

Las explosiones de polvo en los silos agrícolas (*)



JAVIER FERNÁNDEZ GARCÍA

Ingeniero Agrónomo. Dr. en Tecnologías Agrarias E.S.T.I. Agraria. Universidad de León

PEDRO JOSÉ AGUADO RODRÍGUEZ-FRANCISCO AYUGA TÉLLEZ

Dres. Ingenieros Agrónomos E.T.S.I. Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid

SUMARIO

Los productos almacenados en silos agrícolas habitualmente generan polvo, el cual en determinadas condiciones puede ser causa de explosión. En el caso de que ésta se produzca, los accidentes suelen ser extremadamente graves, con grandes pérdidas materiales y de vidas humanas. Sin embargo, actualmente es un fenómeno poco conocido y con un desarrollo normativo insuficiente, ésta es la causa de que sea materia de actualidad en la investigación sobre silos. En el presente artículo, los autores pretenden presentar una visión actualizada del conocimiento de las causas y el comportamiento de las explosiones, así como de las posibles medidas de prevención y protección de las mismas, incidiendo en el propio diseño de los silos agrícolas.

Palabras clave: Silos agrícolas, explosiones de polvo, índices de explosividad, fuentes de ignición, seguridad, paneles de venteo de deflagración.

INTRODUCCIÓN

Contrariamente a lo que se pueda pensar, el polvo de los materiales combustibles, cuando alcanza un tamaño y concentración determinados, puede ser explosivo. Incluso a pesar de que el polvo, a diferencia del gas, tiende a sedimentarse, no por ello deja de ser peligroso, ya que cualquier causa puede ponerlo en suspensión. Éste es el caso de los productos habitualmente almacenados en los silos agrícolas.

Una explosión de polvo es el resultado de la combustión extremadamente rápida de partículas combustibles puestas en suspensión, con capacidad para propagarse a través de esa mezcla de aire y partículas. Sus efectos son mecánicos (aumento de presión), térmicos (aumento de temperatura) y de producción de humos asfixiantes (consumo de oxígeno). Generalmente, en primer lugar se produce una ex-

(*) Este artículo es el resumen del trabajo presentado a la Fundación MAPFRE como resultado final de la investigación desarrollada durante el año 2000 a raíz de una beca concedida en la convocatoria Fundación MAPFRE-Universidad de León del curso 1999-2000.

plosión primaria, generada por una pequeña nube de polvo, la cual provoca ondas de presión que aumentan la turbulencia del ambiente. Esto favorece que el polvo, habitualmente depositado en ciertas zonas de estas instalaciones, pase a la atmósfera en forma de suspensión, produciéndose una segunda explosión, llamada explosión secundaria, que genera a su vez explosiones en cadena, liberando gran cantidad de energía y causando daños catastróficos.

La primera explosión de polvo que se tiene documentada ocurrió en diciembre de 1784 en Turín (Italia) en una fábrica de harina, siendo la fuente de ignición una lámpara encendida. Desde entonces muchos son los accidentes por explosiones de los que se ha tenido noticia, persistiendo dichos accidentes en nuestros días. Como consecuencia, numerosos equipos de investigadores e ingenieros han trabajado tratando de aportar soluciones para minimizar estos riesgos.

En 1896 se creó en Estados Unidos The National Fire Protection Association (NFPA) con el fin de promover y estudiar los métodos de protección contra incendios y explosiones. En Europa conviene destacar los estudios del profesor Josef Eibl, de la Universidad de Karlsruhe (Alemania), con el cálculo de paneles de venteo de deflagración. En España, uno de los primeros en estudiar el fenómeno de las explosiones de polvo fue Juan Ravanet († 1994). Posteriormente Javier García Torrent y Celestino González Gallego († 1997), del Área de Procesos de Sólidos del Laboratorio Oficial J. M. Madariaga, de Madrid, realizaron estudios importantes.

Dichos estudios han llevado a la elaboración de diversas normas. En la legislación española es de destacar el Real Decreto 400/1996, relativo a los aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas explosivas. Mientras que en la Unión Europea la más reciente directiva es la 1999/92/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a las disposiciones mínimas para la mejora de la protección y la salud de los trabajadores expuestos a riesgos de atmósferas explosivas.

ACCIDENTES PRODUCIDOS POR EXPLOSIONES

En Estados Unidos se han producido, en el período 1987-1997, una media de 13 explosiones al año, con un balance de 18 muertos, más de 115 heridos y 77 millones de dólares de pérdidas, según datos del profesor W. Schoeff, de la Universidad de Kansas,



Explosión de silos de trigo en Blaye (Francia) el 20 de agosto de 1977. Fuente: Laboratorio Oficial J. M. Madariaga.

y el USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos) en Washington. En Europa, en el período desde 1970 a 1998, se han producido 15 explosiones de polvo, de las cuales cinco han sido en España: Lérida, Pozoblanco (Sevilla), Tarragona, Nogales (Palencia) y Fuentepelayo (Segovia). El balance final es de 58 muertos, con numerosos heridos y cuantiosas pérdidas materiales (Tabla 1). El más reciente ocurrido en Europa es el de Blaye, en Francia, en 1997, donde la explosión de una de las dos torres de hormigón de 40 metros de altura, con 21 silos de trigo cada una de ellas,

provocó el hundimiento de la plataforma que soportaba las oficinas de la empresa propietaria. Murieron 13 personas y produjo cuantiosos daños materiales. Las causas de la tragedia se desconocen.

CARACTERIZACIÓN DE SUSTANCIAS

Parámetros de explosividad

Las normas donde se describen los ensayos son las UNE 22.330 a 22.338.

TABLA 1. Accidentes producidos por explosiones de polvo.

Año	Lugar	Industria	Muertos
1977	Lousiana (Estados Unidos)	Silo de grano	36
1977	Texas (Estados Unidos)	Silo de grano	18
1979	Lérida (España)	Silo de grano	10
1979	Bremen (Alemania)	Harinera	14
1980	Missouri (Estados Unidos)	Silo de grano	1
1981	Texas (Estados Unidos)	Silo de grano	9
1982	Tienen (Bélgica)	Azucarera	4
1982	Metz (Francia)	Silo de grano	12
1984	Pozoblanco (España)	Silo de pienso	0
1985	Bahía Blanca (Argentina)	Silo de grano	9
1993	Nogales (España)	Silo de pienso	1
1993	Fuentepelayo (España)	Silo de pienso	1
1997	Blaye (Francia)	Silo de grano	13
1998	Kansas (Estados Unidos)	Silo de grano	7

Fuente: Laboratorio Oficial J. M. Madariaga.



