

NTP 402: Sistemas supresores de explosión (I): fundamentos teóricos y medios de extinción



Systèmes de suppression d'explosion
Explosion suppression systems

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

Redactores:

Bernardo Méndez Bernal
Ingeniero de Minas

Emilio Turmo Sierra
Ingeniero Industrial

CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO

Los cuantiosos daños materiales en las explosiones de gases inflamables y polvos combustibles ha propiciado que se desarrollen medidas tendentes a prevenirlas o limitar sus efectos. La presente NTP pretende exponer una visión del estado actual de conocimientos sobre este tipo de accidentes basado en fundamentos teóricos y experimentales aplicados a los sistemas supresores de explosión.

Por razones de extensión del tema, se ha dividido éste en dos NTP. Esta primera está dedicada a los fundamentos teóricos y criterios técnicos sobre medios de extinción. La segunda contempla factores de diseño y aplicaciones prácticas.

Introducción

Los sistemas de supresión de explosiones se diseñan para impedir que se desarrollen altas presiones por explosiones de gas o de polvo combustible en el interior de espacios o recintos industriales que no han sido diseñados para resistirlas. La limitación y confinamiento de la llama en los primeros estadios de la explosión, coadyuva a evitar explosiones en aquellos recintos en los que se opera con equipos, dentro de los cuales es inevitable la deposición de polvo (ejemplos: molinos, quebrantadores, mezcladores, cintas transportadoras, silos, tolvas, elevadores de cangilones, transportadores neumáticos, filtros, ciclones y lechos de secado). Esta protección hace extensiva su influencia al personal operativo que trabaja en estas áreas.

La técnica de los sistemas supresores de explosión resulta de indudable interés, si se considera que la presión máxima de explosión puede alcanzar valores de hasta 10 bar g (manométricos), presiones éstas considerables desde el momento en que gran cantidad de silos no resisten presiones superiores a 0,4 bar g.

Su instalación es especialmente útil en aquellos casos en los que el alivio de explosiones por venteo es impracticable, así como en aquellos otros en los que a la explosión en sí se asocian emisiones de gases/vapores/polvos tóxicos o peligrosos en general para el entorno, situaciones éstas que hacen impropcedente la instalación de paramentos débiles de venteo.

En síntesis, estos sistemas constan de un dispositivo sensor que detecta explosiones incipientes (con la colaboración de amplificadores especiales) y de unos extintores presurizados cuyas válvulas son activadas por el sistema sensor (figura 1). Esta activación provoca que el medio extintor se inyecte dentro del espacio a proteger y se disperse uniformemente en el intervalo de tiempo más corto posible. Tal posibilidad reside, precisamente, en la existencia de este intervalo de tiempo, entre el comienzo de la deflagración y la formación de la presión destructora, intervalo éste en el que el sistema de supresión puede entrar en funcionamiento.

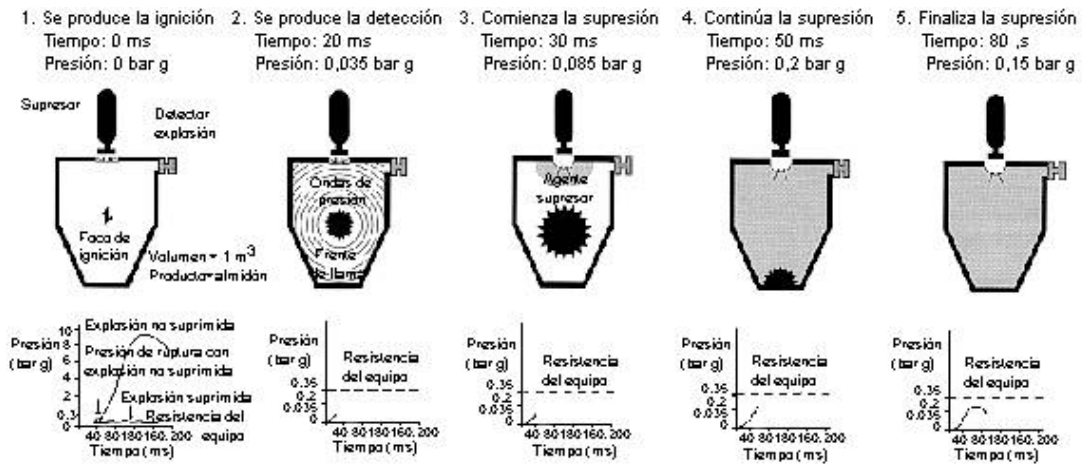


Fig. 1: Secuencia de actuación de un sistema supresor de explosión

Deben diferenciarse dos etapas fundamentales:

