

D. JAVIER GARCIA TORRENT (*) (**)
D. RAMON GONZALEZ EGUREN (*)
D. RAMON ALCANTARA PEDREIRA (**)
D JOSE MARIA NUBLA LADRON (**)

(*) Laboratorio Oficial Madariaga
(**) E.T.S. Ingenieros de Minas de Madrid



Riesgos en el manejo de polvos combustibles

LOS riesgos relacionados con los gases inflamables son ampliamente conocidos en todas las industrias implicadas directa o indirectamente en el manejo de tales ga-

ses. Muchas han sido las investigaciones llevadas a cabo y la gama de soluciones prácticas encontradas es enorme y, a la vez, creciente día a día.

Sin embargo, el riesgo de explosión

asociado al polvo de cualquier material combustible, quizá por ser menos intuitivo, quizá por haberse manifestado más esporádicamente, se encuentra actualmente menos difundido.



Las explosiones de polvo pueden ocurrir en cualquier proceso en el que se maneje material pulverulento, tal como molienda, secado, transporte, almacenamiento, etc., y pueden afectar a materiales de diferente naturaleza, tales como productos de la industria agrícola y alimenticia, plásticos, detergentes, derivados de la madera, colorantes, polvos metálicos, productos farmacéuticos o polvo de carbón. Este riesgo aumenta con la tendencia actual de ir a instalaciones cada vez más grandes, en las que la producción neta de polvo se ve incrementada, lo que se traduce en un aumento del espesor de la capa de polvo depositado y también de la concentración de polvo en nube.

Los accidentes ocurridos en el pasado han demostrado que las explosiones de polvo pueden llegar a ser tremendamente violentas, causando muchas víctimas y arrasando totalmente instalaciones de todo tipo (minas, silos para almacenar granos, fábricas de harina o azúcar, almacenes de forraje, etc.) (1).

El hecho de la falta de información sobre los posibles riesgos, unido al elevado número de empresas o industriales implicados, hace que sea imprescindible continuar investigando las causas de los posibles accidentes, así como informar a la industria del riesgo de explosión y de los efectos y consecuencias que de ella se pueden derivar.

LA EXPLOSION PRIMARIA

Strehlow y Baker (2) definen una explosión como la liberación de energía en un tiempo y un volumen lo suficientemente pequeños como para generar una onda de presión de amplitud finita que se desplaza desde su origen y es audible. Esta definición nos acerca a la idea de los efectos dinámicos asociados a toda explosión.

Si se busca la causa de la explosión, refiriéndonos al caso de polvo inflamable, podría también definirse ésta como una combustión rápida e incontrolada de las partículas que se propaga a sí misma, con generación de calor y gases a altas temperaturas y presiones.

De forma natural surge la idea de que la combustión será tanto más rápida cuanto menor sea el tamaño de los granos o partículas combustibles. En efecto, imaginemos una viga de madera ardiendo; las llamas se exten-

derán poco a poco por toda la superficie de la viga y ésta se irá consumiendo desde su periferia hacia el centro. Sin embargo, si esa viga se deshace en virutas, el proceso es mucho más rápido, y la misma cantidad de madera se consumirá en un tiempo mucho menor. Pero aún hay más, si esa madera estuviera en forma de serrín, la reacción de combustión podría desarrollarse, bajo ciertas condiciones (polvo formando una nube), de manera tan rápida y violenta que adquiriría el carácter de una verdadera explosión.

Al disminuir el tamaño del grano de cualquier material, su superficie específica aumenta enormemente y dado que los procesos de oxidación de transmisión de calor dependen del área superficial disponible, se comprende que el tamaño de las partículas va a ser uno de los factores más importantes que influirán tanto sobre la aparición del riesgo de explosión como sobre la potencia de la explosión a que dicho polvo pueda dar lugar.

En general, para tamaños mayores de 0,5 mm la probabilidad de inflamación y explosión es baja, aunque debe tenerse en cuenta que el frotamiento o roce entre partículas que tiene lugar durante un gran número de operaciones (transporte, tamizado, etc.) genera la producción de granos más finos.

Además de otros aspectos asociados al tamaño del grano (variación de la composición en sustancias heterogéneas, influencia en el propio mecanismo de la reacción de combustión en productos de carácter orgánico) es importante considerar otro efecto: cuanto menores sean las partículas más tiempo van a estar en suspensión antes de llegar a depositarse y, por consiguien-

Los efectos de la explosión secundaria, que al propagarse puede dar lugar a sucesivas explosiones, son los realmente catastróficos.



CUADRO 1

Para que tenga lugar una explosión de polvo deben concurrir simultáneamente las siguientes condiciones (3):

1. El polvo debe ser combustible.
2. El polvo debe ser capaz de pasar a la atmósfera en forma de suspensión.
3. La atmósfera en la que el polvo queda suspendido debe contener suficiente oxígeno para permitir la combustión.
4. El polvo debe tener una distribución de tamaños de partículas capaz de propagar la llama.
5. La concentración del polvo suspendido debe estar dentro de los límites de explosividad.
6. Debe estar presente una fuente de ignición de suficiente energía para iniciar la propagación de la llama.

Las explosiones de polvo pueden ocurrir en cualquier proceso en el que se maneje material pulverulento.

te, van a estar expuestas a condiciones más favorables para la inflamación durante un período mayor, por lo que aumentará el riesgo.