Explosión de silos de grano en Lousiana (Estados Unidos) el 22 de diciembre de 1977.
Fuente: Laboratorio Oficial J. M. Madariaga.

Temperatura mínima de inflamación (TMI)

Es la menor temperatura a la que se inicia el proceso de inflamación de una muestra de polvo. Se determina en un ensayo de laboratorio normalizado UNE 22.330 y UNE 22.334. Se puede realizar el ensayo con una muestra dispersada en forma de nube (TMI_n) o depositada en forma de capa (TMI_c).

Límites de inflamabilidad

Existe un intervalo de concentraciones de polvo en suspensión para el cual la mezcla aire-polvo es potencialmente explosiva. Experimentalmente sólo se mide el límite inferior o concentración mínima explosiva (CME). El método de ensayo (UNE 22.335) se realiza con el Tubo de Hartmann, que consta de un tubo de vidrio vertical de 500 mm de longitud y 64 mm de diámetro interior, en el que se produce una dispersión de la muestra de polvo, atravesando un dispositivo de ignición que puede ser una bobina de alambre o una chispa eléctrica entre dos electrodos. Cuando se observa la llama interior del tubo, se estima que se produce la explosión para una concentración teórica (obtenida al dividir la cantidad de muestra pesada por el volumen del tubo). El límite inferior o concentración mínima explosiva (CME).

Energía mínima de inflamación (EMI)

Es la menor energía eléctrica, obtenida por descarga capacitiva (descar-

ga eléctrica de la energía almacenada en un condensador), que es capaz de iniciar la ignición de una nube de polvo. El dispositivo de ensayo (UNE 22.336) es el Tubo de Hartmann con la ayuda de unos electrodos que generan una chispa. La energía se calcula mediante la expresión:

$$E = 1/2 CV^2$$

C = Capacidad de los condensadores en los circuitos de descarga.

V = Tensión aplicada.

El valor obtenido de energía mínima de inflamación (EMI) permite determinar si diferentes fuentes de ignición aportan, o no, la energía suficiente para producir la inflamación.

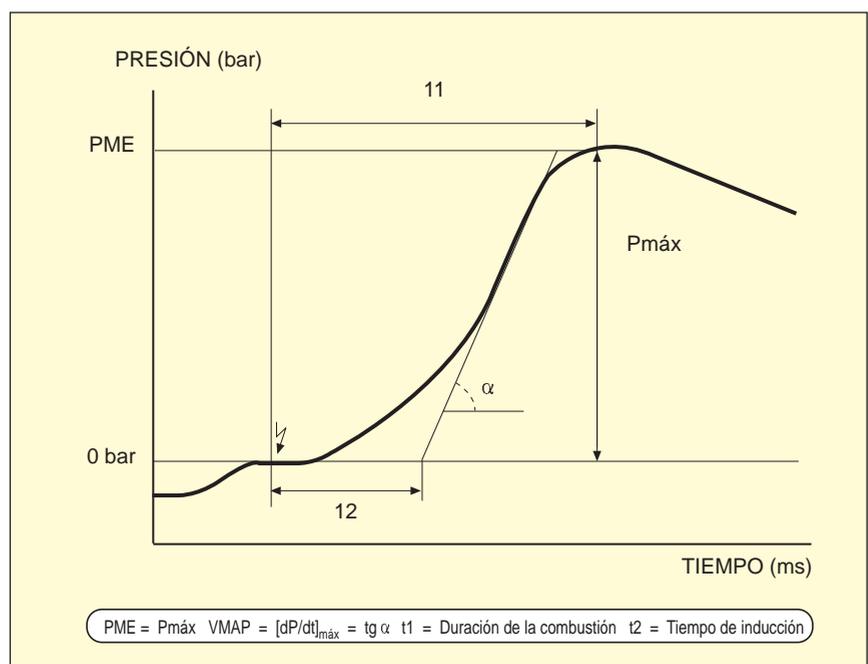
Presión de explosión y velocidad máxima de aumento de presión

Durante una explosión en un recinto cerrado, la presión varía según una curva (Figura 1), sobre la que se definen dos parámetros: PME y VMAP. PME (presión máxima de explosión) es el mayor valor de la presión registrada, es decir, corresponde al pico o punto más alto de la curva presión-tiempo. VMAP es la velocidad máxima de aumento de presión, que es la tangente máxima de la curva. Estos parámetros se determinan en la Bomba de Hartmann. Se trata de un aparato esférico de 20 litros de capacidad, que tiene una fuente de ignición en su centro geométrico y con un dispositivo de dispersión que asegura una correcta distribución del polvo en el interior de la cuba. Mientras que la PME es independiente del volumen, la VMAP depende en gran medida de él.

$$[dP / dt]_{max} V \times 1/3 = Kst$$

Siendo Kst una constante característica de cada tipo de polvo combustible.

FIGURA 1. Curva de la presión durante la explosión de polvo.



Fuente: Laboratorio Oficial J. M. Madariaga.

Concentración mínima de oxígeno

Es el menor contenido en oxígeno en la atmósfera necesario para que pueda tener lugar la explosión. Suele emplearse como parámetro en los casos en los que es posible reducir la proporción de oxígeno en el ambiente mediante la adición de gases inertes.

Sensibilidad a la inflamación

Los principales parámetros que caracterizan la sensibilidad a la ignición y severidad de la explosión de las muestras de polvo se muestran en la Tabla 2.

TABLA 2. Sensibilidad a la inflamación.

Muestra	TMIc (°C)	TMI _n (°C)	CME (g/m ³)	EMI (mJ)	PME (kPa)	VMAP (kPa m/s)
Polvo depositado	290	440	25	120	780	37.800
Harina, cuartas, salvado	N.I.	420	100	1.800	680	15.000
Residuo limpia trigo	290	440	30	1.000	720	26.300
Colza	N.I.	460	150	2.000	670	14.500
Polvo junto molino	300	540	460	N.I.	700	20.000
Polvo del suelo	290	510	120	N.I.	710	21.300
Pienso avícola 8,2% grasa	N.I.	420	180	2.100	590	6.000
Polvo depositado mezcla	290	490	90	450	710	22.5000

N.I.: No se produce ignición.

Fuente: Laboratorio Oficial J. M. Madariaga.

