

3ª edición
Julio 2026

LOS SOLIDOS DISGREGADOS

Combustión Espontánea
Explosión de Polvo



Material no apto para la venta.

Ing. Néstor Adolfo BOTTA



www.redproteger.com.ar

*"No penséis que yo voy a acusaros delante del Padre;
hay quien os acusa, Moisés,
en quien tenéis vuestra esperanza.
Porque si creyeseis a Moisés,
me creeríais a mí,
porque de mí escribió él.
Pero si no creéis a sus escritos,
¿cómo creeréis a mis palabras?"*

Juan 5:45-47



EL AUTOR

Néstor Adolfo BOTTA es Ingeniero Mecánico recibido en el año 1992 en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata; Ingeniero Laboral recibido en el año 1995 en la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional La Plata; Diplomado en Ergonomía recibido en el año 2018 en la Facultad de Química e Ingeniería del Rosario de la Pontificia Universidad Católica Argentina; y Diplomado en Sistemas Integrados de Gestión recibido en el año 2021 en la Universidad Nacional de Lomas de Zamora.

Estudiante de la Diplomatura en Teología en el Instituto Bíblico Río de La Plata desde el 2022.

Es el Titular de la empresa Red Proteger, empresa dedicada a la Capacitación y Divulgación de conocimientos en materia de seguridad e higiene en el trabajo (www.redproteger.com.ar).

Desarrolló funciones como Responsable de Higiene y Seguridad en el Trabajo en empresas como SOIME SRL, TRADIGRAIN ARGENTINA SA, AMANCO ARGENTINA SA, MOLINOS RÍO DE LA PLATA SA y SEVEL ARGENTINA SA.

Asesoró a diversas empresas entre las que se destacan AKZO NOBEL SA, CERVECERÍA Y MALTERÍA QUILMES SAICAYG y APACHE ENERGÍA ARGENTINA SRL.

Su extensa actividad docente lo ubica como:

- Profesor Titular en el Instituto Superior Federico Grote (Rosario – Santa Fe) para la Carrera de “Técnico Superior en Seguridad e Higiene en el Trabajo” para las asignaturas de Higiene y Seguridad en el Trabajo I, Seminario Profesional, Prevención y Control de Incendios II, y Prevención y Control de Incendios I.
- Profesor en la UCA de Ing. de Rosario para la Carrera de Posgrado de Higiene y Seguridad en el Trabajo en la asignatura de Riesgo y Protección de Incendios y Explosiones.
- Profesor Titular en la Universidad Nacional del Litoral para la Carrera de Técnico en Seguridad Contra Incendios en la asignatura de Seguridad Contra Incendios III. Sistema de educación a distancia.
- Profesor en la Universidad Nacional del Litoral - Sede Rosario, para la Carrera de Lic. en Seguridad y Salud Ocupacional en la asignatura de Práctica Profesional.
- Profesor Interino Cátedra “Elementos de Mecánica”. Carrera “Técnico Superior en Seguridad e Higiene en el Trabajo”. ISFD Nro. 12 La Plata – 1.996
- Ayudante Alumno Cátedra “Termodinámica”. Universidad Nacional de La Plata - Facultad de Ingeniería.
- Ayudante Alumno Cátedra “Análisis Matemático”. Universidad Nacional de La Plata - Facultad de Ciencia Económicas.

