



# Documentación

## NTP 427: Paramentos débiles para el venteo de alivio de explosiones (I)

Événets de décharge d'explosions (I)  
Explosion relief venting panels (I)

### Redactor:

Emilio Turmo Sierra  
Ingeniero Industrial

CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO

*En este documento se trata uno de los sistemas de protección para disminuir las consecuencias de las explosiones de polvos combustibles. Se revisan los principios fundamentales de estas explosiones y la forma de actuación de estos elementos de protección. Se definen los parámetros necesarios para el dimensionado de las superficies de venteo, al tiempo que se da una guía de actuación para la aplicación de estos sistemas y una breve exposición de los tipos existentes de paramentos débiles de venteo.*

## Introducción

Muchos productos en forma de polvo como el carbón, harina, almidón, azúcar, goma, plásticos, algunos metales, productos farmacéuticos, etc., pueden dar origen a explosiones si se encuentran dispersados en el aire en forma de nube con una concentración adecuada y en presencia de una fuente de ignición.

Las explosiones de nubes de polvo dan lugar a un aumento rápido de la presión si están confinadas en recipientes u otros equipos de proceso. La mayoría de estas instalaciones no pueden soportar tales presiones, por lo que se deben tomar medidas para prevenir la explosión y para proteger las plantas contra los posibles efectos destructivos.

Las explosiones de polvos combustibles son tanto o más peligrosas que las de gases y vapores inflamables ya que su manipulación y procesado se realiza en la mayoría de los casos en contacto con el aire.

## Siniestralidad e instalaciones peligrosas

Los datos más relevantes entresacados de estadísticas de explosiones de polvos, destacan como equipos con mayor porcentaje de accidentes conocidos a los molinos trituradores, secaderos, filtros, silos y transportadores. Entre las fuentes de ignición más frecuentes están la fricción e impactos mecánicos, llamas y material ardiendo y sobrecalentamiento e ignición espontánea. En la industria del plástico las descargas electrostáticas aparecen en primer lugar.

La experiencia ha mostrado la idoneidad de la protección mediante paramentos débiles de venteo en diversos equipos que manipulan polvos combustibles tales como trituradoras,

molinos, silos, tolvas, transportadores neumáticos, secadores de lecho fluidificado, secadores de rociado, granuladores, filtros, etc. En muchas instalaciones se tiene una combinación de diversos equipos para completar un proceso, por lo cual este sistema de protección se complementa con otros, como supresores de explosión, válvulas de acción rápida, válvulas rotativas, etc.

## Fundamentos de las explosiones de polvo. Factores de riesgo

Para que tenga lugar una explosión de polvo se requiere una serie de condiciones satisfechas simultáneamente:

- Polvo combustible
- Tamaño de partículas que permita la propagación de la llama
- Atmósfera con oxígeno suficiente para mantener la combustión
- Nube de polvo con una concentración dentro del rango de explosividad
- Fuente de ignición con energía suficiente para la ignición

El peligro de explosión depende de un conjunto de factores, tales como:

- **Características explosivas del propio polvo.** Por ejemplo, el polvo de carbón es menos explosivo que la aspirina en polvo y ésta menos que el aluminio en polvo.
- **Composición del polvo.** Por ejemplo, el polvo de carbón da una explosión más violenta cuanto mayor es el contenido de volátiles. Otros productos en polvo dependen de su contenido en grasa u otras materias orgánicas.
- **Tamaño de partícula y su distribución.** A partículas más finas corresponde mayor área superficial y mayor explosividad. Si un polvo está compuesto de diversos tamaños desde fino a grueso, los finos juegan el papel más importante en la ignición y en la propagación de la explosión.
- **Concentración del polvo.** Por debajo de un cierto valor no se puede propagar la explosión. Esta concentración mínima es el límite inferior de explosividad y sus valores varían de 10 a 500 g/m<sup>3</sup>. Existe una concentración óptima que da la mayor violencia explosiva. El límite superior de explosividad es la concentración por encima de la cual no se puede propagar la explosión. Este valor no queda definido claramente y el mantenimiento por encima de él es difícil por la tendencia a la sedimentación a causa de la gravedad.
- **Contenido de humedad.** La violencia de las explosiones disminuye al aumentar ese contenido.
- **Temperatura y presión del ambiente.** En general un aumento de la temperatura ambiente ocasiona una disminución de la presión máxima en una explosión confinada en un recipiente y en cuanto al gradiente de presión la tendencia es menos clara y depende de relaciones cinéticas complejas implicadas en el proceso, de forma que para algunos polvos un aumento de temperatura puede conducir a una