Índice de explosividad

El sistema de evaluación de riesgos de explosiones más utilizado es el método empírico introducido por el U. S. Bureau of Mines. Esta basado en el índice de explosividad, dicho índice se calcula mediante las siguientes expresiones:

Índice de explosividad = Sensibilidad a la ignición × Gravedad explosiva

$$\text{Sensibilidad a la ignición} = \frac{(TMI) (CME) (EMI) (\text{Carbón de Pittsburg})}{(TMI) (CME) (EMI) (\text{Polvo a investigar})}$$

$$\text{Gravedad explosiva} = \frac{(PME) (VMAP) (\text{Polvo a investigar})}{(PME) (VMAP) (\text{Polvo a investigar})}$$

TMI = Temperatura mínima de inflamación °C.

CME = Concentración mínima explosiva en kg/m³.

EMI = Energía mínima de inflamación (Julios).

PME = Presión máxima de explosión (kPa).

VMAP = Velocidad máxima de aumento de presión (kPa m/s).

En las Tablas 3 y 4 se muestran valores orientativos del índice de explosividad.

FUENTES DE IGNICIÓN Y LOCALIZACIÓN DE LA EXPLOSIÓN

Para que produzca una explosión, además de requerir unas características determinadas de las partículas en suspensión y una determinada concentración de oxígeno, es necesario que exista una fuente de ignición. Dichas condiciones se pueden presentar en diversas partes de las instala-

TABLA 3. Índice de explosividad.

Naturaleza del polvo	Índice de explosividad (Adimensional)
Almidón de trigo	35,00
Almidón de patata	20,90
Almidón de maíz	10,60
Azúcar en polvo	9,60
Polvo de granos	9,20

Fuente: Laboratorio Oficial J. M. Madariaga.

TABLA 4. Riesgo de explosión.

Índice de explosividad	Riesgo de explosión
< 0,10	Débil
0,10 a 1,00	Moderado
1,00 a 10,00	Fuerte
> 10,00	Muy fuerte

Fuente: Laboratorio Oficial J. M. Madariaga.

laciones agrarias y en particular en los silos.

Fuentes de ignición

Las fuentes de ignición son muy diversas:

- Calor procedente de chispas mecánicas y de fricción.
- Equipos electrónicos.
- Electricidad estática.
- Herramientas alimentadas por baterías.
- Llamas abiertas y chispas (operaciones de corte y soldadura).

- Superficies calientes (motores).

Es de destacar (Tabla 5) que, según datos de Estados Unidos en el 41,2 por ciento de las instalaciones la fuente de ignición es desconocida por borrar la explosión todas las pruebas.

Localización de las explosiones

En cuanto a la localización de la explosión de polvo, pueden ocurrir en cualquier parte de un proceso donde se manejen polvos: moliendas, secado, transporte, almacenamiento en silos. El riesgo aumenta, ya que existe una tendencia actualmente de ir a silos más grandes, en los que la producción de polvo es mayor. En la Tabla 6 se puede observar que la zona donde se ha detectado mayor número de explosiones es el elevador de cangilones, con un 23,2 por ciento de las instalaciones estudiadas, situado generalmente junto a los silos, y en tercer lugar, el depósito en contenedores.

SISTEMAS DE PREVENCIÓN

La Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, y el Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención, inciden en la obligación de los empresarios de adoptar las medidas necesarias para que sus trabajadores reciban la información e instrucciones adecuadas en relación con los riesgos existentes, de ahí la importancia de la evaluación de riesgos.

La prevención debe actuar en tres fuentes: fuentes de polvo, fuentes de ignición y seguridad de equipos y materiales.

- Dentro de las fuentes de polvo:

TABLA 5. Fuentes de ignición.

Fuente de ignición	N.º	%
Desconocida	103	41,2
Soldadura	43	17,2
Avería eléctrica	10	4,0
Trozos de metal desprendido	10	4,0
Fuego distinto a soldadura	10	4,0
Objetos extraños	9	3,6
Rozamiento con transportador	8	3,2
Recalentamiento con rodamientos	7	2,8
Chispas por rodamiento	7	2,8
Otras chispas	7	2,8
Rayos	6	2,4
Otros	30	12

Fuente: Prof. Robert W. (Kansas State University).

TABLA 6. Localización de explosiones.

Localización	N.º	%
Desconocida	107	42,8
Elevador de cangilones	58	23,2
Molino de mazas	17	6,8
Depósito contenedores	13	5,2
Cuarto de control	9	3,6
Molino de pienso auxiliar	8	3,2
Otros	28	9,6

Fuente: Prof. Robert W. (Kansas State University).

- Mediante la limpieza, evitando la acumulación de polvo, especialmente en posible fuentes de ignición, como son las superficies calientes (motores) o las proximidades del elevador de cangilones. La limpieza se realizará tratando de evitar la formación de nubes de polvo, debiendo adoptar precauciones en caso de usar soplado, siendo preferible la aspiración.

- Dentro de las fuentes de ignición:
 - Prohibiendo fumar.
 - Avisando de inmediato ante cualquier fuego.
 - Evitando la caída de objetos que puedan generar chispas.
- En cuanto a seguridad de equipos y materiales:
 - Siguiendo procedimientos de seguridad de las máquinas con las hojas de control.
 - Prohibiendo operaciones en caliente (soldadura, corte, pulido, etc.).

- Utilizando equipos eléctricos aprobados por el supervisor de la instalación.

Por otra parte, deberán existir protocolos de limpieza, de trabajos de mantenimiento (soldadura y corte) y de emergencia, donde se indique las medidas de seguridad a tomar, debiendo ser previamente aprobadas cada una de estas operaciones por el encargado responsable.

En cuanto al marcado, en la Directiva 94/9/CE se contemplan los aspectos de diseño y construcción de aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas explosivas. El marcado, según esta Directiva, consistirá en el símbolo CE. El marcado se complementa con la marca distintiva del material para atmósfera explosiva (ϵ_x), seguido de la indicación del grupo (según el tipo de instalación, grupo I para minería, y grupo II para el resto), la categoría (establecida en función de las zonas de ubicación de los aparatos y sus niveles de protección, M1 o M2 para el grupo I, y 1, 2 ó 3 para el grupo II) y la indicación relativa a combustible («G» para gases, y «D» para polvo). Por ejemplo, en el caso de un motor de un elevador de cangilones de un silo para almacenamiento de trigo tendremos ϵ_x II 1 D.

En cuanto a la clasificación de zonas de riesgo en atmósferas explosivas, se encuentra el Proyecto de Norma Europea IEC 1241, sobre materiales eléctricos destinados a ser utilizados en presencia de polvos combustibles, en su Parte 3, en la cual se establecen las siguientes zonas:



Motor cubierto de polvo de azúcar en el interior de un silo en una industria azucarera.