Datos de Contacto

e-mail: nestor.botta@redproteger.com.ar

ÍNDICE

- 1) Particularidades de los Combustibles Sólidos Disgregados
- 2) Influencia del Tamaño de las Partes Disgregadas
- 3) Combustibles Sólidos Disgregados No Pulverulentos
 - 3.1) Combustión Espontánea
 - 3.2) Factores que Regulan el Proceso
 - 3.3) Almacenamiento a Granel
 - 3.4) Movimiento de materiales en Silos y Celdas
 - 3.5) Almacenamiento en Envases
 - 3.6) Incendio en Graneles
 - 3.7) Incendio en el Almacenamiento el Pilas
 - 3.8) Incendio en el Almacenamiento en Silos
 - 3.9) ¿Por qué No Apagar con Agua?
 - 3.10) Técnica de Vaciado Rápido de Silos
 - 3.11) Incendio en el Almacenamiento en Celdas
 - 3.12) Incendio en el Almacenamiento de Envases
 - 3.13) Sistema de Ventilación
 - 3.14) Sistema de Control de Temperatura
- 4) Combustibles Sólidos Disgregados Pulverulentos
- 5) Incendio de Sólidos Disgregados Pulverulentos
 - 5.1) Desarrollo del Incendio
 - 5.2) Extinción del Incendio
- 6) Explosiones de Polvos
 - 6.1) Génesis de la Explosión de Polvo
 - 6.2) Factores que Influyen en las Explosiones de Polvo
 - 6.3) Poder de Destrucción de las Explosiones de Polvo
 - 6.4) Desarrollo de Medidas Preventivas
 - 6.5) Desarrollo de Medidas Protección

1) PARTICULARIDADES DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS DISGREGADOS¹

Muchos productos sólidos combustibles que intervienen en procesos industriales o forman parte de almacenamientos, se presentan disgregados o troceados en forma de granalla, astillas, grano, escamas, hilachas o polvos de diferentes tamaños de partículas.

Las características de la combustibilidad y el proceso completo de la combustión de estos sólidos están determinadas no sólo por la naturaleza química del producto y las condiciones del medio en que se encuentran (el estado higrométrico, por ejemplo) sino de modo muy particular, y con extraordinaria influencia en ciertos productos, por su estado de disgregación.

La importancia que el estado de disgregación confiere a muchos sólidos es tan grande que, por sí solo, puede determinar la combustibilidad o no de los mismos a una cierta temperatura (aluminio en polvo o aluminio en barras, por ejemplo) y, además, puede transformar el fenómeno de la combustión en una explosión).

En consecuencia, las características particulares de la combustión y el riesgo que el estado de disgregación puede ocasionar en muchos productos sólidos combustibles hacen preciso un tratamiento preventivo de los riesgos de incendio-explosión y una peculiar modalidad de lucha contra el posible incendio-explosión.

2) INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE LAS PARTES DISGREGADAS

El tamaño de las partes disgregadas puede determinar por sí solo un cambio en las condiciones en que se desarrollará la combustión, o, también la posibilidad de que se produzca una explosión, si se dan las condiciones precisas.

Por ello, es necesario distinguir, al menos, dos tipos de disgregación de los combustibles sólidos.

¹ Disgregado se refiere a todo aquello que ha sido separado, desunido o dispersado. El término proviene del latín *disgregare* (que originalmente significaba apartar o dispersar un rebaño).

Aunque no existe un criterio rígido para establecer una tipificación de los niveles de disgregación, se acepta que si la máxima dimensión de las partículas es de 0,5 mm se trata de un producto en estado pulverulento.

Cuando las partes del sólido sean mayores de tamaño se considerarán, según su forma y naturaleza, como granalla, astillas, gránulos, escamas, hilachas, virutas, o simplemente, trozos.

El tamaño de las partes disgregadas (sean polvos o no) influye en el inicio y desarrollo del incendio determinando que:

- **Productos disgregados pero no pulverulentos**

Variarán las condiciones iniciales y el desarrollo de su combustión (y del incendio), pero no se darán por ello condiciones para la explosión.

