamento, também devem ser projetados para resistir à pressão de explosão P_{max} da deflagração.



Válvula de Isolamento de Alta Velocidade *High Speed Isolation Valve*

<https://www.ieptechnologies.com.br/assets/images/file/MC-534W-Isolation-Valve-Rev-AG.pdf>

A válvula de ação rápida para o isolamento é uma válvula de alta velocidade, operada com atuadores em milissegundos, que fecha a passagem e a propagação, em um tubo ou duto, da chama e da pressão geradas de uma deflagração, em resposta à detecção da deflagração, garantindo um selo mecânico positivo e evitando os riscos de propagação de explosão para outros equipamentos ou transmissão de chama e pressão para o ambiente.

O sistema de detecção deve consistir em um ou mais detectores, de pressão e/ou de energia radiante, um painel de controle para fornecer o sinal de inicialização ao conjunto de válvulas mecânicas de ação rápida.

b. Válvula de isolamento tipo retenção *flap IsoFlap valve*

A válvula de isolamento de explosão, tipo retenção, é um dispositivo de ação automática que fornece uma barreira mecânica para mitigar a propagação da chama e queima de materiais em equipamentos interligados, que estão à montante da válvula.

O corpo da válvula é de aço Carbono e o *flap* ou portinhola de aço liga.

Durante sua operação, o *flap* se mantém aberto pelo fluxo de produto do processo; no caso de uma explosão, a frente de pressão fecha e trava o *flap*, reduzindo a propagação da chama e a pressão ao equipamento à montante.

A pressão máxima de deflagração admissível varia de 1 barg a 0,35 barg a depender do porte do diâmetro da válvula, quanto maior menor a resistência à pressão.



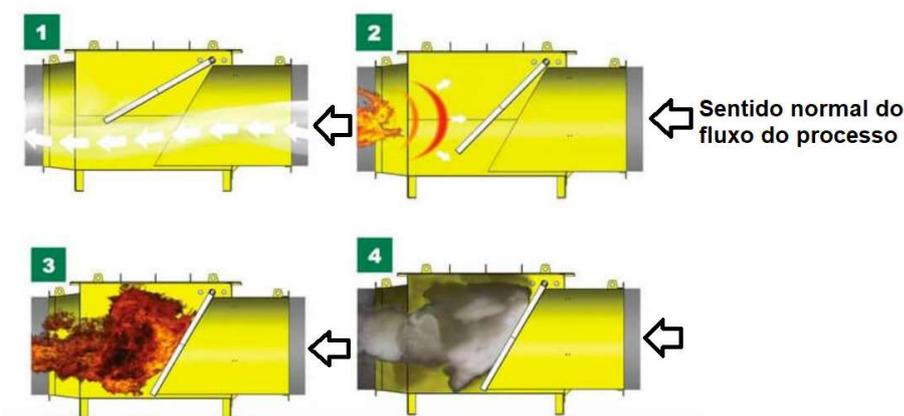
Válvula de isolamento tipo retenção *flap* IsoFlap valve

<https://www.ieptechnologies.com/assets/images/file/Used/IsoFlap-Product-Information-Sheet-PR.pdf>

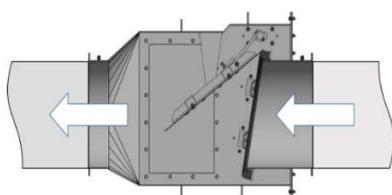
Atenção.

Esta válvula só pode interromper a propagação de uma deflagração, quando ela se propaga no sentido contrário ao fluxo normal do processo, por ter um projeto similar ao de uma válvula de retenção de portinhola *flapper valve*.

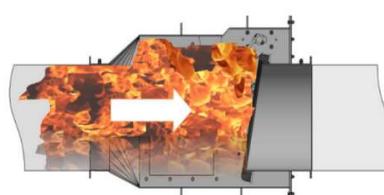
Ela não impede a propagação de explosões no sentido normal do fluxo do processo.