– **Zona 20:** Es un área en la cual el polvo combustible, en forma de nube, puede aparecer durante el funcionamiento normal, en cantidad suficiente para ser capaz de producir una concentración explosiva de mezcla de polvo combustible con aire, y/o donde se forman capas de polvo que tiene un grosor excesivo o incontrolable. *Ejemplo: un contenedor de polvo, interior de los equipos, etc.*

– **Zona 21:** Es un área en el cual el polvo combustible, en forma de nube, puede aparecer durante el funcionamiento normal, en cantidades suficientemente grandes como para poder ser capaz de producir una concentración explosiva de mezcla de polvo combustible y aire. *Ejemplo: zonas vecinas a los puntos de llenado o vaciado de polvos y áreas donde existan capas de polvo.*

– **Zona 22:** Es un área en la que las nubes de polvo combustible se dan infrecuentemente y persisten sólo durante un corto período de tiempo o en la cual las acumulaciones o capas de polvo combustible podrían estar presentes sólo bajo condiciones anormales, dando lugar a mezclas de polvo combustibles y aire. *Ejemplo: las zonas de cercanías de equipos que contengan polvo, en los que el polvo pueda salirse y formar depósitos (cuartos de molienda).*

Los aparatos, según su categoría, estarán destinados a una u otra zona, así los de categoría 1 corresponden a la zona 20; los de la categoría 2, a la zona 21, y los de la categoría 3, a la zona 22.

En cuanto a la señalización de zonas con riesgo de atmósferas explosivas, se indica en la Directiva 99/92/CEE, en su Anexo III. En dicha Directiva se establece que en estas zonas se dispondrá de una señal triangular, con letras negras sobre fondo amarillo (representado el color amarillo, como mínimo, el 50 por ciento de la superficie de la señal) y bordes negros (Fig. 2).

En la Figura 3 se representa la señalización de materias explosivas, según Real Decreto 485/1997, sobre disposiciones mínimas de seguridad en materias de señalización de seguridad y salud en el trabajo.

SISTEMAS DE PROTECCIÓN

Los métodos más comunes utilizados para la protección contra explosiones son los siguientes:

FIGURA 2. Señalización de zonas con riesgo de atmósferas explosivas según la Directiva 99/92/CEE. Anexo III.



Contención

La base de este método de protección es diseñar el proceso para soportar la presión máxima de deflagración. Tiene como inconveniente la tendencia actual de ir a instalaciones más grandes, con lo que encarecería su elevado coste inicial.

Inertización

La protección se proporciona mediante un descenso de la concentra-

FIGURA 3. Señalización de materias explosivas según Real Decreto 485/1997 sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo. Anexo III.

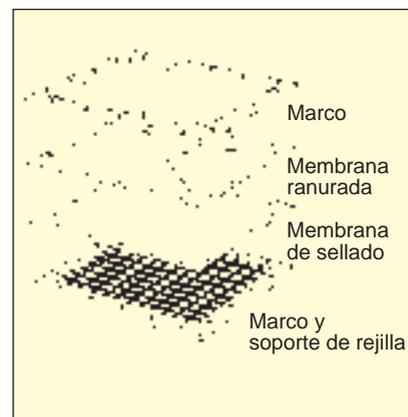


ción de oxígeno en un volumen cerrado por debajo del nivel requerido para la combustión utilizando gases que sustituyen al oxígeno del aire. Como desventajas presenta el coste creciente del gas inerte (normalmente CO₂ y nitrógeno), posible riesgo de asfixia del personal y su elevado mantenimiento.

Venteo de deflagración

Este método consiste en colocar paneles o puertas (cierres de venteo) (Fig. 4) para liberar los gases calientes en expansión de una deflagración procedentes del interior de un componente o local de proceso. Estos cierres se abren cuando se supera una presión determinada, permitiendo que la deflagración escape, reduciendo así la presión que se produce en el interior a niveles que no dañen el espacio a proteger. En la Figura 5 se puede apreciar la secuencia de una rotura de un panel de venteo por una explosión. *Panel de venteo de deflagración*

FIGURA 4. Esquema de un panel de venteo.



Fuente: NFPA 654.

Consiste en un panel plano o ligeramente abombado que se encuentra atornillado o sujeto de otra forma a una abertura sobre el componente del proceso a proteger.

Boca de venteo de deflagración

Consiste en una puerta abisagrada, montada sobre el componente del proceso a proteger. Está diseñada para abrirse a una presión predeterminada que se controla por un cierre especial. Tiene menor eficacia que el panel de venteo.

Supresión de deflagración

Consiste en un sistema que detecta, mediante un sensor de presión, y extingue, mediante extintores de gran velocidad de descarga, una deflagración antes de que se cree una presión destructiva.

Aislamiento de deflagración

Aislamiento mecánico

El aislamiento de deflagración puede conseguirse mediante válvulas rotativas de cierre de aire de construcción adecuada. Un ejemplo de su uso es la descarga de las tolvas del colector de polvo (Fig. 6).

Aislamiento químico

Se consigue mediante la descarga rápida de un agente químico extintor en la tubería o conducto interconectado (Fig. 7).

Deflectores de frente de llama

Esta protección consiste en instalar unos deflectores que desvíen las llamas de la deflagración dirigiéndolas a la atmósfera.

Separador neumático y magnético

Para la eliminación de partículas que se desea que no entren en el proceso productivo por su peligrosidad, tenemos el separador neumático y magnético (Fig. 8), este último recoge las partículas metálicas que pueden ser generadoras de una fuente de ignición (chispas).

CÁLCULO DE LOS PANELES DE VENDEO EN SILOS

El procedimiento de cálculo expuesto a continuación fue propuesto por el profesor de la Universidad de Karlsruhe (Alemania) Josef Eibl.