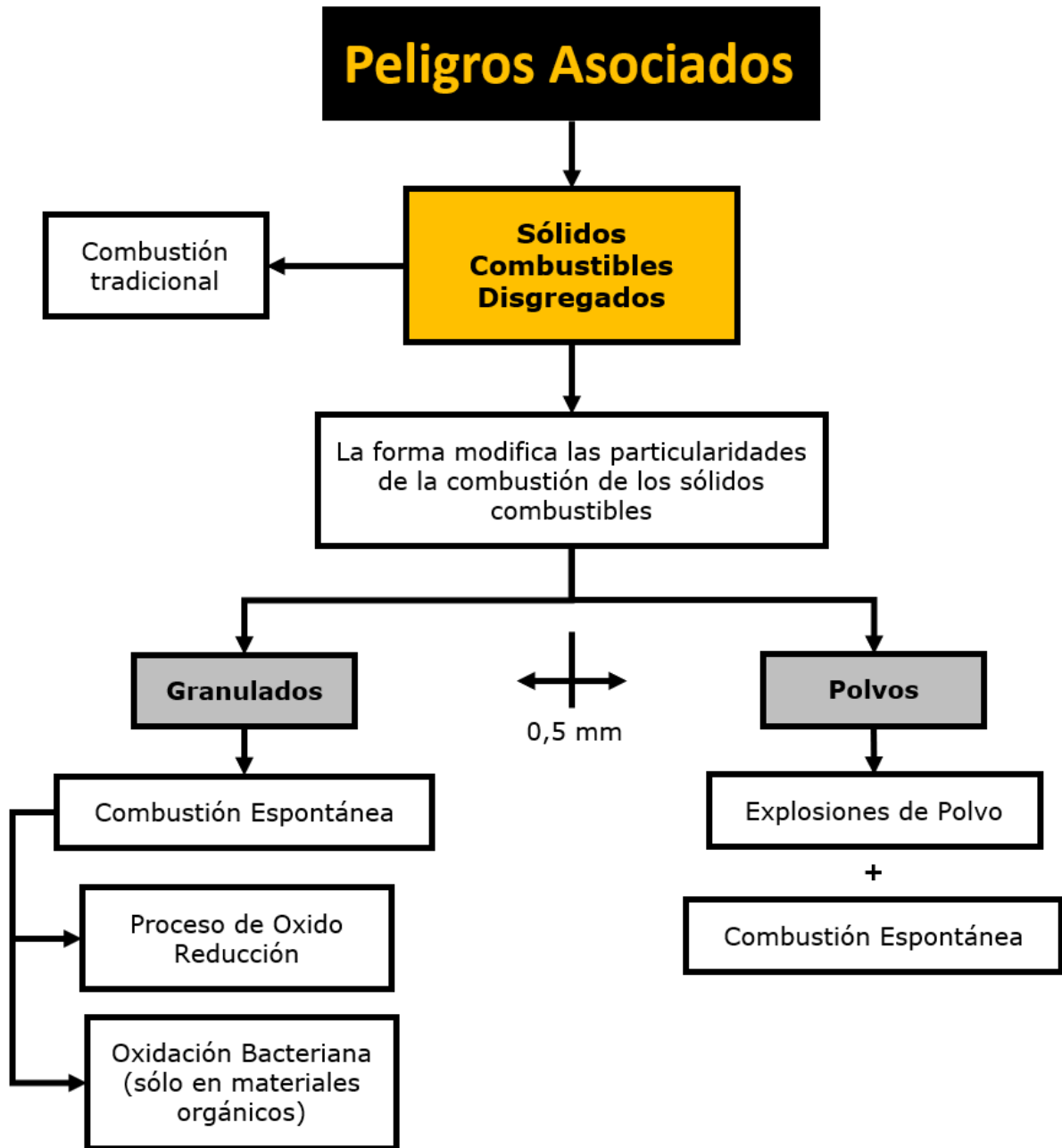
- **Productos disgregados hasta el estado pulverulento**

Variarán las condiciones iniciales y el desarrollo de su combustión (y del incendio), pero, además, se podrán dar las condiciones para que se origine una explosión.

Por todo ello, es preciso considerar estos dos aspectos por separado, pues de su análisis se deducirán las condiciones de protección contra el posible incendio y/o explosión.