- **Detección:** Debe ser automática, de forma que se produzca en el primer estadio de la explosión. En la práctica los detectores deben ajustarse de forma que "sepan" discernir entre la presión inherente a la explosión en sí y la debida a otros factores o variables ajenos a aquélla en el ámbito de su funcionalidad.
- **Supresión:** Esta etapa la desarrolla el propio detector, junto con el extintor, desencadenándose la rápida difusión del agente extintor a un ritmo más rápido que la propagación de la llama (normalmente a 61 m/s), bien aprovechando la propia fuerza de la explosión, bien mediante la descarga electroexplosiva de un agente sobrepresurizado, con lo que la llama se extingue antes de que los incrementos de presión y temperatura puedan ser destructivos. (Fig. 2.)

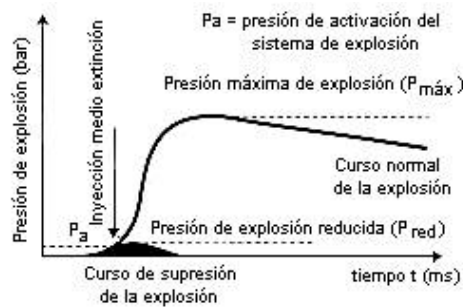


Fig. 2: Diagrama presión de explosión-tiempo de una explosión normal y de una supresión de explosión

Así como los detectores estáticos actúan al alcanzarse un nivel de presión estática prefijado, los dinámicos actúan con la variación de velocidad del aumento de presión. El detector más utilizado (figura 3) es un transductor de presión extremadamente sensible y estable que cierra unos contactos eléctricos nada más iniciarse el incremento de presión. Normalmente constan de un diafragma de baja inercia, flexible y construido con materiales diversos, según el tipo de vapores o polvos a que están expuestos. En los detectores estáticos y a efectos de calibración se utilizan tarados o niveles de referencia de 0,68 a 206 kPa (0,1 a 30 psi), mientras que en los dinámicos el reglaje típico es de 68,8 kPa/s (10 psi/s). Este último tipo de detector también dispone de un tarado estático, por lo que realmente es una combinación de ambos.

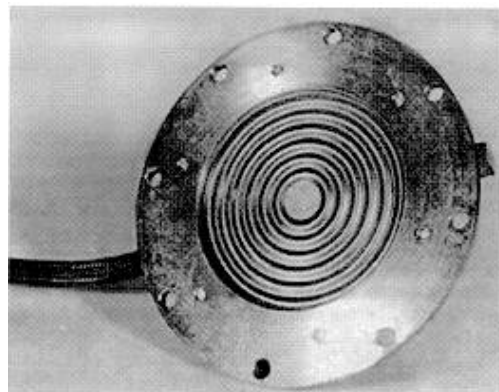


Fig. 3: Sensor de membrana de un detector de presión

El mecanismo de la supresión en sí es una inhibición química acompañada de enfriamiento, inertización o sofocamiento. El agente puede ser un líquido vaporizable con el proceso de combustión en cuestión, un producto químico seco o una combinación de los dos anteriores.

Existen, asimismo, dos tipos fundamentales de supresores: unos que utilizan un depósito frágil, realizándose la dispersión del agente mediante una pequeña carga explosiva colocada en su interior y otros conocidos como extintores de alta velocidad de descarga (HRD) que contienen un agente a presión y emplean un dispositivo electroexplosivo que activa el mecanismo de descarga. La sobrepresurización se realiza con nitrógeno seco. El mecanismo de descarga consta de un disco de ruptura activado por un dispositivo electroexplosivo. Su mayor tamaño y por tanto mayor volumen de cobertura, junto con el hecho de ser recargables, los hace más rentables que los supresores frágiles y preferidos a éstos.

En aquellos casos en los que la detección de presión no es posible (mezclas de aire y combustible no confinadas), se aprovecha la radiación emitida por toda explosión incipiente, empleándose tubos fotoeléctricos (ultravioletas) o células fotoeléctricas (infrarrojos), con lo que el conjunto reacciona en milisegundos. Cuando por las características del material y equipo se requiere detección térmica, se utilizan termopares de alta velocidad de resolución.