Organigramas

A continuación se describe el proceso de cálculo, con las siguientes organigramas (Figs. 9 y 10) y con la utilización de las siguientes fórmulas (ecuaciones):

$$K_p = V^{0,767} K_{st} / A \quad [1]$$

$$k_m = (mp)^{1/2} \times K^{5/4}_{ST} / n^{1/4} \times V^{0,041} \quad [2]$$

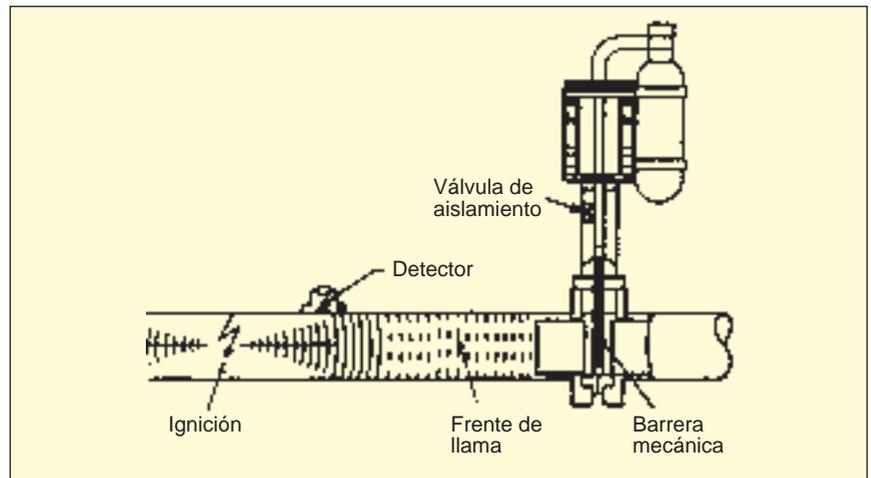
$$k_v = A^V_E \times m_p / V \times (p_{red})^{1/2} \quad [3]$$

FIGURA 5. Panel de venteo de deflagración durante una explosión.



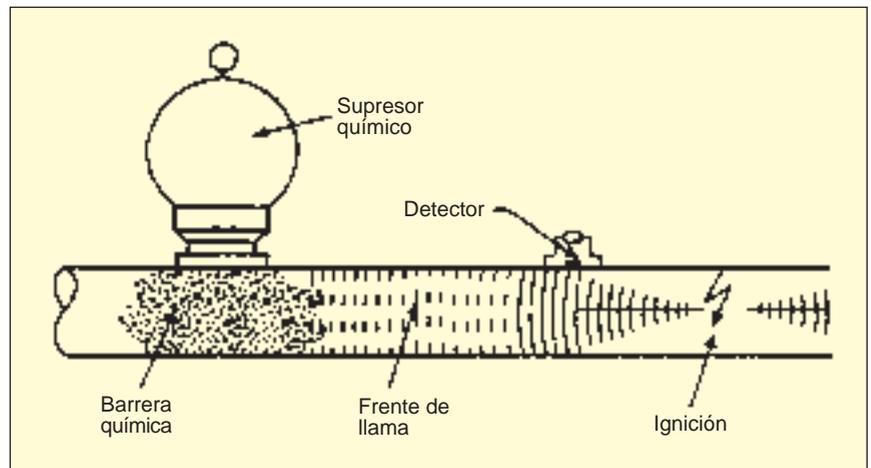
Fuente: Fike Ibérica.

FIGURA 6. Esquema de un aislamiento mecánico.



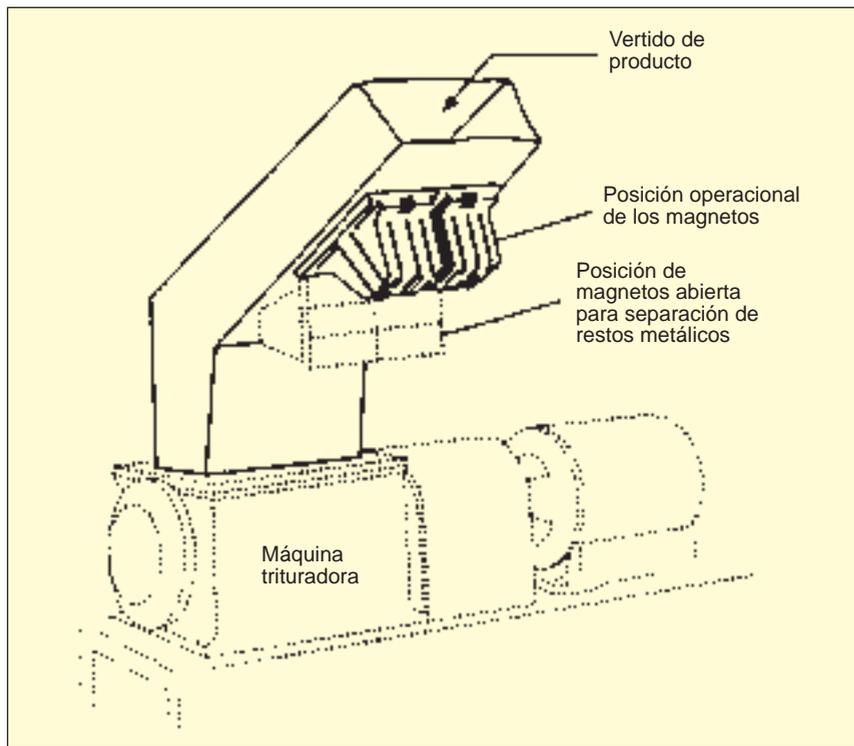
Fuente: NFPA 654.

FIGURA 7. Esquema de un aislamiento químico.



Fuente: NFPA 654.

FIGURA 8. Esquema de un separador magnético.



Los paneles de venteo de deflagración son un sistema de protección muy eficaz contra estos devastadores accidentes, permitiendo reducir la presión de diseño de los silos para resistir la elevada presión de la explosión.

Fuente: NFPA 654.

$$k_w = \omega \times (A^v_E)^{3/2} m_p / V \times (\text{pred})^{1/2} \times n^{1/2} \quad [4]$$

$$m_p = \rho \times t \quad [5]$$

Para la obtención de f necesitamos utilizar el monograma (Fig. 11) con curvas de presión de diseño y el valor calculado de K_m [ecuación 2].