La división entre polvo y granos es solo a modo de estudio, en la industria y especialmente en la agroindustria, a los productos granulados y a los polvos es habitual que se encuentren juntos; los productos granulados suelen tener un porcentaje variable de polvo en su composición.

Los peligros asociados se lo pude resumir en la siguiente imagen:



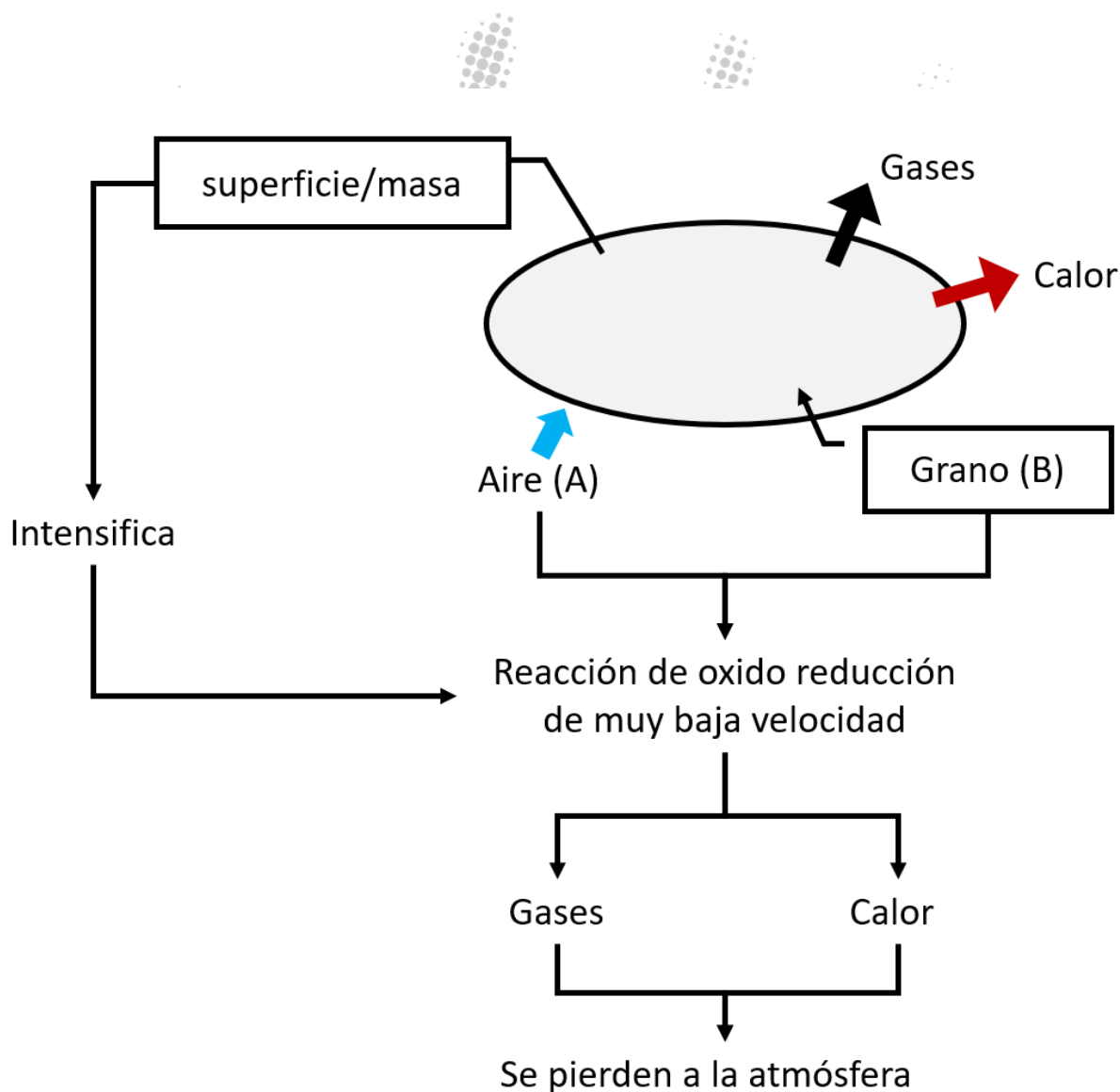
3) COMBUSTIBLES SÓLIDOS DISGREGADOS NO PULVERULENTOS

La característica que el estado de disgregación confiere a los combustibles sólidos disgregados en estado no pulverulentos se debe al incremento de la superficie de contacto combustible comburente, que facilita las condiciones necesarias para la combustión.