La detección y control del sistema se opera pues, tal y como queda reseñado, eléctricamente. La unidad central de control debe instalarse fuera de las áreas de peligro (ante existencia de polvos combustibles/gases inflamables) o, en su defecto, debe protegerse adecuadamente. Es apropiado disponer de un centro de energía suplementario (baterías), ante la eventualidad de un corte en el suministro de energía, a fin de que el sistema permanezca siempre operativo.

Características de la explosión. Límites de explosión

La velocidad de reacción de las mezclas susceptibles de explosión (frente de llama de la combustión) alcanza un valor máximo que se corresponde con una determinada concentración óptima. Fuera de ella y dentro del rango definido por los puntos límites de explosividad (superior e inferior), esta velocidad es menor. Los límites de explosividad definen, pues, el rango de concentraciones de una mezcla explosiva, dentro del cual una fuente de ignición puede desencadenar una autopropagación de la reacción.

La severidad de las explosiones depende de parámetros tales como:

- **Tamaño de las partículas:** En las nubes de polvo, cuanto más fino sea el polvo, mejores condiciones se estarán dando para que la explosión ocurra.
- **Composición:** La magnitud de la explosión puede verse afectada por la composición química. Generalmente, a mayor volatilidad del material mayores proporciones presentarán los efectos de aquélla.
- **Humedad:** La humedad contenida en el material es un factor que puede también incidir en la severidad de la explosión, correspondiendo a una menor humedad una mayor violencia.
- **Turbulencia:** El calor transferido durante la combustión se ve condicionado por el grado de turbulencia de la mezcla explosiva. A bajos niveles de turbulencia la explosividad de aquélla puede ser relativamente suave. A mayor turbulencia, sin embargo, la explosión se propagará con mucha mayor facilidad.
- **Temperatura:** Así como la violencia de la explosión puede tener un efecto más o menos acusado con el incremento de temperatura, la presión de explosión máxima, sin embargo, disminuye con aquél.
- **Concentración:** La velocidad de combustión de las mezclas explosivas presentan un máximo correspondiente a una cierta concentración óptima. A mayores concentraciones, la explosividad decrece o permanece aproximadamente constante.

Presión de explosión. Violencia de explosión

Cuando la reacción se lleva a cabo en un recipiente o recinto cerrado, no sólo reviste interés la presión de explosión P_{ex} sino que su registro y estudio, proporciona información sobre el curso del proceso de combustión. El estudio pormenorizado de este proceso exige la consideración previa de determinados conceptos.

Se define P_{ex} como "el exceso de presión sobre la inicial existente en el momento de la ignición de la mezcla explosiva".

Por presión de activación P_a se entiende la presión existente en el momento en que se activa el sistema de supresión de la explosión.

Presión reducida P_{red} es la presión resultante tras la activación del sistema de supresión. Obviamente ello implica que se ha adoptado una limitación para la presión de explosión.

El gradiente de presión, por otra parte, es un concepto que permite poner de manifiesto la velocidad de propagación de la llama y por tanto la violencia de la explosión. La variación o gradiente de presión dp/dt se define como la pendiente de la tangente a la curva presión-temperatura en el punto de inflexión de la rama ascendente. (Fig. 4)

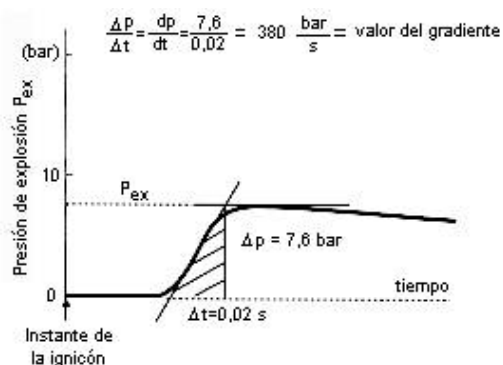


Fig. 4: Determinación del valor del gradiente de presión dp/dt de una explosión de gas

El valor máximo del gradiente se obtiene cuando la ignición de la mezcla explosiva tiene lugar en el centro geométrico del recinto a proteger, dado que en la medida en que la fuente de ignición se mueve hacia la periferia, el frente de llama alcanzará antes las paredes del recinto, en cuyo momento se produce un enfriamiento.