Funcionamento de válvula de isolamento de explosão tipo *flap* valve



Sentido normal do fluxo de operação



Sentido do isolamento da explosão

A válvula de isolamento de explosão tipo retenção é empregada em instalações industriais de processamento de pós/poeiras e sempre como complemento da proteção de equipamentos, que já são protegidos por outra técnica, como painel de ventilação ou supressão de explosão ou contenção de explosão.

Só é utilizada para explosões geradas por deflagração de pós/poeiras, não sendo aplicável para explosões de materiais ou misturas dos materiais listados a seguir:

- gases, vapores e misturas híbridas;
- substâncias quimicamente instáveis;
- substâncias explosivas;
- substâncias pirotécnicas.

Referências:

a. Stinger Explosion Isolation Valves - Flow-Activated Flap Valve

<https://camfilapc.com/products/accessories/stinger/>

b. IEP Technologies GmbH - Protecting Your Process Against Explosions
https://www.berlintech.co.il/wp-content/uploads/2019/08/IEP-General-Brochure-417EN-193_Electronic.pdf

c. Explosion Testing for dust
https://www.explosiontesting.co.uk/explosion_ind_10.html

A válvula de isolamento de explosão tipo retenção tem limitações:

- a. São de uso exclusivo para pós e poeiras combustíveis;
- b. Resistência mecânica baixa às pressões desenvolvidas em uma deflagração.

Por isso só devem ser usadas em conjunto com outra técnica para proteção como ventilação ou alívio da deflagração, ou supressão da deflagração ou contenção de pressão da deflagração.

6.2.4.2. Características principais a serem considerados na seleção e operação de válvula de isolamento de deflagração

- a. A válvula de isolamento de explosão, por ser dispositivo de segurança, deve ter certificado de teste por terceira parte, atestando a compatibilidade com a Norma NFPA 69
- b. Ser classificada como “válvula de segurança crítica”, no plano de emergência da planta, e estar sujeita a requisitos de inspeção e manutenção adequados.
- c. Estar protegida contra os perigos externos, como acidente grave e risco de fogo externo, por exemplo.
- d. Sede metálica *metal seated* com classe de vedação *rate A* conforme Norma ISO 5208 *Industrial valves – Pressure testing of metallic valves*.
- e. As válvulas devem possuir certificado de conformidade, quanto às características construtivas e de desempenho, para válvula tipo *Fire Safe Tested*, conforme Norma ISO 10497 ou API Std 607.
- f. Caso o inventário além de inflamável seja tóxico, as válvulas devem atender aos requisitos de limitação de emissões fugitivas da Norma ISO15848.
- g. As válvulas devem ser projetadas para operar de modo ininterrupto, sem necessidade de manutenção, por uma campanha de até 6 anos seguidos, uma vez instaladas.

Adicionalmente, para as válvulas com atuador, atender aos seguintes requisitos.

- a. Execução de testes regulares, especialmente o de movimentação parcial da válvula *partial stroke test*. O Proprietário deve determinar a frequência e a natureza dos testes baseado no projeto e no uso. Na ausência desta avaliação de frequência, recomendam-se um mínimo de três intervalos mensais.
- b. A recomendação é adotar como falha segura o modo “na falha permanecer na posição”, para evitar que essas sejam os iniciadores da cadeia de falhas da planta, em função de uma falha espúria, que leve ao seu fechamento indevido. Deve permanecer nesta posição de falha segura, até a reiniciação (*reset*) manual.
- c. O atuador e acessórios (filtros, “tubings”, cabos, solenóides etc.) devem ter proteção passiva contra fogo, por meio de pintura com tinta ablativa (intumescente), que atenda ao requisito de suportabilidade à incidência de chama, conforme Normas API Std 2218 e UL 1709, preservando as características nominais das instalações.
- d. As válvulas devem ser instaladas de modo a permitir fácil acesso para manutenção e operação manual de reabertura (*reset*).
- e. No caso de instalação próxima à fonte potencial de fogo, deve ser avaliada a possibilidade de inclusão de um anteparo, de modo a proteger o atuador e garantir o acesso seguro.

6.2.4.3. Informações sobre pós e poeiras combustíveis em relação à explosividade

As propriedades medidas em laboratório, para quantificar a gravidade de uma explosão de pós/poeiras combustíveis, são Kst e Pmax.