Cuando el polvo está depositado y recibe un aporte térmico (por ejemplo, al depositarse sobre la carcasa externa de un motor o sobre cualquier otro tipo de superficie caliente) lo más probable es que si se inicia el proceso de combustión ésta se desarrolle lentamente, incluso sin manifestaciones externas perceptibles. Ahora bien, si por cualquier motivo (sacudidas, vibraciones, etc.) ese polvo pasara a la atmósfera en forma de nube, podría iniciarse súbitamente una explosión.

Imaginando esas partículas puestas en suspensión, se comprende que, una vez iniciado el proceso de combustión, para que pueda propagarse es necesario que las partículas estén lo suficientemente separadas unas de otras para que el agente oxidante (el aire, generalmente) pueda llegar hasta ellas y permitir que continúe la oxidación; pero, a la vez, las partículas deben estar suficientemente próximas para transmitirse la energía necesaria que active y propague el proceso. Esa energía se transmite fundamentalmente en forma de calor por radiación.

Se observa que por debajo de ciertas concentraciones de polvo en la atmósfera la combustión no progresa. Al aumentar la concentración por debajo de un límite inferior, el proceso se propaga a sí mismo, alcanzando una velocidad máxima para una determinada concentración, típica para cada material combustible. Si se continúa aumentando la concentración, esa velocidad disminuye, llegando a detenerse la reacción para otra concentración característica. Todo esto nos lleva a considerar unos límites de concentración para las explosiones de polvos combustibles, de manera similar a los límites de inflamabilidad de los gases.



Al igual que ocurre con los gases inflamables, para que comience el proceso de combustión y explosión en una nube de polvo combustible es preciso que esté presente una fuente de energía que dé origen a la ignición. En este campo es donde quizá deba investigarse más profundamente para llegar a conocer completamente el mecanismo de ignición y poder así prevenirlo en los diferentes casos que puedan presentarse. En general, puede afirmarse que es más difícil que se inicie una explosión de polvos que una de gases (o líquidos inflamables), pues las energías mínimas de ignición de los primeros son superiores (del orden de mJ) a las de los últimos (del orden de μ J). Ver cuadro 1.

Es lógico suponer que todas estas condiciones no se van a cumplir simultáneamente en todos los puntos de una instalación en la que se maneje polvo. Sin embargo, el estudio de diferentes escenarios protagonistas de explosiones de polvo muestra que éstas han afectado a grandes extensiones y no sólo a zonas localizadas. Esta situación, unida al hecho de que en todo lugar donde se maneja material

pulverulento se producen acumulaciones de éste a lo largo de toda la instalación, ha conducido a establecer el siguiente mecanismo: cuando se alcanzan localmente las condiciones mencionadas puede producirse la explosión de una primera y pequeña nube de polvo, explosión denominada primaria (4) (5), de no excesiva importancia y que, en principio, debería afectar sólo a un pequeño recinto y no ser grave. Ahora bien, esta explosión primaria genera ondas de presión que aumentarán la turbulencia del ambiente y favorecerán el que una cierta cantidad de polvo depositado pase a la atmósfera en forma de suspensión. Con ello se alcanzan de nuevo las condiciones para la explosión, y es la propia explosión primaria quien ceba la nueva explosión, llamada secundaria. Los efectos de esta segunda explosión, que al propagarse puede dar lugar a sucesivas explosiones en diferentes partes de la instalación, son los realmente catastróficos, debido a la considerable energía que de forma repentina es capaz de liberar.

Para que la explosión se propague es necesario que se produzca una reacción química entre las partículas de

polvo y el oxígeno disponible en el aire. La velocidad de reacción dependerá de la concentración de oxígeno y de la naturaleza química del polvo (6).

Así, en una explosión de polvos metálicos se forman óxidos metálicos sólidos y el nitrógeno gaseoso es expandido por el calor de combustión, lo que produce los efectos de aumento de presión. En ocasiones, el nitrógeno puede reaccionar violentamente con el metal para dar nitruros metálicos, que son inestables a altas temperaturas.

En los productos orgánicos, la combustión produce dióxido de carbono y vapor de agua. Las presiones obtenidas en las explosiones de polvos de este tipo se deben a la expansión de los gases producida por la combustión.

Las reacciones pueden ser homogéneas, heterogéneas o intermedias, lo que dificulta la asignación de un nivel propio de explosividad a un compuesto químico o grupo funcional. Se ha comprobado, sin embargo, que la presencia de grupos funcionales orgánicos, tales como COOH, OH, NH₂, NO₂, C=N y N=N tienden a aumentar el riesgo de explosión, que también aumenta al producirse la sustitución de átomos de hidrógeno por aluminio, calcio o cinc metálicos, mientras que se reduce al sustituir el hidrógeno por sodio o potasio metálicos.

MATERIALES E INDUSTRIAS IMPLICADAS

Sólo se dispone de algunos datos aislados sobre explosiones de polvo ocurridas en España. En otros países las estadísticas son más completas, y, con frecuencia, se remontan hasta los primeros años del presente siglo.

En Estados Unidos, entre los años 1900 y 1977 se contabilizaron 1.430 explosiones en minas de carbón, con, al menos, 700 muertos y más de 2.200 heridos (7). Entre 1958 y 1977 se registraron 220 explosiones en la industria de los cereales, con un total de 48 muertos y 500 heridos (8).

En Alemania y países vecinos, entre 1960 y 1972, se produjeron más de 4.000 explosiones de polvo (lo que equivale a una explosión cada día de trabajo) (4).