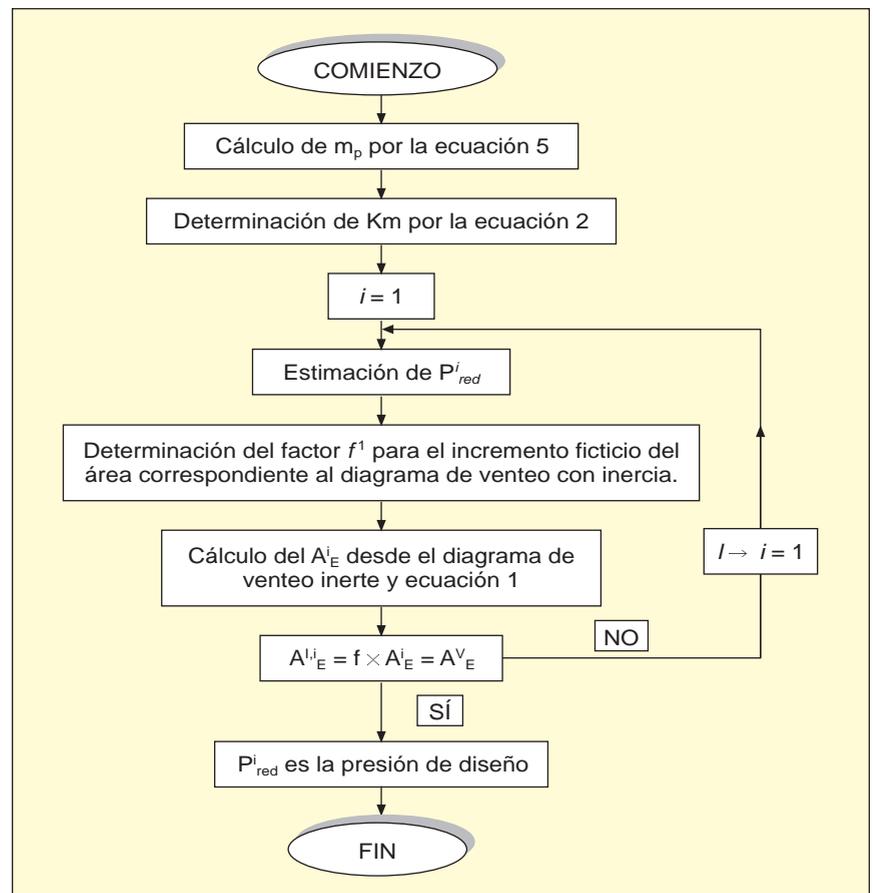
$$A^T_E = f \times A_E \quad [6]$$

$$F_R = 15 \times A^i_E \times P_{red} \quad [7]$$

Símbolos

- H = Altura de silo (m).
- D = Diámetro del silo (m).
- K_{ST} = Valor característico del polvo (kPa m/s).
- P_{red} = Presión de diseño (reducida la presión de la explosión por el venteo).
- V = Volumen del silo (m³).
- A = Área equivalente a A^v_E o igual a A_E cuando uso la figura del área del venteo por alivio no inerte (m²).
- A_E = Área total de venteo abierto sin considerar los efectos de inercia (m²).
- A^T_E = Área total requerida para la abertura del venteo con consideración de las fuerzas de inercia (m²).
- A^v_E = Área total existente de abertura del venteo (m²).
- A^i_E = Área simple del área del venteo (m²).
- m_p = Área relativa de la masa del cierre de venteo (m²).

FIGURA 9. Cálculo de la presión de diseño para venteo inerte.



Fuente: BROWN, C. J., y NIELSEN: Silos. Fundamentals of theory, behaviour and design.

ρ = Densidad del cierre de venteo (kg/m^3).

n = Número de aberturas de venteo.

f = Factor de incremento del área de venteo en caso de relevancia de fuerzas de inercia.

v = Velocidad de cierre de venteo (m/s).

ω = Velocidad angular de explosión de los paneles (rad/s).

F_R = Suposición simplificada de la fuerza activa de retroceso en el medio de la abertura del panel de venteo (MN).

t = Promedio de espesor de elementos de cierre.

Suponiendo una distribución homogénea del polvo nos basamos en unas fórmulas de la norma alemana VDI 3676, que se corresponden con las siguientes fórmulas para el cálculo de A_E :

$$A_E = 3,264 \times 10^{-4} \times K^{st} V^{0,767} \times P^{red-0,569} \times K_{HD}$$

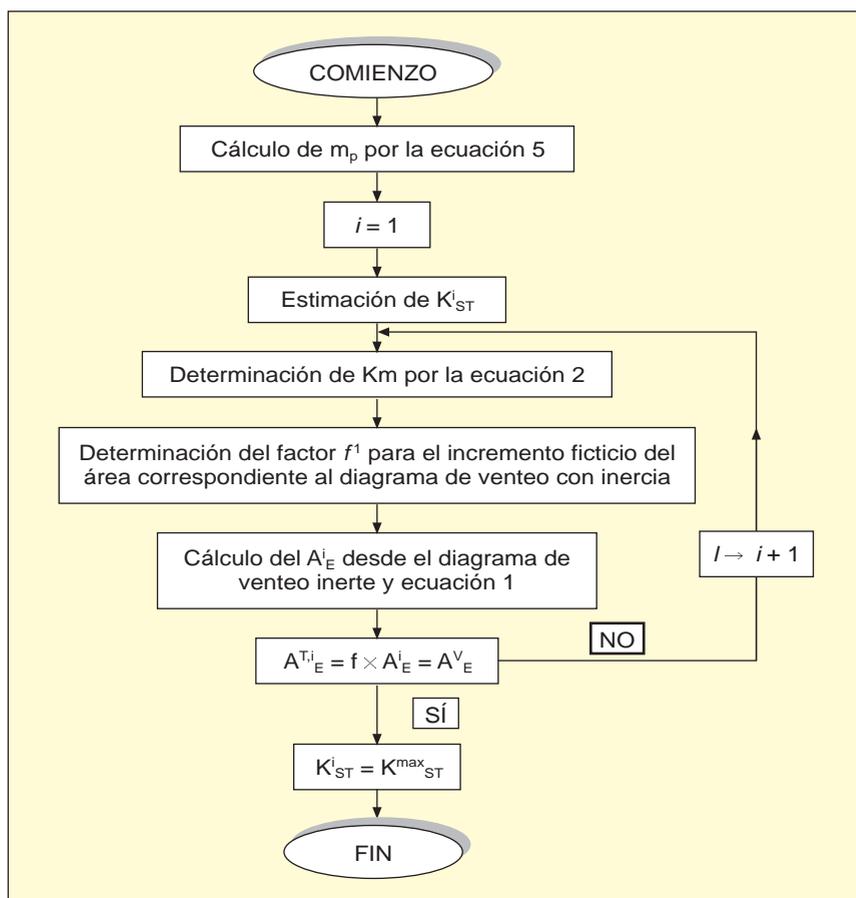
$$K_{HD} = 1 + \log_{10} (H/D) [0,758 - 4,305 \log_{10}(p^{red})]$$