explosión más violenta y para otros la temperatura tiene poco efecto. Respecto a la presión ambiental, si ésta aumenta, la presión máxima de explosión y el gradiente aumentan ambos.

- **Turbulencia de la nube de polvo.** Para mantener la dispersión del polvo se necesita un cierto grado de turbulencia. Al aumentar esta última, la explosión se propaga más rápidamente y la violencia de la explosión alcanza los máximos valores.
- **Presencia de gas inflamable.** La mezcla de una concentración de gas inflamable incluso baja puede incrementar de forma notable la violencia de la explosión de una nube dispersa de polvo. Las mezclas de nube de polvo y gas reciben el nombre de "mezclas híbridas".
- **Volumen del recipiente.** La violencia de una explosión de polvo (indicada por el gradiente de presión) depende del tamaño del recipiente. A mayor volumen corresponde menor gradiente de presión, aunque el potencial de destrucción será mayor debido al incremento de la escala de la explosión.

## Precauciones generales contra las explosiones de polvo

Las precauciones necesarias contra este riesgo son de **prevención** con el objetivo de que nunca ocurran las condiciones que hacen posible la explosión y de **protección** con el objetivo de minimizar los efectos de la misma.

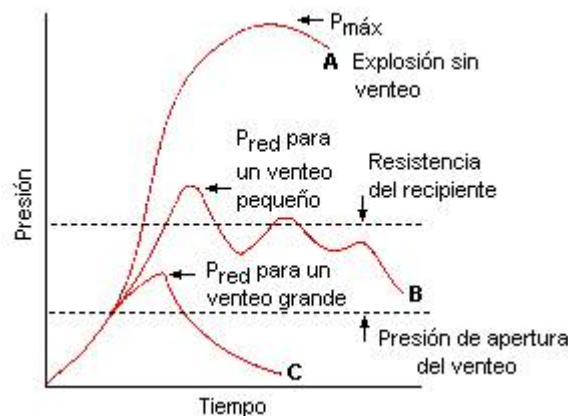
En general las precauciones a adoptar contra las explosiones de polvo deberían seguir las siguientes pautas:

- Siempre que sea posible, seleccionar alternativas de materiales menos pulverulentos y minimizar el rozamiento
- Evitar la acumulación de polvo (el cual puede levantarse para formar una nube de polvo) mediante un cuidadoso diseño de instalaciones, equipos y métodos de trabajo.
- Prever las posibles fuentes de ignición y eliminarlas en tanto sea factible, mediante un adecuado diseño de los equipos, puesta a tierra, mantenimiento y métodos de trabajo.
- Adoptar precauciones adicionales cuando no pueda garantizarse la inexistencia de atmósferas explosivas, como la inertización, protección por contención, supresores o sistemas de alivio de sobrepresiones.
- Aislar las plantas o equipos vulnerables al riesgo de explosión de la forma más adecuada. Su ubicación en áreas exteriores seguras será preferente.

## Sistemas de alivio de presiones por venteo

Es un método de protección basado en la apertura de unos paramentos débiles en las paredes de una planta o equipo al principio del desarrollo de una explosión, de forma que la fuerza principal de la explosión se disipa en el aire y el aumento de presión se limita a un nivel aceptable. Antes de entrar en la aplicación de esta medida de protección se deben haber tomado las medidas preventivas generales indicadas en el apartado anterior.

Para la aplicación del venteo de alivio es primordial conocer el desarrollo de la presión en función del tiempo, al producirse una combustión explosiva.