En Gran Bretaña, entre 1958 y 1976 se contabilizaron 679 explosiones, que causaron 30 muertos y 925 heridos (6). En el cuadro 2 se puede ver la relación de algunas explosiones ocurridas en

| AÑO | LUGAR | INDUSTRIA | PERDIDAS | MUERTOS | HERIDOS |
|------|--------------------|----------------|-------------------------|---------|---------|
| 1979 | Lérida (ESPAÑA) | Silo de grano | — | 10 | 18 |
| 1979 | Bremen (RFA) | Fábrica harina | 50 Millones de dólares | 14 | 17 |
| 1982 | Tiene (BEL) | Fábrica azúcar | 0,5 Millones de dólares | 4 | varios |
| 1982 | Metz (FRA) | Transp. grano | 10 Millones de dólares | 12 | 10' |
| 1983 | Hamburgo (RFA) | Pita. extrac. | 80 Millones de dólares | 1 | 10 |
| 1984 | Cork (IRL) | Transp. grano | 0,5 Millones de dólares | 2 | 0 |
| 1984 | USA (21 expl.) | Transp. grano | 40 Millones de dólares | 9 | 30 |
| 1985 | Bahía Blanca (ARG) | Transp. grano | 0,5 Millones de dólares | 4 | 20 |

los últimos años, que puede dar una idea de la gran importancia y repercusión que tales accidentes llegan a tener (9):

En cuanto a los tipos de polvo e industrias implicadas, en la tabla 1 se puede comprobar la amplitud del fenómeno:

Además, hay una serie de procesos típicos en los que suelen ocurrir los accidentes, así como unas fuentes de ignición que se suelen identificar como la causa del origen de las explosiones. En la tabla 2 se recogen, a título de ejemplo, los procesos y fuentes causantes de accidentes en la República Federal Alemana durante el período 1966-1980. Conviene advertir que estos

datos variarán para cada tipo de industria en particular y para las distintas clases de materiales combustibles implicados.

EVALUACION DEL RIESGO

Para determinar la posibilidad de explosión existen unos parámetros medibles para cada tipo de polvo. Estos son (10):

- Temperatura mínima de inflamación (TMI), que determina si una fuente de calor es capaz o no de iniciar el proceso.
- Límites de inflamabilidad, que permiten conocer las concentraciones

| INDUSTRIA | PRODUCTO EXPLOSIVO |
|---------------------------------------|---|
| Alimentación y nutrición de animales. | Polvo de granos, cereales y legumbres, leche en polvo y derivados, piensos y forrajes. Alimentos de animales domésticos. Harina, almidón, azúcar. |
| Industria química. | Plásticos: polietileno, polipropileno, poliacrilo. Productos farmacéuticos, pinturas, barnices, colorantes, insecticidas, herbicidas. Detergentes. |
| Industria de procesado de metales. | Polvo de aluminio, magnesio, hierro, titanio. |
| Industria de procesado de madera. | Polvo de madera y derivados: serrín, papel, compuestos de celulosa. |
| Varios. | Azufre. Polvo de carbón. |

| PROCESOS | | FUENTES | |
|-----------------------|------|-------------------------|------|
| | % | | % |
| Almacenamiento | 21,3 | Chispas metálicas | 29,6 |
| Molienda | 13,1 | Puntos incandescentes | 9,3 |
| Transporte | 11,0 | Fricción | 8,9 |
| Filtrado | 11,0 | Descarga electrostática | 9,3 |
| Secado | 8,6 | Llama abierta, fuego | 8,2 |
| Combustión | 6,2 | Superficies calientes | 6,5 |
| Mezclado | 5,2 | Autoignición | 5,8 |
| Pulido, revestimiento | 5,2 | Soldadura | 4,8 |
| Resto | 18,6 | Equipos eléctricos | 3,4 |
| | | Resto | 14,1 |



Es preciso que se unifiquen criterios y se aúnen las fuerzas para colaborar en el establecimiento de directrices y normas.

dentro de las cuales se produce la inflamación. Es característica la concentración mínima explosiva (CME).

- Energía mínima de inflamación (EMI), que permite saber si una fuente de ignición tendrá energía suficiente para producir la inflamación.

- Presión máxima de explosión (PME) y velocidad máxima de aumento de presión (VMAP). Durante una explosión en un recinto cerrado, la presión varía según la curva representada en la figura 1. Sobre ella se pueden definir los siguientes parámetros:

Presión máxima de explosión: Pmax.

Velocidad máxima de aumento de presión: $tg \alpha = dp/dt$

Velocidad media de aumento de presión: $tg \beta = Pmax/\Delta t$

En la tabla 3 se recogen los valores de estos parámetros para algunos productos (11).

Estos parámetros se emplean para definir diversos índices de explosividad (12).

Así, en el U.S. Bureau of Mines (EE.UU.) determinan la sensibilidad a la ignición y la severidad de la explo-

sión por comparación de los parámetros de la muestra a evaluar con los del carbón de Pittsburgh.