Los valores óptimos de la mezcla explosiva se obtienen, tanto en cuanto afecta a la variación de la presión como en cuanto al registro continuo del gradiente, en aquellos registros obtenidos en recintos de suficiente tamaño ($V > 1$ l) e igniciones localizadas en el centro. A estos valores, llamados valores característicos de la explosión, se les designa como presión máxima de explosión $P_{m\acute{a}x}$ y valor máximo del gradiente $(dp/dt)_{m\acute{a}x}$ respectivamente.

Gases inflamables

Aunque la mayoría de los gases y vapores inflamables comunes presentan una $P_{m\acute{a}x}$ entre 7 y 8 bar (en el acetileno 10 bar), el valor del gradiente, en cambio puede variar considerablemente de un gas a otro.

El volumen del recinto en el que tiene lugar la explosión tiene una marcada influencia en la violencia de ésta. La influencia del volumen en el valor máximo del gradiente de presión, tratándose de vapores y gases inflamables, viene caracterizada por la "Ley Cúbica":

$$(dp/dt)_{m\acute{a}x} \cdot V^{1/3} = \text{cte} = K_G \text{ (bar.m.s.}^{-1}\text{)}$$

Esta ley resulta válida en los siguientes casos:

- Cuando la concentración óptima de las mezclas gas / aire es la misma.
- Cuando existe coincidencia de forma en cuanto al espacio cerrado de reacción.
- Para grados de turbulencia de la mezcla gas/aire iguales.
- Para fuentes de ignición iguales.

Por ello, para caracterizar una explosión no es suficiente especificar el valor máximo del gradiente de presión, sino, también, el volumen del recinto en el que se desarrolla la explosión.

En la tabla 1 se presentan unos ejemplos de valores de la constante K_G para las condiciones indicadas

Tabla 1: Valores de la constante K_G de gases que entran en ignición con turbulencia cero, energía de ignición $E = 10$ J y $P_{m\acute{a}x} = 7,4$ bar

GAS INFLAMABLE	K_G (bar·m·s ⁻¹)
METANO	55
PROPANO	75
HIDRÓGENO	550

Esta interrelación entre la violencia de la explosión y el volumen del espacio cerrado, permite predecir, basándose en resultados de prueba en laboratorio, el curso de la explosión de un gas o vapor inflamable dado en un gran espacio. La presión de explosión máxima no sigue, sin embargo, esta relación, resultando prácticamente independiente del volumen del espacio donde la explosión tiene lugar para $V > 11$.

Polvos combustibles

Si bien las explosiones de polvos combustibles guardan cierta similitud con las explosiones de gases inflamables, las diferencias inherentes a su estado físico condicionan su desarrollo.

Para que las partículas de polvo sean explosionables deben ser inferiores a un cierto límite (0,5 mm), y las suspensiones de polvos en aire lo suficientemente densas y uniformes. Tamaños por encima de 400 μm no suelen originar explosiones, aunque existan altas energías de ignición, no obstante lo cual el mantenimiento del tamaño de la partícula de polvo por encima del límite crítico no es una medida efectiva de seguridad, dado que un pequeño contenido de material fino, formado por ejemplo por abrasión durante la manipulación del producto, puede dar como resultado que la mezcla explote.

Es más conveniente utilizar como instrumento de medida el concepto superficie de partícula que distribución por tamaño de grano, al existir una relación entre superficie específica y violencia de explosión.

Con contenidos de humedad en el producto del orden del 50% no se pueden formar mezclas explosivas.

Para gran número de clases de polvos, el límite inferior de explosividad varía entre 0,01 y 0,05 kg/m³ y el límite superior, menos definido y de particular importancia en las operaciones industriales, entre 2 y 6 kg/m³.

Si bien los valores $P_{m\acute{a}x}$ y $(dp/dt)_{m\acute{a}x}$ se ven influenciados, tanto en el caso de gases inflamables como en el de polvos combustibles, por la presión inicial, existe una presión límite inferior, de aproximadamente 10 mbar, por debajo de la cual, las explosiones de polvo ya no son posibles.

Las pruebas efectuadas con gran número de polvos combustibles y con volúmenes > 0,04 m³ han dado asimismo plena validez a la ley cúbica:

$$(dp/dt)_{m\acute{a}x} \cdot V^{1/3} = K_{St}$$

Con lo que los resultados obtenidos para pequeños espacios resultan válidos para predecir la violencia de la explosión en grandes espacios. El valor máximo $P_{m\acute{a}x}$ permanecerá constante al variar el volumen.