$$20 kPa \leq p^{red} \leq 150 kPa \quad K_{HD} = 1$$

$$150 kPa \leq p^{red} \leq 200 kPa$$

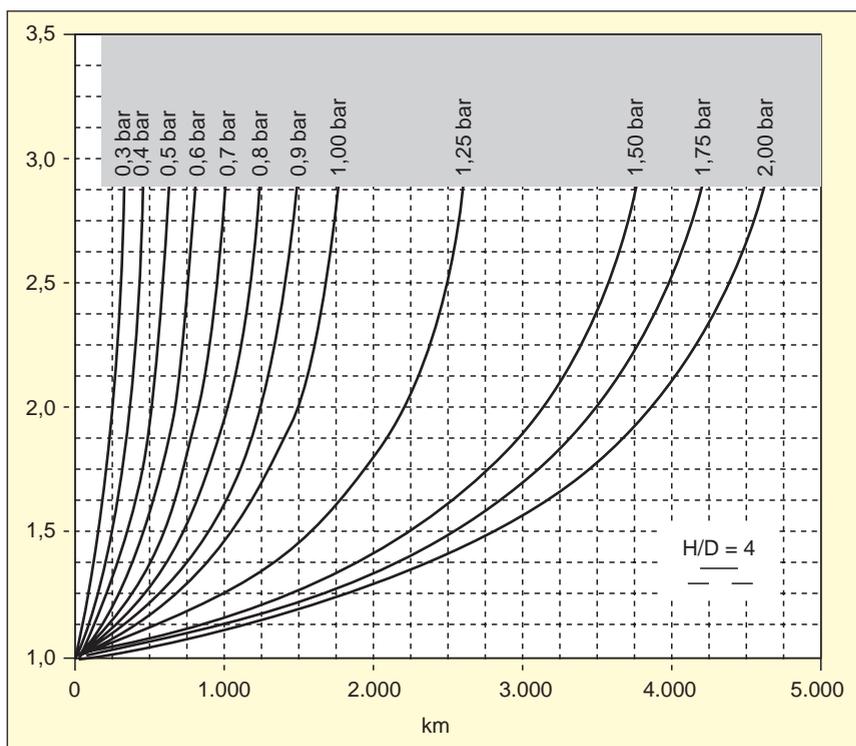
En el cálculo se pueden considerar varias hipótesis en función del nivel de llenado de los silos. La máxima presión (horizontal y vertical) durante la explosión en las paredes del silo se produce cuando éste se encuentra va-

FIGURA 10. Cálculo de $K_{ST}^i = K_{ST}^{max}$ para venteo inerte.



Fuente: BROWN, C. J., y NIELSEN: *Silos. Fundamentals of theory, behaviorur and design.*

FIGURA 11. Nomograma de cálculo de la f para venteo de área inerte.



Fuente: BROWN, C. J., y NIELSEN: *Silos. Fundamentals of theory, behaviorur and design.*

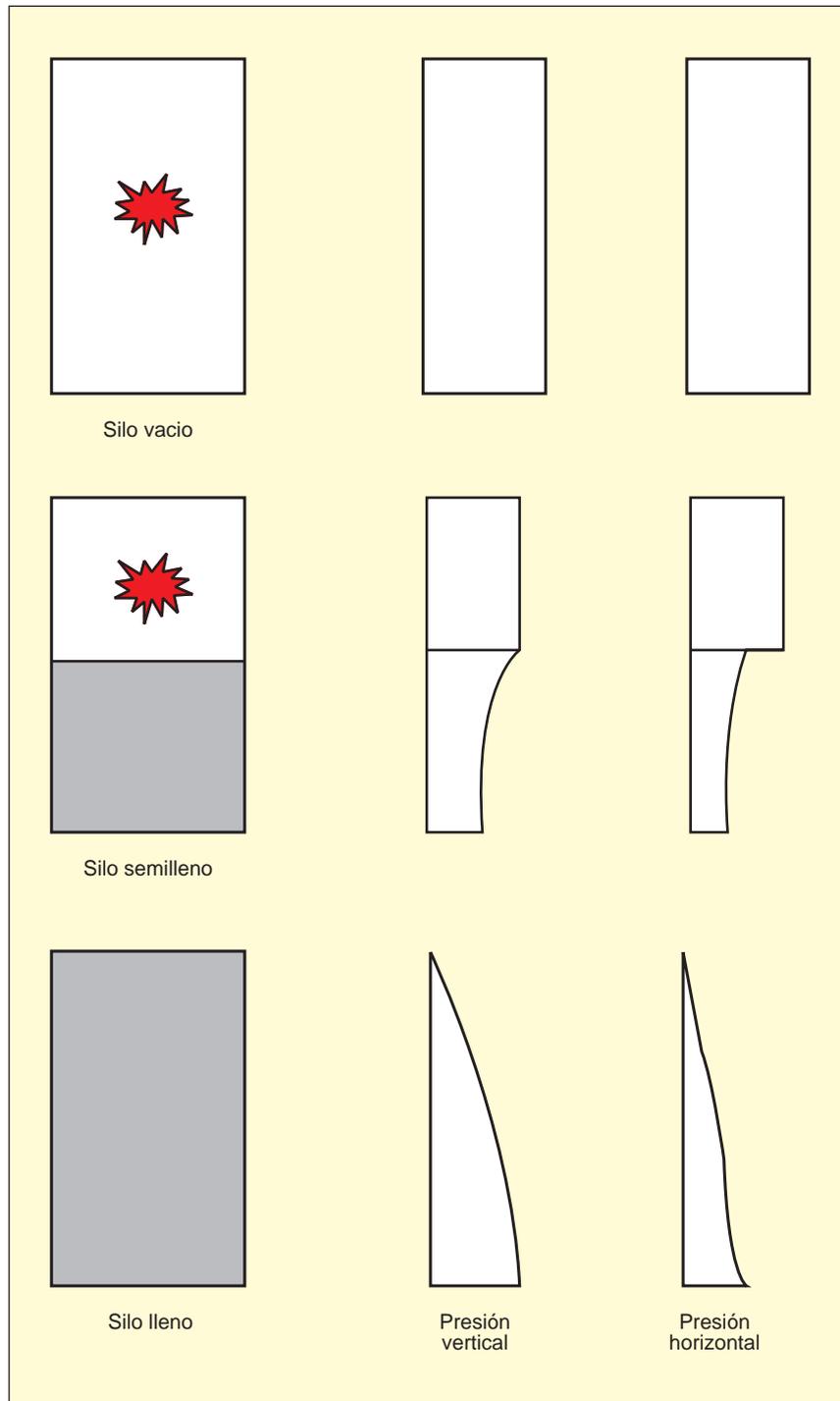
En cuanto a la localización de la explosión de polvo, pueden ocurrir en cualquier proceso donde se manejen polvos: molindas, secado, transporte, almacenamiento en silos. El riesgo aumenta, ya que existe una tendencia actualmente de ir a silos más grandes, en los que la producción de polvo es mayor.

cío. A medida que el silo tiene más cantidad de producto estas presiones disminuyen y parte del empuje sobre las paredes se sustituye por el del material almacenado. Cuando el silo está lleno no se produce explosión y las presiones que soporta el mismo son las causadas por el producto almacenado (Fig. 12).