Sensibilidad de la ignición =

$$SI = \frac{(TMI \times EMI \times CME) \text{ Pittsburgh}}{(TMI \times EMI \times CME) \text{ Muestra}}$$

Severidad de la explosión =

$$SE = \frac{(PME \times VMAP) \text{ Muestra}}{(PME \times VMAP) \text{ Pittsburgh}}$$

Índice de explosividad = IE = SI x SE

Con arreglo a estos índices se establece la siguiente clasificación:

| Riesgo de explosión | SI | SE | IE |
|---------------------|---------|---------|---------|
| Débil | 0,2 | 0,5 | 0,1 |
| Moderado | 0,2-1,0 | 0,5-1,0 | 0,1-1,0 |
| Fuerte | 1,0-5,0 | 1,0-2,0 | 1,0-10 |
| Severo | 5,0 | 2,0 | 10 |

En Alemania, la clasificación se establece según el valor de un parámetro característico para cada tipo de polvo K_{st} , que relaciona la velocidad máxima de aumento de presión con el volumen del recinto (ley cúbica):

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} \times V^{1/3} = K_{st}$$

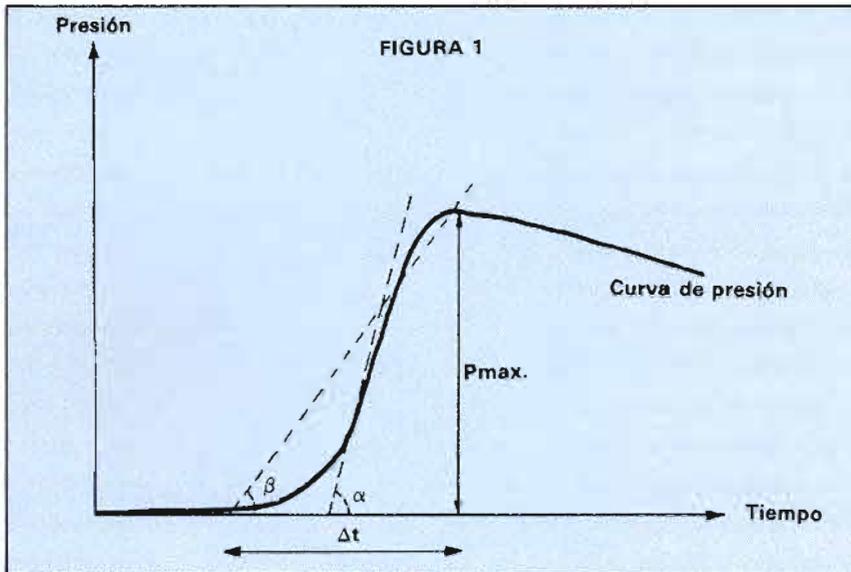
Según los valores de K_{st} , los diferentes tipos de polvo se clasifican de la siguiente forma:

| Clase | K_{st} (bar.m/s) | Características |
|-------|--------------------|------------------|
| St 0 | 0 | No hay explosión |
| St 1 | 0-200 | Débil |
| St 2 | 200-300 | Fuerte |
| St 3 | 300 | Muy fuerte |

Sin embargo, la clasificación del polvo de carbón tiene características propias. En efecto, en el Bergbau Ver-

TABLA 3. PARAMETROS PARA EVALUAR EL RIESGO DE EXPLOSION

| TIPO DE POLVO | TMI (° C) | CME (g/m³) | EMI (mJ) | PME (KPa) | VMAP (KPa/s) |
|---|-----------|------------|----------|-----------|--------------|
| Azúcar | 370 | 45 | 30 | 741 | 34.000 |
| Azufre | 190 | 35 | 15 | 530 | 31.960 |
| Cacahuete, Cáscara | 460 | 45 | 50 | 789 | 54.400 |
| Cacao industrial | 510 | 75 | 100 | 360 | 8.160 |
| Carbón Pittsburgh | 610 | 55 | 60 | 564 | 15.640 |
| Celulosa | 410 | 45 | 40 | 796 | 54.400 |
| Cok de petróleo | 670 | 1000 | — | 245 | 1.360 |
| Corcho | 460 | 35 | 35 | 653 | 51.000 |
| Dextrina | 410 | 50 | 40 | 673 | 61.200 |
| Difenil | 630 | 15 | 20 | 558 | 25.160 |
| Epoxi, resina | 490 | 15 | 9 | 639 | 57.800 |
| Esteorato calcio | 400 | 25 | 15 | 660 | 68.000 |
| Ferromanganeso | 450 | 130 | 80 | 422 | 34.000 |
| Granos mezclados (Maiz, avena y cebada) | 430 | 55 | 30 | 782 | 37.400 |
| Lactalbúmina | 570 | 40 | 50 | 660 | 23.800 |
| Levadura | 520 | 50 | 50 | 836 | 23.800 |
| Licopodio | 480 | 25 | 40 | 510 | 21.080 |
| Paraformaldehido | 410 | 40 | 20 | 904 | 88.400 |
| Poliacetato de vinilo | 450 | 40 | 160 | 469 | 6.800 |
| Poliestireno | 500 | 20 | 15 | 680 | 47.600 |
| Poliuretano, espuma | 510 | 30 | 20 | 592 | 25.160 |
| Vitamina C | 460 | 70 | 60 | 598 | 32.640 |



Para determinar la posibilidad de explosión existen unos parámetros medibles para cada tipo de polvo.