**Fig. 1: Gráfico de la presión en función del tiempo de una explosión con y sin venteo**

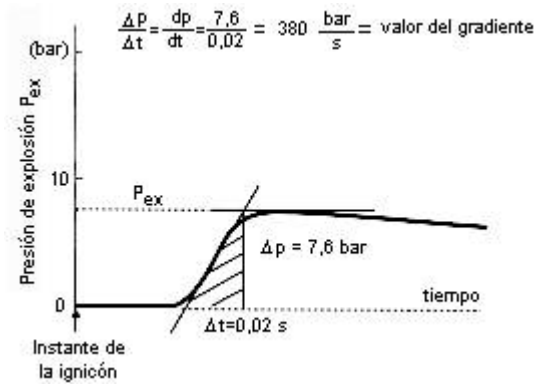
En una explosión que tenga lugar en un recipiente cerrado la presión se desarrolla según la curva A de la fig. 1. En ausencia de venteo, la presión puede alcanzar una **presión máxima** ( $P_{máx}$ ) igual o mayor de 10 bar manométricos. Esta presión suele ser superior a la que pueden soportar la mayoría de instalaciones. Si a una presión relativamente baja se abre un venteo de alivio de pequeña superficie, la presión máxima en el recipiente quedará reducida a un valor inferior llamado **presión reducida de explosión** ( $P_{red}$ ), como se ilustra en la curva B. En esta gráfica está trazada una línea discontinua que indica la resistencia del recipiente. Se puede observar que la presión reducida  $P_{red}$  con un venteo de pequeña superficie aún supera la resistencia del recipiente y podría producir deformaciones y daños de cierta consideración. Para evitarlo se debe diseñar un venteo de área mayor que dé una presión reducida  $P_{red}$  inferior como la representada en la curva C. En el gráfico también se indica la **presión estática** de apertura del venteo ( $P_{stat}$ ).

Cuando se adopte el venteo de alivio se debe conocer la presión máxima de explosión y el gradiente máximo de explosión, los cuales se pueden determinar con ensayos en recipientes normalizados de 20 litros o  $1\text{ m}^3$ .

## Parámetros característicos de las explosiones. Definiciones

**Presión máxima de explosión ( $P_{máx}$ ):** Es la presión máxima registrada en un ensayo normalizado de explosión en recipiente cerrado con la concentración óptima de polvo en aire. Es un valor característico para cada polvo combustible y no varía en función del volumen del recipiente.

**Gradiente máximo de presión ( $dP/dt$ ) $_{máx}$ :** Expresa la variación máxima de aumento de la presión en función del tiempo. Observando la fig. 2 se define como la pendiente de la tangente trazada por el punto de inflexión en la parte creciente de la curva de la presión en función del tiempo. El gradiente máximo de presión se determina también en el mismo ensayo de la  $P_{máx}$ .



**Fig. 2 : Presión de explosión en función del tiempo y determinación del gradiente de presión**

**Concentración óptima:** Es aquella que da el gradiente máximo de presión (la máxima violencia de explosión). Ésta concentración es bastante superior a la cantidad teórica de polvo requerida para reaccionar con el oxígeno disponible.

**Constante  $K_{St}$ :** Es una medida específica de la explosividad de un polvo, en  $\text{bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  y definida por la expresión:

$$K_{St} = (dP/dt)_{\text{máx}} \cdot V^{1/3}$$

$V =$  Volumen del recipiente ( $\text{m}^3$ )

Esta ecuación recibe el nombre de "Ley cúbica" o "Ley de la raíz cúbica". El valor  $K_{St}$  se considera independiente del volumen del recipiente.

**Clase o grupo de explosión St:** Es una clasificación de los polvos explosivos según el valor  $K_{St}$ . Se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 1: Clase de explosión de polvos**

Clase de explosión de polvo	$K_{St}$ ( $\text{bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Explosividad
St 0	0	Nula
St 1	$0 < K_{St} < 200$	Débil a moderada
St 2	$200 < K_{St} < 300$	Fuerte
St 3	$K_{St} > 300$	Muy fuerte

**Presión estática de apertura del venteo o Presión estática de activación  $P_{stat}$ :** Es la presión a que abre o estalla el cierre del venteo en condiciones estáticas. También recibe el nombre de presión estática de estallido.