Tratándose de polvos combustibles, la constante específica para cada producto se simboliza por K_{St} con el subíndice "St" (de Staub, polvo en alemán).

La peligrosidad de los polvos se clasifica en función del valor K_{St} de acuerdo con la tabla 2.

Tabla 2: Clases de explosión de polvos

CLASES DE EXPLOSIÓN DE POLVO	$K_{St}(\text{bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	EXPLOSIVIDAD
St 0	0	nula
St 1	0 ÷ 200	débil o moderada
St 2	201 ÷ 300	fuerte
St 3	>300	muy fuerte

Elementos y agentes supresores

Estos sistemas utilizan como agente supresor y en orden decreciente de eficacia: polvo, agua, soluciones de agente humectante, agua con glicerina cuando resulta preciso protección anticongelante y halones 1211 y 1301.

Si bien los hidrocarburos halogenados gozan de una cierta eficacia como agente inertizador para las mezclas gas/aire si se inyectan dentro del recinto a proteger antes de que la ignición tenga lugar, acuerdos a nivel mundial en materia medioambiental han relegado este tipo de agente.

El uso de agua como agente resulta posible especialmente en explosiones de polvo. En pruebas efectuadas con polvo de almidón y colorantes, la presión de explosión y la violencia de la explosión en el espacio dado fueron considerablemente reducidas, no obstante la relativamente alta presión de activación P_a (0,4 bar), revelando un rendimiento superior al obtenido con halones.

Tratándose de disolventes y gases inflamables, se consiguen excelentes resultados supresores con agentes especiales a base de polvos, destacándose como muy eficaces los agentes basados en el fosfato de amonio. Debido a la diferente efectividad que pueden presentar las distintas clases de polvos de fosfato de amonio, debe seleccionarse aquélla que proporcione la mayor reducción de los parámetros de la explosión de referencia. Ciertas criolitas y fluoruros presentan una efectividad de extinción comparable a la del fosfato de amonio en polvo. En ocasiones, los polvos basados en bicarbonato sódico pueden dar mejores resultados si cabe que el más efectivo fosfato de amonio.

Se recomienda, por todo ello, que la idoneidad de un polvo extintor se verifique sometiéndolo a prueba bajo las condiciones de explosión en un espacio lo suficientemente amplio ($V > 1 \text{ m}^3$) y determinando la correlación entre la presión de activación y la presión de explosión reducida. Llegado este punto, resulta oportuno destacar la necesidad de que el medio extintor sea resistente a las temperaturas y vibraciones que ocurran en la instalación.

El actuante explosivo, localizado en el centro de las unidades, es activado eléctricamente al actuar el detector mediante un impulso desde la unidad de control. El agente es expedido a velocidad inicial en torno a los 40-60 m/s, la cual debe ser superior a la de avance del frente de llama. Los supresores se instalan dentro de los equipos: tanques, recipientes de procesos químicos, sistemas de recuperación de vapores inflamables, equipos que manipulen o almacenen polvos combustibles, etc., utilizándose los de diseño

cilíndrico siempre que se requiera una dispersión uniforme en el interior de aquéllos.

Descripción de los sistemas de extinción

Diseñados para impulsar el agente extintor en el tiempo más corto posible, los extintores están conectados con válvulas de acción rápida que abren en milisegundos tras recibir la señal de activación.

Los extintores pueden ser hemisféricos, esféricos o cilíndricos. Los tamaños son diversos y pueden variar entre 0,5 y 45 l, para poder adaptarse a las necesidades del diseño. Tamaños usuales pueden ser, por ejemplo, extintores de 5 l con sifón invertido y dos válvulas de 3/4" activadas por un detonador y extintores de 5 l con una válvula de 3" activada por un dispositivo de corte explosivo.

Ambos extintores contienen 4 kg de agente extintor. El correspondiente gas propulsor (N_2) asegura, junto con una especial disposición de las boquillas, una distribución óptima del agente dentro del espacio a proteger. La presión de este gas es de 120 bar en el de 3/4" y de 60 bar en el de 3". Especial atención requieren las boquillas de descarga cuyo funcionamiento no debe verse impedido (por ejemplo por un atasco del producto utilizado).

También existen extintores esféricos con válvula de 3", si bien dada la creciente amplitud de los espacios a proteger, actualmente se diseñan extintores de mayor capacidad (20 - 45 l).