suchsstrecke (BVS) determinan la velocidad máxima y la velocidad media de aumento de presión, valores con los que se define el parámetro de explosión K_{ex} :

$$K_{ex} = \frac{dP}{dt_{max}} \times \frac{P_{max}}{t} \quad (\text{bar/s})$$

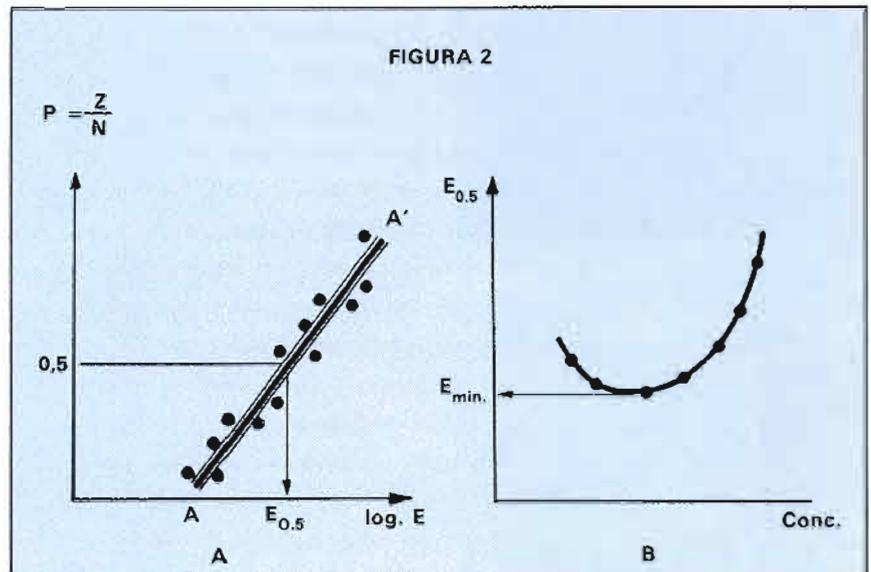
El polvo procedente de una capa de explosión se considera «no peligroso» cuando ninguna de las muestras supera el valor $K_{ex} = 70$ bar/s.

Si K_{ex} está comprendido entre 70 y 95 bar/s, los ensayos de laboratorio no facilitan un dictamen inequívoco de la tendencia explosiva del polvo. En tal caso, se prevén ensayos en una galería experimental.

Si el polvo alcanza en algún caso el valor $K_{ex} = 95$ bar/s se considera «peligroso».

Experimentalmente se ha comprobado que el intervalo de clasificación dudosa (K_{ex} comprendido entre 70 y 95 bar/s) se corresponde aproximadamente con los carbonos cuyo contenido en volátiles está comprendido entre el 12 y el 18 por cien.

En Polonia, las investigaciones son llevadas a cabo por el Glowny Instytut Gornictwa. De forma similar, se determinan dos parámetros: la capacidad de ignición, denominada W_z , y la explosividad, denominada W_w . El primer parámetro se obtiene a partir de la curva que relaciona la concentración de polvo con la energía que tiene una probabilidad del 50 por cien de inflamar una nube de polvo. Esta curva, representada en la figura 2A, tiene en abci-



sas el logaritmo de la energía empleada en un ensayo de inflamación y en ordenadas la probabilidad de ignición expresada como el número Z de igniciones frente al número total N de ensayos realizados. Variando el nivel de energía se llega a obtener una recta AA'. Sobre ella se puede determinar la energía que corresponde a la probabilidad $p = 0,5$ de ignición.

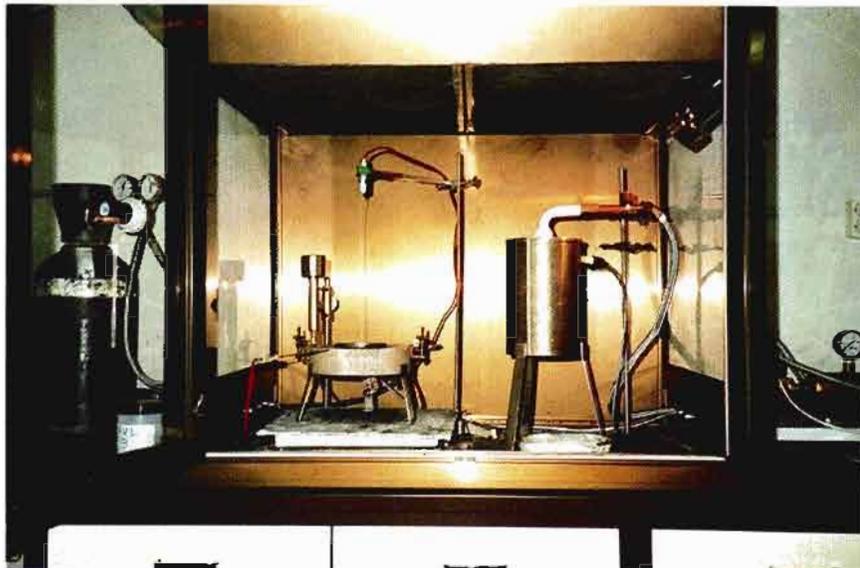
Repetiendo lo mismo para diferentes concentraciones, puede obtenerse una curva como la de la figura 3B, que representa la probabilidad o capacidad de ignición del polvo combustible.

El parámetro W_z se obtiene a partir de los valores de la velocidad máxima de aumento de presión, de manera que indica las posibles consecuencias o lo violenta que puede llegar a ser una explosión si ésta tiene lugar.