Kst e Pmax são considerados dois dos parâmetros ou propriedades físicas mais importantes para caracterizar a combustibilidade do material em pó/poeira.

Kst fornece informações sobre a taxa de aumento de pressão durante um evento de explosão de pó/poeira. Unidade [bar.m/s].

Pmax fornece informações sobre a pressão máxima alcançável gerada durante um evento de explosão de pó/poeira. Unidade [bar].

Com isso, pós/poeiras diferentes podem ser comparados uns com os outros, em relação à sua gravidade de explosão, e classificados em 4 grupos, chamados de classes ST, da seguinte forma:

Classe de pó/poeira	Valor Kst [bar.m/s]	Comentário
ST0 Típico de pó de sílica, pó gerado por soldagem e pó gerado termicamente (de processos de corte, por exemplo).	0	Não explode
ST1 Típico de carvão, leite em pó, açúcar, enxofre, pó de madeira, zinco.	1 a 200	Explosão fraca
ST2 Típico de celulose, farinha de madeira, poli metil acrilato (PMA).	201 a 300	Forte explosão
ST3 Típico de pós metálicos como alumínio, magnésio e titânio	>300	Explosão muito forte

Fonte: [Como saber se a poeira é combustível?](https://www.nederman.com/pt-br/knowledge-center/how-do-i-know-if-my-dust-is-combustible)

<https://www.nederman.com/pt-br/knowledge-center/how-do-i-know-if-my-dust-is-combustible>

O ensaio para a determinação dos valores Kst e Pmax é essencial para validar o projeto de proteção do equipamento, seja por ventilação de explosão, supressão de explosão e contenção de explosão.

A seguir, os resultados de testes para pós e poeiras combustíveis mais comuns.

Material	Kst	Pmax	ST class
Grain dust	89bar.m/sec	9.3bar g	ST1
Coal dust	85bar.m/sec	6.4bar g	ST1
Flour	63bar.m/sec	9.7bar g	ST1
Sugar	138bar.m/sec	8.5bar g	ST1
Wood dust	224bar.m/sec	10.3bar g	ST2
Aluminium dust	515bar.m/sec	11.2bar g	ST3
Sewage sludge	102bar.m/sec	8.1bar g	ST1
GRP dust *	216bar.m/sec	7.6bar g	ST2

* GRP-Glass Reinforced Plastic

Tabela de resultados de teste de Kst, Pmax e classe ST correspondente.

6.2.5. Contenção da pressão gerada na deflagração

A contenção de pressão de deflagração confinada é a técnica de especificar a pressão de projeto de um vaso de pressão, seus acessórios e interligações, de modo que sejam capazes de suportar a pressão máxima Pmax resultante de uma deflagração interna

Na deflagração confinada, o valor da pressão máxima Pmax alcançada para a maioria das substâncias combustíveis, equivale a cerca de dez vezes a pressão absoluta interna no momento da ocorrência da ignição, e pode ser calculada conforme os critérios da Norma NFPA 69.

Nota:

A razão de pressão de deflagração máxima "R" é a relação adimensional entre a pressão máxima de deflagração e a pressão inicial absoluta máxima.

A Norma NFPA 69 recomenda os valores de "R" para misturas inflamáveis de gás-ar, vapor-ar e pó-ar.

(1) Para a maioria das misturas gás / ar, o valor de R deve ser 9.

(2) Para misturas de pó / ar, o valor de R deve ser 13.

Um valor para R diferente dos valores especificados é permitido ser usado, se tal valor for comprovado por dados de teste ou cálculos.

A contenção da pressão de deflagração é permitida para pressões iniciais superiores a 2 barg (30 psig) somente quando a taxa máxima de pressão de deflagração (R) é determinada por teste ou cálculos.

Devido ao vácuo, que pode seguir uma deflagração, todos os vasos de pressão em que o projeto é baseado na contenção de pressão de deflagração, também devem ser projetados para suportar uma pressão interna absoluta de pelo menos 68,95 kPa (10 psi) ou devem ser fornecidos com alívio de vácuo

Em uma instalação industrial, é impossível projetar e operar equipamentos sem interligações de tubos ou dutos, para transporte, transferência e ventilação.