**Presión dinámica de apertura del venteo o Presión dinámica de activación  $P_{din}$ :** Es la presión a que abre o estalla el cierre del venteo en condiciones dinámicas.

**Presión reducida de explosión  $P_{red}$ :** Es la presión alcanzada en una explosión en un recipiente cerrado protegido con un venteo. La presión reducida de explosión no debe sobrepasarse y no debería exceder del valor  $2/3$  de la presión de estallido o rotura del

recipiente. Es un valor variable que se utiliza en los cálculos de áreas de venteo y depende del tamaño y localización del venteo, de la presión estática de apertura  $P_{stat}$  y de la inercia del cierre del venteo, la presencia de conductos de venteo, el estado de la nube de polvo y de la presencia de obstrucciones u obstáculos dentro del recipiente.

**Inercia del cierre del venteo:** Se emplea para definir la ligereza o facilidad con que abre un venteo al ser activado por un aumento de presión. Se expresa por el peso o masa por unidad de superficie del venteo ( $kg/m^2$ ).

**Recipientes compactos:** A efecto de aplicar los sistemas normalizados de cálculo de las áreas de venteo de alivio se consideran recipientes compactos aquellos cuya razón entre la longitud y el diámetro (L/D) es menor de 5.

## Guía de actuación para la aplicación de sistemas de alivio de presiones

El venteo resulta inadecuado y no se debe usar en las circunstancias siguientes:

- El polvo o sus productos de combustión son excesivamente tóxicos o corrosivos.
- El polvo es de una gran violencia explosiva ( $KSt > 300$ ).
- El polvo está clasificado como explosivo detonante o deflagrante (explosiona en ausencia del oxígeno del aire). En caso de detonaciones no hay suficiente tiempo para que actúe el venteo y se reduzca la presión máxima de explosión.
- El recipiente tiene un volumen superior a  $1000 m^3$  (los métodos de cálculo aún no están confirmados por las pruebas experimentales). A estos volúmenes cualquier sistema de protección es difícil.

En estas circunstancias, se deben adoptar medidas alternativas contando con el asesoramiento de especialistas.

Los **ensayos de explosividad** se deben realizar con muestras representativas de las condiciones de sequedad y finura propias del proceso. Es preferible hacer los cálculos iniciales con una constante  $K_{st}$  superior para disponer de un margen de seguridad. Existen polvos que a temperatura ambiente no son explosivos, pero que sí lo son a temperaturas superiores o con fuentes de ignición más potentes.

Cuando el proceso se realiza a una **temperatura superior** a  $50 ^\circ C$ , el gradiente máximo de presión puede aumentar de forma notable, por lo que se puede considerar la necesidad de un ensayo a temperatura elevada.

En cuanto a la **presión de trabajo**, es poco frecuente conducir polvos a presiones superiores a 2 ó 3 bar manométricos. Por debajo de ésta presión el efecto sobre el gradiente máximo de presión es mínimo.

Los ensayos deberían llevarse a cabo con diversas **concentraciones**. La violencia máxima de una explosión se consigue con una concentración óptima, que es superior a la estequiométrica. A mayores concentraciones, el gradiente de presión (violencia de la explosión) disminuye o permanece aproximadamente constante.

El **efecto de la turbulencia** aumenta la violencia de la explosión y este efecto es más acusado en conducciones en las que se produce una propagación más rápida de la explosión. A mayor turbulencia corresponde por tanto mayor superficie de venteo. Una explosión incipiente en un componente de una planta puede originar niveles de turbulencia muy superiores a los normales. El gradiente de presión  $dP/dt$  puede aumentar hasta 10 veces al cambiar de condiciones estáticas a turbulentas.

La **energía de la fuente de ignición** también tiene una influencia adicional sobre la violencia de la explosión. La fuente de ignición de la mayoría de ensayos suele tener una energía de 10 kJ y es de carga iniciadora química. Las fuentes de ignición posibles tienen energías mucho menores, pero en ciertas circunstancias, por ejemplo una llama a través de una canalización que entra en un recipiente, puede dar lugar a una velocidad de combustión muy rápida y exigir una mayor superficie de venteo.