Con estos dos parámetros se establece el riesgo de explosión de un determinado polvo, de acuerdo con el siguiente criterio:

| $W_z + W_w$ | Riesgo de explosión |
|-------------|---------------------|
| 0 | No hay riesgo |
| 2 | Algún riesgo |
| 3-5 | Gran riesgo |
| 6 | Muy alto riesgo |

Vemos, de nuevo, cómo se están conjugando dos ideas diferentes. Por un lado, se examina la probabilidad de que el suceso pueda tener lugar y, por otro, se evalúan las posibles consecuencias. Esto es muy importante, pues puede existir un polvo combustible que sea muy fácilmente inflamable, pero en el que la combustión y posible explosión no revistan ninguna



gravedad, o, por el contrario, puede manejarse un polvo que sea altamente explosivo, con presiones de explosión y gradientes de presión muy elevados, lo que equivale a importantes efectos destructivos, pero que sea muy difícilmente inflamable, es decir, que durante las condiciones normales del proceso a que sea sometido, en ausencia de fuentes de ignición poderosas ajenas a éste, sea prácticamente incapaz de iniciar el proceso de explosión; por lo que debe considerarse como seguro.

Las diferentes clasificaciones antes descritas sirven para establecer ciertas limitaciones en los equipos y en las instalaciones donde se trabaja en presencia de polvos combustibles, como son las siguientes:

- Control de temperaturas del proceso y de superficies calientes.
- Control de las acumulaciones y suspensiones de polvo.
- Inertización parcial o total del proceso.
- Control de conexiones a tierra y materiales antiestáticos. Evitar fuentes de ignición.

Además se emplean también para diseñar medidas de protección encaminadas a evitar los daños que puedan causar las explosiones (13) (14).

MEDIDAS DE PROTECCION

Las medidas de seguridad se pueden agrupar en tres categorías:

a) Prevención de la inflamación

Se trata de medidas, tales como las mencionadas en el párrafo anterior,

cuya finalidad es evitar que concurren las condiciones necesarias para el desarrollo de explosiones de polvo.

b) Supresión o confinamiento de la llama

Se puede suprimir la llama atacándola directamente en los momentos iniciales de formación o antes de que continúe su propagación.

La técnica de confinar la llama se basa en detectar ésta provocando el ac-

cionamiento de sistemas (compuertas, válvulas en tuberías, paneles deflectores, etc.) de forma que se impida la propagación a las restantes partes de la instalación.

c) Explosión segura

El planteamiento de este tipo de protección se basa en permitir que la explosión se desarrolle, pero bajo condiciones seguras tanto para el personal como para los equipos o instalaciones.

En determinadas situaciones puede recurrirse a sobredimensionar partes de la instalación (molinos, hornos de secado), de forma que resulten suficientemente resistentes para soportar la sobrepresión creada por la explosión.

Sin embargo, lo más frecuente es diseñar válvulas de escape o aberturas para descompresión sobre las que se instalan clapetas, discos rompibles, puertas abatibles, etc., de forma que, en caso de explosión, ponen en comunicación el recinto cerrado con la atmósfera y así la presión no supera en el interior un valor preestablecido.

El principio de esta técnica, llamada normalmente venteo, se pone de manifiesto en la figura 3.

En ella se representa la evolución de

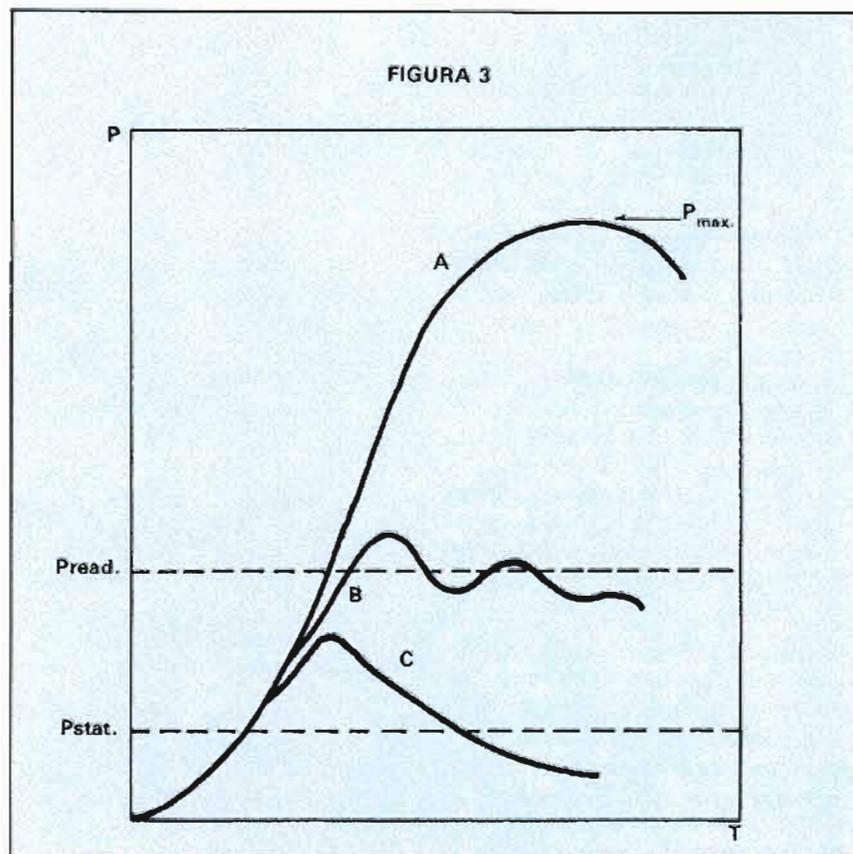
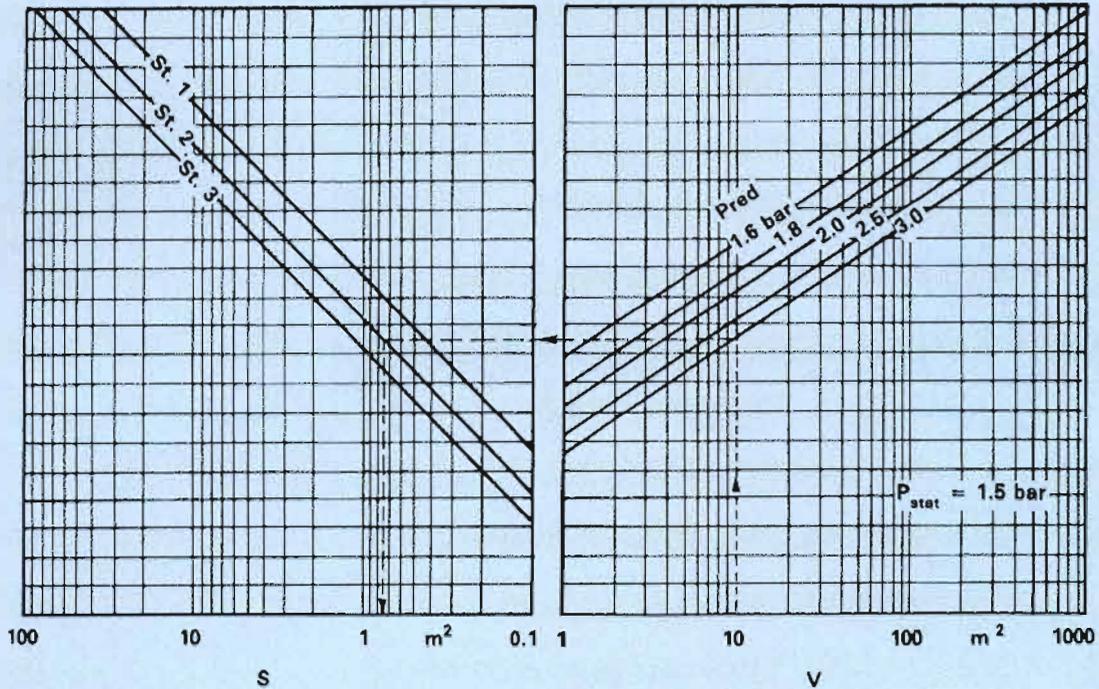