Assim, através de tubos e dutos conectados a equipamentos, que contêm materiais inflamáveis ou combustíveis com a presença de um oxidante, a ignição pode resultar na propagação da chama e de aumento da pressão em outro(s) equipamento(s) interconectado(s).

Essa propagação da chama pode aumentar a violência da deflagração, resultando em taxas aceleradas de aumento de pressão no(s) equipamento(s) interconectado(s), que é o fenômeno de pré-pressurização ou empilhamento de pressão, devido à ignição por jato de chama dos gases acumulados e pré-comprimidos nesses equipamentos.

O empilhamento de pressão aumenta a pressão máxima resultante da deflagração, P_{max} , em vasos fechados, tubulações e dutos interligados, e as demandas de contenção da pressão são maiores.

Conforme a Norma NFPA 69, a técnica de contenção da pressão de deflagração pode ser aplicada a sistemas onde dois ou mais vasos estão conectados por tubos ou dutos, se ao menos uma das seguintes condições seja atendida:

- (1) Se as tubulações ou dutos interconectados são fornecidos com Válvulas de Isolamento de Explosão *Explosion Isolation Valves*.
- (2) Se houver painel de ventilação para as tubulações interconectadas.
- (3) Se o isolamento de deflagração ou a ventilação do vaso é possível ser usado.
- (4) Se os vasos interconectados e as tubulações ou dutos são projetados para conter as pressões aumentadas devido aos efeitos da pré-pressurização ou empilhamento.
- (5) Se os vasos interconectados, suas tubulações e acessórios são protegidos contra o efeito do empilhamento de pressão.

A técnica de contenção da pressão de deflagração não é adequada para sistemas com risco de detonação, porque a elevação máxima de pressão é muito maior que os fatores estabelecidos para deflagração.

Em casos extremos, fatores como pressão operacional elevada, temperatura elevada, o efeito acelerador da combustão turbulenta através de tubos ou dutos, acrescido de aumento dos efeitos do empilhamento de pressão, podem resultar em detonações.

Alguns sistemas que podem ser capazes de detonar são, por exemplo, os sistemas contendo Hidrogênio que são propensos à detonação, assim como os sistemas contendo acetileno ou compostos acetilênicos.

Compostos orgânicos saturados como propano, etano e álcoois geralmente não detonam em vasos, mas podem fazê-lo em tubulações ou dutos.

Acessórios como compartimentos internos em equipamentos também podem promover a transição de deflagração para detonação.

6.2.6. Dispositivo de alívio da pressão interna gerada na deflagração

Conforme a Norma API Std 521 *Pressure-relieving and Depressuring Systems*, os equipamentos, como vasos de pressão, devem ser protegidos contra a sobrepressão resultante de explosões internas, causadas pela ignição de misturas de combustível-ar, onde a velocidade da chama é subsônica (ou seja, deflagração, mas não detonação), com discos de ruptura *rupture disks*, e não válvulas de alívio de pressão *pressure relief valves*.

Nota:

Disco de ruptura *rupture disc* é um dispositivo de alívio de pressão que responde em milissegundos, para proteger o equipamento contra o acúmulo de pressão extremamente rápido, causado pela propagação da chama e/ou explosão interna.

Os discos de ruptura *rupture discs* são dispositivos que respondem em milissegundos, em contraste com as válvulas de alívio que reagem muito lentamente, para proteger o vaso contra o acúmulo de pressão extremamente rápido, causado pela propagação da deflagração interna.

As válvulas de segurança ou PSVs-*Pressure Safety Valves* não são aceitáveis para lidar com o alívio de deflagração, por não abrirem suficientemente rápido..

A área de alívio necessária é função de uma série de fatores, incluindo os seguintes:

- a) condições iniciais (pressão, temperatura, composição do fluido),
- b) propriedades de propagação da chama dos vapores ou gases específicos,
- c) volume do vaso de pressão,
- d) pressão na qual o dispositivo de alívio deve ser ativado,
- e) pressão máxima que pode ser tolerada durante um incidente de explosão.