CONCLUSIONES

- Las explosiones de polvo son accidentes muy peligrosos en las industrias agrarias y alimentarias donde se genera polvo, ya que éste en la mayoría de los casos es explosivo y puede alcanzar las condiciones necesarias para que se produzca una explosión.

FIGURA 12. Resultado de presiones en diferentes estados de carga del silo.



Fuente: BROWN, C. J., y NIELSEN: *Silos. Fundamentals of theory, behavior and design.*

- Las causas, comportamiento y formas de prevención y protección contra el riesgo son cada vez más conocidas gracias a las investigaciones desarrolladas por diversos autores. Esto permite poder plantear actualmente medidas de seguridad, tanto preventivas como de protección, y planes de emergencia para minimizar el riesgo. Todo ello, sin descuidar la formación de los trabajadores con objeto de hacerles comprender los riesgos existentes, muchas veces difíciles de detectar de forma intuitiva.

- Con el conocimiento de los parámetros de explosividad del producto a almacenar se puede evaluar el riesgo de explosión mediante el cálculo del índice de explosividad introducido por U. S. Bureau of Mines.

- Existe un elevado porcentaje de accidentes en los que se desconocen la fuente de ignición (41,2 por ciento) y las localizaciones de las explosiones (42,8 por ciento). Por lo que futuras investigaciones deben orientar sus esfuerzos en esta dirección.

- La industria debe utilizar protocolos para los trabajos de mantenimiento: limpieza y soldadura (la fuente de ignición que más explosiones provoca) para asegurar que éstos no aumenten el riesgo de explosión.

- Los equipos de trabajo (motores, elevador de cangilones, etc.) que deben utilizarse son los diseñados para trabajar en atmósferas explosivas y deben cumplir con el marcado CE.

- Se debe clasificar la industria según el Proyecto de Norma Europeo 1241-3 para evaluar el riesgo de explosión.

- Los paneles de venteo de deflagración son un sistema de protección muy eficaz contra estos devastadores accidentes, permitiendo reducir la presión de diseño de los silos para resistir la elevada presión de la explosión.

- El elevador de cangilones es el lugar donde más explosiones se producen, existiendo también una alta siniestralidad en los silos. Si bien en estos últimos los accidentes han sido mucho más graves, produciendo en la mayoría de los casos varias muertes.

LEGISLACIÓN

- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.

- Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención.

- Real Decreto 485/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de

El sistema de evaluación de riesgos de explosiones más utilizado es el método empírico introducido por el U. S. Bureau of Mines. Está basado en el índice de explosividad.

seguridad en materia de Señalización de Seguridad y Salud en el Trabajo.

– Real Decreto 400/1996, sobre aparatos y sistemas de protección para uso en Atmósferas Potencialmente Explosivas.

– Directivas 1999/92/CE, disposiciones mínimas para la mejora de la Protección de la Salud y la Seguridad de los Trabajadores Expuestos a los Riesgos Derivados de Atmósferas Explosivas.

– IEC 1241-3. Proyecto de norma internacional para los materiales eléctricos destinados a ser utilizados en presencia de Polvo Combustible.

– UNE-EN 26184-1:1993. Sistema de Protección contra Explosiones. Parte 1: Determinación de los índices de explosión de los polvos combustibles en el aire (ISO 6184-1:1985).

– UNE 22.330. Explosividad del Polvo de Carbón. Método de ensayo para la determinación de la temperatura mínima de ignición en capa.

– UNE 22.334. Explosividad del Polvo de Carbón. Método de ensayo para la determinación de la temperatura mínima de inflamación de nube.

– UNE 22.335. Explosividad del Polvo de Carbón. Método de ensayo para la determinación de la concentración mínima explosiva en el Tubo de Hartman.

– UNE 22.336. Explosividad del Polvo de Carbón. Método de ensayo para la determinación de la energía mínima de inflamación.

– UNE 22.337. Explosividad del Polvo de Carbón. Método de ensayo para la determinación de la presión y



Elevador de cangilones de una industria de grano.

la velocidad de aumento de presión en la Bomba de Hartmann.

BIBLIOGRAFÍA

BROWN, C. J., y NIELSEN (1998): *Silos. Fundamentals of theory, behaviour and design*, 1.º published. London: E & FN Spon, pp. 274-311.

CD-ROM (diciembre 1998): *Prevención de riesgos de incendio y explosión en la industria agroalimentaria*, (LOM), Laboratorio Oficial J. M. Madariaga, Madrid.

CORTÉS DÍAZ, J. M. (diciembre 1998): *Técnicas de prevención de riesgos laborales. Seguridad e higiene en el trabajo*, 3.ª ed., Madrid, Tébar, pp. 291-295.

–: *Ley de Prevención de riesgos laborales*, 1.ª ed., Madrid, Tébar, pp. 231.

GARCÍA VAQUERO, E., y AYUGA TÉLLEZ, F. (1993): *Diseño y construcción de indus-*

trias agroalimentarias, Madrid, Mundi Prensa, pp. 438.

EIB, J., y HAÜSSLER, U. (junio 1984): «Numerical Investigations un Decharging Silos», *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 110, núm. 6, pp. 957-971

NFPA 654 (1997): *Norma para la prevención de incendios y explosiones de polvo de la fabricación, procesado y manipulación de partículas sólidas combustibles*, Ed. Madrid, Cepreven, pp. 32.

RAVENET, J. (1992). *Silos*, Ed. Técnicos Asociados, S. A., Barcelona, pp. 276-296.

SAFARIAN, S., y HARRIS, E. (1985): *Desing and Construction of Silos and Bunkers*, Ed. New York, Van Nostrand Reinhold Company Inc, pp. 279-287.

TREX (junio 1998): *Transferencia a la industria de la normalización en el campo de la protección contra explosiones*, (LOM) Laboratorio Oficial J. M. Madariaga, Madrid.