Límites de aplicabilidad de los sistemas de supresión

En la eliminación de explosiones de polvo se ha observado que si la reducción de la presión de explosión a 1 bar con una presión de activación de 0,1 bar se toma como criterio para actuaciones eficaces, la supresión de explosiones de polvo llega a ser cada vez más difícil con valores K_{St} crecientes, incluso si se usan cantidades mayores de agente extintor. De ahí, obviamente, que haya límites a la aplicabilidad de los sistemas de supresión contra las explosiones de polvo. La principal causa de estas limitaciones es la velocidad media de dispersión del polvo extintor, que es del orden de 10 m/s.

Los actuales conocimientos indican que resultan posibles protecciones eficaces de algunos recintos contra explosiones de polvo si la K_{St} no excede de 300 bar.m.s⁻¹. y en cuanto a gases inflamables se refiere, si la K_G está por debajo de 75 bar. m.s⁻¹. Por ello, este sistema protector puede aplicarse con éxito contra explosiones de mezcla de los siguientes gases o vapores con aire: CO, metano, propano, gasolinas auto y disolventes orgánicos. No pueden protegerse con esquemas convencionales aquellos espacios dentro de los cuales se puedan producir explosiones de gas de coque o incluso hidrógeno. En el mejor de los casos, puede alcanzarse una cierta reducción del rango de explosión, de forma similar a como acontece con polvos de aluminio.

En cuanto a mezclas turbulentas, pueden incluso ser suprimidas con éxito ($P_a < 0,1$ bar, $P_{red} < 1$ bar) siempre que la K_G de la mezcla turbulenta sin supresión no exceda de 200 bar. m. s⁻¹. Consecuentemente, la supresión de la explosión puede prosperar tratándose de mezclas de metano / aire de baja o media turbulencia y mezclas de propano / aire de baja turbulencia.

En definitiva, puede resumirse diciendo que las explosiones de polvo combustible se suprimen más fácilmente que las explosiones de las mezclas gas/aire si se usa agente en polvo.

Cantidad de agente requerido

Basándose en resultados de pruebas sistemáticas llevadas a cabo en espacios comprendidos de 1 a 60 m³, se llega a las siguientes conclusiones:

- El medio extintor apropiado, tratándose de extintores de 5 l con agente propelente a presión, es el que se indicó en el apartado: "Descripción de los sistemas de Extinción".

Cuanto más alta sea la presión de activación del sistema, más alta será la presión de explosión reducida. Un agente extintor será tanto mas efectivo, en tanto en cuanto a un incremento en la presión de activación del sistema de supresión le corresponda un ligero incremento de la presión de explosión reducida. Sólo los más eficaces agentes gozan de esta propiedad.

- El tipo de extintor de polvo fue el que se mostró más efectivo bajo condiciones dadas.

Los resultados se muestran en la figura 5. Las cantidades de agente extintor que se indican, posibilitan supresiones favorables tratándose de explosiones de propano iniciadas a turbulencia cero, así como en explosiones de polvo de la clase St 1 en volumen hasta 60 m³. Con presión de activación $P_a = 0, 1$ bar, la presión de explosión dentro del espacio podría ser restringida a menos de 0,5 bar.

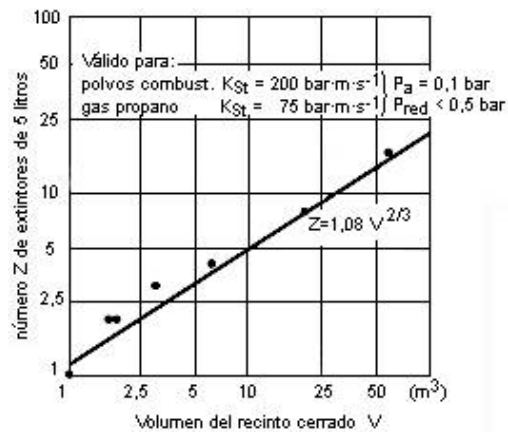


Fig. 5: Cantidad de medio extintor (polvo) requerido para suprimir explosiones de gas y de polvo en recintos cerrados de diverso tamaño

Dado que en las operaciones industriales las mezclas inflamables gas/aire son casi siempre más o menos turbulentas, la mínima presión resistente del espacio a proteger que se indica en la tabla 2 es algo mayor que el valor dado en el gráfico, a fin de tener en cuenta imponderables en el curso de las explosiones. La tabla 3 proporciona el número mínimo de extintores de 5 l requerido para un volumen V_2 .