Por conseguinte, se deve proteger os vasos de um sistema de processo, em que existe a possibilidade de explosão por deflagração, contra o aumento excessivo da pressão interna, com dispositivo de alívio de pressão do tipo disco de ruptura.

Em uma instalação com risco de deflagração, com vários equipamentos interligados, como não se sabe, a priori, qual dos vasos do sistema vai apresentar a deflagração, todos os vasos de pressão desse sistema, seus acessórios e tubulações ou dutos que os interligam, devem ser protegidos contra a pressão de deflagração, calculada para cada vaso.

Portanto, cada vaso deve ser protegido com um disco de ruptura, nas seguintes condições:

- a. Para cada vaso se deve calcular a pressão máxima P_{max} atingida no caso de deflagração, conforme o critério da Norma NFPA 69.
- b. Cada vaso deve ser dimensionado ou verificado (se for já existente) para resistir à pressão P_{max} .
- c. Ajustar o disco de ruptura de cada vaso para abrir na pressão máxima P_{max} de deflagração correspondente.
- d. Este procedimento é uma tentativa para se evitar o empilhamento de pressão, pois em cada vaso o respectivo disco de ruptura ao abrir e aliviar, pode impedir o acúmulo e a pré-compressão dos gases.
- e. Por segurança, instalar válvula de isolamento de explosão *Explosion Isolation Valve* em cada tubulação ou duto de interligação, que impeça o deslocamento da chama e dos gases da explosão.

7. Análise da aplicação do sistema de proteção contra explosão por deflagração em equipamento

O objetivo é a seleção da proteção mais efetiva de um equipamento contra explosão por deflagração, com base nas características do processo e no local onde está instalado.

Referência:

Riscos de Explosão – Definição dos Métodos de Proteção

<https://www.digisensor.com.br/riscos-de-explosao-definicao-dos-metodos-de-protecao-parte-iii/>

A 1ª idéia é trabalhar com alguma das técnicas de prevenção do risco da combustão, assegurando a formação e a manutenção de misturas de combustíveis-ar não inflamáveis, no interior do equipamento, como redução da concentração de combustível ou redução da concentração de oxidante ou purga e inertização *blanketing*.

Não sendo possível controlar a atmosfera dentro do equipamento, o roteiro a seguir é uma ferramenta importante para ajudar nessa análise.

1. Verificar se o fluido ou produto processado é combustível.

Caso não seja combustível, não há risco de explosão e nenhuma ação de proteção contra a explosão por deflagração é necessária.

2. Caso o fluido ou produto processado seja combustível, verificar se os equipamentos envolvidos são suficientemente resistentes para suportar ou conter a P_{max} , pressão máxima de explosão por deflagração calculada conforme NFPA 69, e se o ajuste de abertura dos discos de ruptura está correto.

Se suportar a P_{max} , verificar se há de interligações de tubulações ou dutos com outro(s) equipamento(s), se não houver interligação, nenhuma ação de proteção é necessária.

3. Para equipamentos que suportem a P_{max} , mas há interligações com outro(s) equipamento(s), a proteção requer disco de ruptura, em cada equipamento, com o respectivo ajuste de abertura, e instalar a Válvula de Isolamento de Explosão-EIV *Explosion Isolation Valve*, com P_{max} suportável pela válvula, em cada tubulação ou duto interligado.

4. Caso o equipamento não suporte a P_{max} , é necessário verificar se o produto pode ser descarregado na atmosfera.

5. Caso o produto possa ser descarregado na atmosfera, é necessário verificar se os equipamentos envolvidos se encontram em uma área externa (*outdoor*), sem interferências de outros equipamentos e não próximo à circulação de pessoas.

Caso atenda a esses quesitos, a solução pode ser a aplicação de um sistema de ventilação ou alívio de explosão, composto por painéis de alívio de explosão e abafadores de chama.

Havendo interligações com outros(s) equipamento(s), o emprego de sistema de isolamento de explosão com válvulas *Explosion Isolation Valves*, nas tubulações e dutos, deve ser avaliado.

6. Caso os equipamentos envolvidos estejam localizados no interior de uma edificação (*indoor*), é necessário verificar se o alívio da explosão pode ser feito para fora da mesma por meio de dutos de alívio.