FIGURA 5



la presión con el tiempo en el caso de explosión, y se distinguen tres casos:

- A: corresponde a una explosión sin ventear, es decir, sin aplicar medidas de seguridad encaminadas a limitar los efectos de la explosión.
- B: representa el caso de una explosión en un recinto en el que se han instalado áreas de venteo demasiado pequeñas, de manera que la presión de la explosión llega a superar la presión máxima soportada por el recinto. Pred.
- C: ésta es la situación que debe buscarse al acudir a este tipo de protección. Cuando se produce una explosión, los venteos actúan a una cierta presión, Pstat, impidiendo que la presión de la explosión alcanzada en el interior del recinto llegue a valores peligrosos.

La ley cúbica, antes mencionada, se puede aplicar para el cálculo de las áreas de descompresión o venteo necesarias en caso de explosión siempre que el fenómeno se desarrolle como una deflagración, pero no es aplicable en el caso de detonación, es decir, cuando la llama viaja asociada al fren-

El LOM dispone de infraestructura para la caracterización de polvos inflamables de diferente naturaleza.

te de presión a velocidades del orden de 2.000 m/s.

Si S representa el área de venteo necesaria y V el volumen del recinto a descomprimir, a la relación $S/V = F$ se la denomina relación de venteo.

Sea F_1 la relación de venteo obtenida en un ensayo en un aparato de volumen V_1 y sean F_2 y V_2 la relación de venteo y el volumen, respectivamente, del recinto que se quiere proteger. La ecuación que la relaciona es:

$$F_1 \times V_1^{1/3} = F_2 \times V_2^{1/3}$$

Por tanto

$$S_1/V_1 \times V_1^{1/3} = S_2/V_2 \times V_2^{1/3}$$

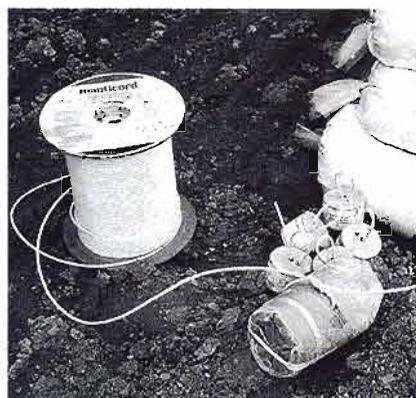
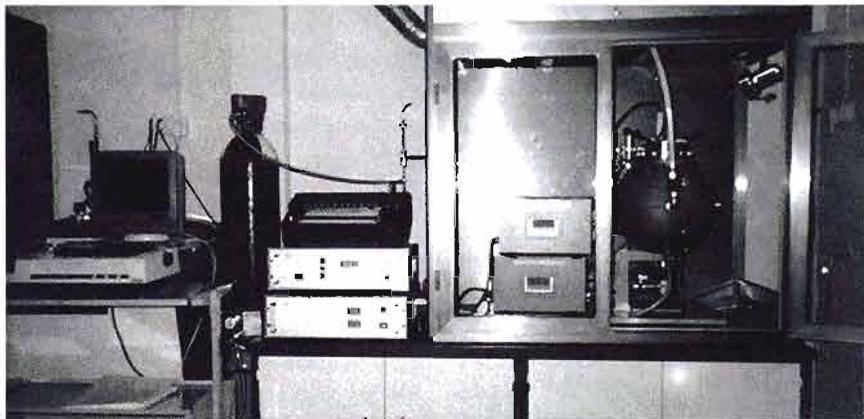
Es decir

$$S_2 = S_1 \times \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{2/3}$$

De esta forma se puede calcular el área requerida en función del área determinada en ensayos de laboratorio.