Tabla 3: Cantidad mínima de medio extintor. Presión de activación $P_a < 0,1$ bar (agente extintor: polvo, que resultó ser el más efectivo)

MATERIAL COMBUSTIBLE DEL RECINTO CONFINADO	Nº EXTINTORES DE 5 l Z_2	RESISTENCIA MÍNIMA DE PRESIÓN DEL RECINTO CONFINADO P_s (bar)
METANO	$0,81 \times (V_2)^{2/3}$	1,0
PROPANO, VAPORES DE DISOLVENTE, GASOLINA, ETC.	$1,08 \times (V_2)^{2/3}$	1,0
POLVOS: RIESGO CLASE St 1	$1,08 \times (V_2)^{2/3}$	0,5
POLVOS: RIESGO CLASE St 2	$1,40 \times (V_2)^{2/3}$	1,0

Si la resistencia a la presión del recinto a proteger supera los requerimientos de la tabla, la presión de activación del sistema de supresión puede ser mayor de 0,1 bar. Para proteger espacios por los sistemas de supresión es preciso que éstos dispongan en todo momento de la suficiente resistencia mecánica. Como norma general, el número de extintores supresores calculado mediante la siguiente tabla debe ser redondeado a la unidad superior.

Otra guía alternativa para diseñar un sistema supresor de explosiones es la proporcionada por Gravier, válida para polvos grupo St 1 y St 2, volúmenes entre 1 y 1000 M^3 y supresores de 5,4 l, 20 l, y 45 l, según puede verse en la figura 6.

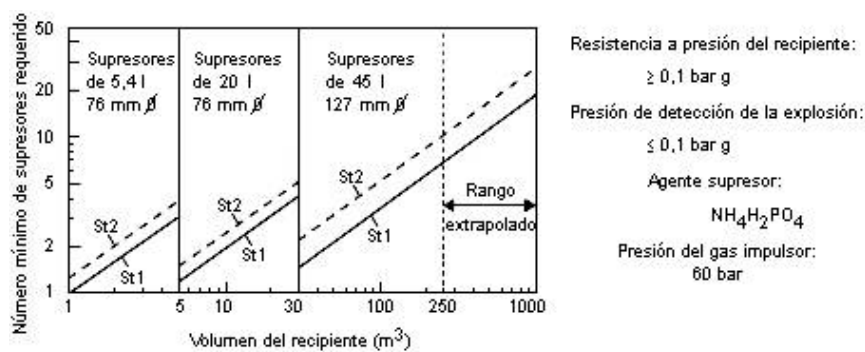


Fig. 6: Guía para el diseño de sistemas de supresión de explosiones de polvos para recipientes de varios volúmenes, según el sistema de supresión de Gravier

De la gráfica se desprende que la cantidad de agente extintor requerido no es proporcional al volumen a proteger. La relación sigue la ley cúbica":

$$V_2 / V_1 = (Z_2 / Z_1) - (V_2 / V_1)^{1/3}$$

De ella se deduce que la cantidad de medio extintor requerido Z_2 para suprimir explosiones dentro de un volumen V_2 puede calcularse a partir de la cantidad Z_1 conocida para un volumen V_1 mediante la expresión:

$$Z_2 = Z_1 (V_2 / V_1)^{2/3}$$

(nº de extintores presurizados de 5 l)

Conformada a partir de expresiones de pruebas. Si $V_1 = 1 \text{ M}^3$ y Z_1 el número de extintores de 5 l requeridos para este volumen unitario, se tiene:

$$Z_2 = Z_1 \cdot V_2^{2/3}$$

Bibliografía

(1) BARTKNECHT, W.

Explosiones

Berlin, Springer-Verlag, 1981

(2) BRYAN, J. L.

Fire suppression and detection systems

Nueva York, Mac Millan Publishing Co., Inc. , 1982

(3) CARTWRIGHT, P.

Industrial explosion protection. Dust explosion protection seminar (22-8-1995)

Oldham. Lancashire, Kidde Fire Protection -Chilworth Technology Ud.

(4) ECKHOFF, R. K.

Dust explosions in the process industries

Londres, Butterworth-Heinemann, 1991

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

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

Rugby, The Institution of Chemical Engineers, 1988