Em caso positivo, a solução pode ser a aplicação de um sistema de ventilação de explosão, composto por painéis de alívio, com dutos descarregando para o exterior.

Havendo interligações com outros(s) equipamento(s), o emprego de sistema de isolamento de explosão com válvulas *Explosion Isolation Valves*, nas tubulações e dutos, deve ser avaliado.

7. Não sendo possível utilizar dutos de alívio, verificar se o uso de abafadores de chama com painéis de alívio é aceitável. Caso seja, a solução pode ser a aplicação de um sistema de ventilação de explosão, composto por painéis de alívio e abafadores de chama. Havendo interligações com outros(s) equipamento(s), o emprego de sistema de isolamento de explosão com válvulas *Explosion Isolation Valves*, nas tubulações e dutos, deve ser avaliado.

8. Não havendo a possibilidade de utilizar dutos de alívio ou abafadores de chama, juntamente com painéis de alívio, a solução de proteção dos equipamentos pode ser a aplicação de um sistema de supressão automática de deflagração ou de sistema de contenção da pressão de deflagração com discos de ruptura.

Havendo interligações com outros(s) equipamento(s), instalar Válvula de Isolamento de Explosão-EIV *Explosion Isolation Valve*, com P_{max} suportável pela válvula, em cada tubulação ou duto interligado.

9. A tabela a seguir é uma indicação para a seleção do sistema de proteção contra explosão por deflagração em equipamentos, em função do fluido ou produto combustível.

Técnicas de proteção de equipamentos contra explosão por deflagração	Ignição de gases e vapores combustíveis	Ignição de pós, poeiras e fluidos pulverizados combustíveis
Técnicas de prevenção de deflagração		
Redução da concentração de combustível	Sim	Sim
Redução da concentração de oxidante	Sim	Sim
Purga e inertização <i>blanketing</i> de equipamento	Sim	Sim
Técnicas de controle de efeitos da deflagração		
Abertura de alívio de explosão por deflagração com ou sem abafador de chama	Não, a não ser em equipamentos de pressão quase atmosférica como fornos de processo e caldeiras de vapor	Sim, em pressão quase atmosférica.
Supressão automática de deflagração	Sim	Sim
Isolamento automático de deflagração com Válvula de Isolamento de Explosão	Sim	Sim
Contenção da pressão com disco de ruptura	Sim	Não

ANEXO

Gas Phase Explosion (Self-sustaining flame front)

$v_{\text{flame}} < v_{\text{sound}}$
(typically: 0.5 – 10 m/s)

$v_{\text{flame}} > v_{\text{sound}}$
(typically: 1600 – 2800 m/s)

Deflagration

Detonation

occurrence of shock wave:	no	yes
mechanisms for triggering the reaction in the unburnt mixture	<ul style="list-style-type: none"> transfer of heat from flame front to unburnt mixture diffusion of radicals from flamefront into unburnt mixture 	adiabatic compression by shock wave heats up gas mixture to $T \gg T_{\text{autoignition}}$ (flame front is coupled to shock front)
propagation speed of pressure v_{pressure} :	$v_{\text{pressure}} = v_{\text{sound}}$	$v_{\text{pressure}} = v_{\text{flame}} > v_{\text{sound}}$
pressure venting:	possible	not possible ($v_{\text{flame}} > v_{\text{sound}}$!!)
explosion pressure ratio $r = p_{\text{ex}}/p_{\text{initial}}$:	$r \leq 25$	much larger than for deflagrations
influence of geometry of enclosure on $r = p_{\text{ex}}/p_{\text{initial}}$:	no	yes, substantial
spatial pressure distribution:	same pressure at any location (\Rightarrow no net force on containment)	substantial differences between pressures at different locations (huge net forces on containment)

Referência:

Gas Phase Detonations: Effective Pressures Acting on the Walls of the Enclosures and Probability of Deflagration-to-Detonation Transition in Pipes, Vessels and Packings
https://epsc.be/About+Us/EPSC+Award/_Vortrag%20EPSC-Award%20Ceremony,%2012.06.2018.pdf