La elección del área de venteo necesaria se simplifica mediante el uso de curvas o nomogramas. Para su empleo debe conocerse el valor de la constante característica, Kst, del polvo combustible, el volumen del recinto, la má-

La ley cúbica se puede aplicar para el cálculo de áreas de descompresión o venteo.



zas para colaborar en el establecimiento de unas directrices y unas normas que minimicen el riesgo de explosiones de polvo. Nuestro trabajo está encaminado a ello y esperamos obtener resultados positivos antes de lamentar nuevos accidentes. ■

BIBLIOGRAFIA

- (1) FIELD, P. *Explosibility assessment of industrial powders and dusts*. Fire Research Station, 1983
- (2) BAKER, W. E., et al. *Explosion hazards and evaluation*. Ed. Elsevier, New York, 1983
- (3) Building Research Advisory Service. *Technical Information. Dust Explosions*. 1982
- (4) CYBULSKY, W. *Coal dust explosions and their suppression*. Ed. National Science Foundation, Washington, 1975.
- (5) PALMER, K. N. *Dust explosions and fires*. Ed. Capman and Hall. London, 1973.
- (6) FIELD, P. *Dust explosion*. Ed. Elsevier, Amsterdam, 1981.
- (7) RICHMOND, J. K. et al. *Historical summary of coalmine explosions in the United States*. U.S. Bureau of Mines, IC 9809, 1983.
- (8) HALL, L. J. *Insurance Industry views, International Symposium on Grain Elevator Explosions*, Washington DC, 1978.
- (9) VAN LAAR, G. F. M. *Dust explosions*. Newsletter, Dec. 1986.
- (10) ALCANTARA PEDREIRA, A.; GONZALEZ GALLEGU, C.; GARCIA TORRENT, J. «Explosiones de polvo.» *Industria Minera*. Agosto-septiembre, 1986.
- (11) Servicio Social de Higiene y Seguridad del Trabajo. *Polvos Combustibles*.
- (12) GARCIA TORRENT, J. «Índices de explosividad.» *Industria Minera*, enero, 1987.
- (13) GARCIA TORRENT, J.; CAMARA RASCON, A. BARQUERO TENLLADO, J. «Protección contra las explosiones secundarias de polvo de carbón.» *Canteras y Explotaciones*, septiembre, 1986.
- (14) GARCIA TORRENT, J.; CAMARA RASCON, A. «Diseño de áreas de descompresión para explosiones de polvo.» *Química e Industria* (en imprenta).
- (15) LABORATORIO OFICIAL J. M. MADARIAGA. *Ensayos e investigación de materiales y equipos para atmósferas explosivas y minería*. (Orden de Presidencia del Gobierno de 27 de noviembre de 1979. B.O.E. de 30 de noviembre de 1979.)

xima presión soportable por él, P_{red} , y la presión a la que actúa la protección, P_{stat} . En la figura 4 se muestra un ejemplo de tales curvas.

Aunque éste es el método más habitual para determinar áreas de venteo, no es el único. En ocasiones pueden emplearse otros, como son el método de la relación de venteo, basado en valores obtenidos experimentalmente con recintos de ensayo de volumen reducido; el método teórico de Rust, basado en la ecuación hallada por éste, o el método de Runes, que se basa también en una ecuación determinada teóricamente y corregida y comprobada de forma empírica.

LA SITUACION ACTUAL

En distintos países se está investigando sobre diversos aspectos de las explosiones de polvo y son varios los laboratorios o institutos dedicados a la evaluación de tales parámetros de explosividad para diferentes tipos de polvos combustibles. Existen, asimismo, comisiones internacionales en las que se reúnen expertos de los diversos países para discutir las posibles mejoras en los métodos de evaluación de la ex-

plosividad, así como para confeccionar normas de seguridad aplicables en una amplia gama de campos de trabajo.

El Laboratorio Oficial Madariaga (LOM), creado por O.M. de 27 de noviembre de 1979 (15), goza de reconocimiento internacional. Tiene las misiones específicas de realizar «... estudios y ensayos necesarios para las certificaciones previas a la homologación de los equipos nacionales o extranjeros destinados a ambientes explosivos...», así como «... ensayos, pruebas...», en cuanto a equipos en ambientes explosivos o equipos que puedan generar riesgos de carácter eléctrico, relacionados con equipos de electrificación en ambientes explosivos».

Actualmente, el LOM dispone de una infraestructura humana y material que permite la caracterización de polvos inflamables de diferente naturaleza, primera tarea a realizar antes de adoptar medidas de seguridad.

Sin embargo, el problema de las explosiones de polvo no termina con la identificación de los riesgos. En efecto, la legislación actual no es lo suficientemente clara ni completa como para solucionar los posibles casos que se puedan presentar. Es preciso que se unifiquen criterios y se aúnen las fuer-