La violencia de una explosión decrece conforme aumenta el **contenido de humedad** y el criterio a tener en cuenta es el siguiente: de 0 a 5% es la más peligrosa y la variación entre estos dos valores tiene poco efecto; de 5 a 10% se nota un decrecimiento en la sensibilidad a la explosión; si es mayor de 25% el polvo es improbable que se mantenga en suspensión en el aire y en caso de que así sea, se tendrá una disminución adicional de la sensibilidad a la explosión. Se recomienda definir el contenido mínimo de humedad existente en el proceso.

La superficie de los venteos de alivio depende del **volumen del recipiente** a proteger. Se sabe que la violencia de una explosión está relacionada con el volumen del recipiente por la "Ley cúbica" ya citada.

**Forma del equipo.** La mayoría de los ensayos se realizan en aparatos de forma esférica o cilíndrica cuya razón de dimensiones Longitud/Diámetro es igual o similar a 1. Aunque la mayoría de recipientes de proceso tienen una razón  $L/D < 3$  y por tanto razonablemente cercana a  $L/D = 1$ , la configuración de los equipos requiere datos experimentales. Los trabajos realizados muestran que los efectos de presión son incrementados conforme aumenta la razón  $L/D$ .

En algunas aplicaciones, especialmente en recipientes relativamente pequeños se tienen dificultades para instalar venteos y el recipiente se debe proyectar para resistir la presión máxima de explosión  $P_{max}$  sin rotura.

**Localización del venteo.** El frente de llama debe tener un acceso libre y sin obstáculos hacia el venteo.

**Fuerzas de reacción.** Son las fuerzas ejercidas sobre el recipiente por el efecto de la salida de la explosión por un venteo, las cuales pueden ocasionar daños si no están equilibradas tanto en el recipiente como en sus soportes.

**Aislamiento de la explosión.** Se debe evitar la propagación del frente de llama hacia las conducciones interconectadas a los sistemas de protección instalados, sean de contención, venteo o supresión. Esto significa que estos sistemas deben ir complementados mediante dispositivos pasivos de aislamiento de la explosión tales como válvulas rotativas, barreras de contención de explosiones (por ejemplo: transportadores de tornillo sin fin) o activos tales como inertización, activación de barreras químicas o válvulas de acción rápida (tajaderas).

Se considera una buena práctica disponer de enclavamientos que paren automáticamente

todo o parte del proceso en caso de explosión y estallido de un venteo.

**Zona segura de descarga.** Los venteos de alivio se deben localizar de forma que eviten lesiones al personal y minimicen los efectos del incendio y de la onda de explosión. La mejor práctica es situar al aire libre los equipos que precisen venteo, pero en caso que no sea practicable, se debe conducir la llama, el polvo inquemado que se inflama al salir y la sobrepresión mediante unos conductos de venteo hacia una zona segura en el exterior.

El venteo en el interior de locales sólo es posible cuando descarga en una zona sin acceso de personal cuando la planta está en funcionamiento. En este caso, además se debe tener en cuenta la resistencia del edificio, su diseño interior y los peligros de explosiones secundarias por levantamiento de capas de polvo y otras acumulaciones depositadas en el lugar de trabajo. Para evitar esto último, se recomienda buen orden y limpieza.

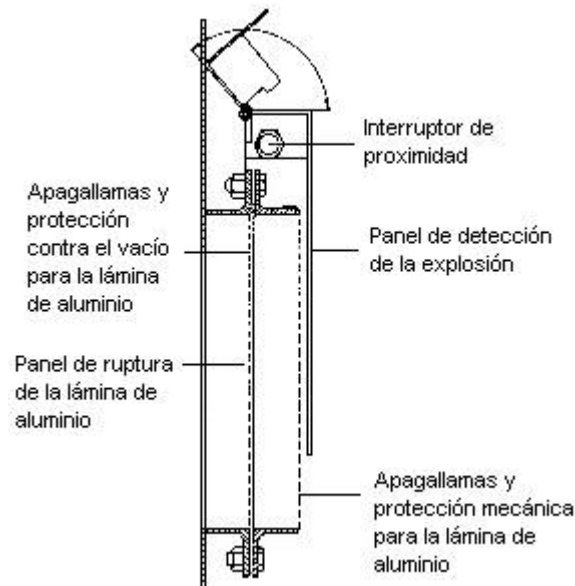
## Tipos de parámetros débiles de venteo

Existe una amplia gama de diseños de estos elementos, empleados para el venteo de equipos de proceso y de locales de trabajo.

Un tipo sencillo de cubierta de venteo es **un panel ligero pero rígido**, por ejemplo una lámina de aluminio mantenida en su posición con un perfil de sujeción de goma, como los utilizados para el montaje de los cristales parabrisas de los automóviles. Es importante, sujetar el panel al recinto mediante un cable o cadena, para evitar que se pueda convertir en un proyectil peligroso. También es importante asegurarse que la formación de óxido no incremente la presión de apertura con el paso del tiempo.

Un segundo tipo lo constituyen los llamados **Paneles de ruptura**. Si son de forma circular son conocidos como **discos de ruptura**. Tales paneles están fabricados en una gama amplia de materiales, tamaños y formas y se pueden suministrar con recubrimientos resistentes a ambientes agresivos químicamente. Un modelo de amplio uso es una lámina de aluminio de 0,04 mm, la cual abre a una presión estática  $P_{stat}$  de 0,1 bar manométrico. Esta lámina puede ir complementada por otras dos metálicas de 0,5 mm de espesor, una interior y otra exterior y formando malla para que cumplan la función de apagallamas. A estas láminas se les puede añadir una lámina de detección de la explosión, que por giro pivotante sobre un eje, pueda accionar un interruptor de las acciones que se quieran tomar (parada de la planta, cierre de válvulas, accionamiento de una supresión automática, etc.). Un esquema de este tipo se puede ver en la figura 3.





**Fig. 3: Panel de ruptura combinado con malla metálica para protección del panel de venteo y enfriamiento de los gases de combustión. El desplazamiento del panel de detección de la explosión acciona un interruptor de proximidad. (cortesía de Th. Pinkwasser, Bühler, Suiza)**

Un tercer tipo lo constituyen las puertas de **explosión con bisagras** y con mecanismos de cierre calibrados a una predeterminada presión estática  $P_{stat}$ . Es el tipo preferible si las explosiones pueden ocurrir con cierta frecuencia.

Un último tipo son los denominado **venteos reversibles** los cuales cierran en cuanto la presión se ha aliviado. Su finalidad es evitar que entre aire en el recinto después de la primera explosión y se puedan producir explosiones secundarias e incendio. Un problema que puede surgir al emplear estos venteos reversibles es la implosión debida a la disminución de presión al enfriarse los gases dentro del recipiente. Para ello se recomienda disponer un pequeño orificio que permita equilibrar la presión interna con la externa.

## Bibliografía

(1) BARTKNECHT

**Explosions Course Prevention Protection**

Berlin, Springer-Verlag, 1981, 251 págs.

(2) ECKHOFF, R. K.

**Dust explosions in the process industries**

Oxford, Butterworth-Heinemann Ltd., 1991, 599 págs.

(3) LUNN, G.

**Dust explosion prevention and protection. Part 1-Venting**

Rugby, Institution of Chemical Engineers, 1992, 214 págs.

(4) SCHOFIELD, C. y ABBOTT, J. A.

**Guide to dust explosion prevention and protection. Part 2-Ignition prevention, containment, inerting, suppression and isolation**

Rugby, Institution of Chemical Engineers, 1988, 79 págs.

(5) LUNN, G.

**Guide to dust explosion prevention and protection. Part 3-Venting of weak explosions and the effect of vent ducts**

Rugby, Institution of Chemical Engineers, 1988, 184 págs.

(6) FIELD, P.

**Dust explosions**

Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, 1982, 243 págs.

(7) N.F.P.A.

**Guide for venting of deflagrations. N.F.P.A. 68. National Fire Codes. 1989. Vol. 9**

Quincy, Massachusetts, 1989

---

Advertencia

© INSHT