Además, el incremento de la interacción combustibles comburente da lugar al peculiar fenómeno propio de los combustibles sólidos disgregados; la combustión espontánea.

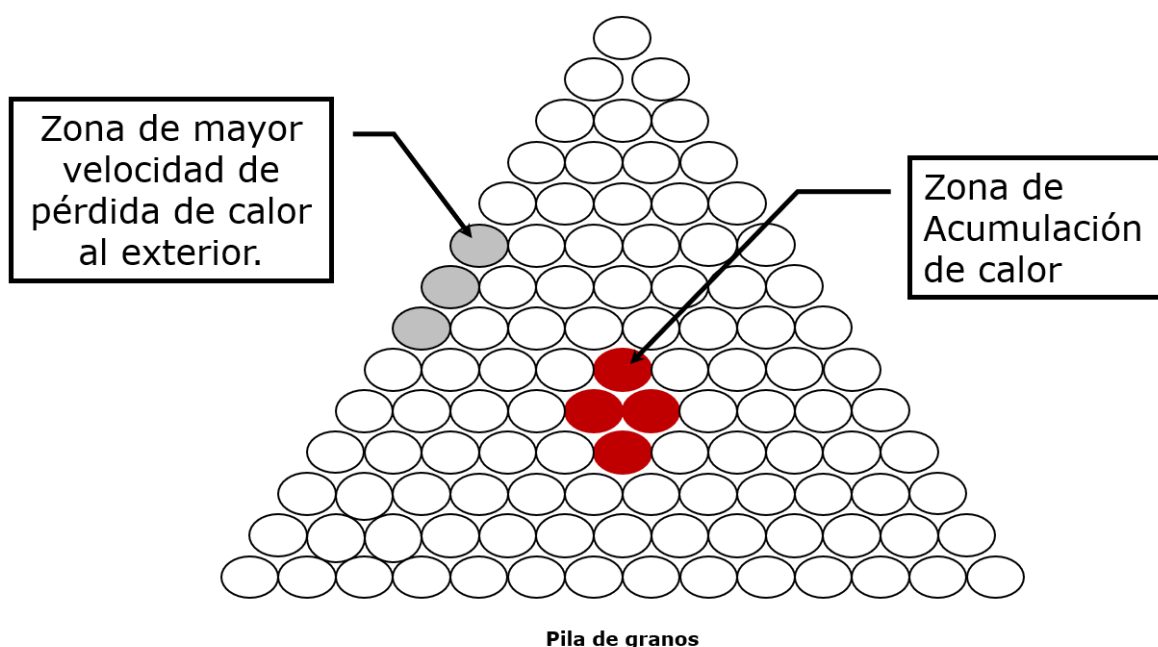
3.1) Combustión Espontánea

Los materiales granulados o llamados granos, son un producto de mucha superficie y poca masa, es decir, tienen una alta relación superficie/masa. Como consecuencia de esta alta relación se produce una potenciación en el contacto combustible/comburente.



Entre la interacción del combustible (grano) y el aire (el oxígeno del aire) se produce el fenómeno químico denominado de oxido-reducción, proceso que en condiciones normales, para este caso, es de muy baja velocidad de reacción. El resultado de este proceso produce entre otras cosas calor, pero por ser un grano un material de mayor superficie expuesta, el fenómeno de oxido-reducción se desarrolla con mayor intensidad y la liberación del calor se incrementa.

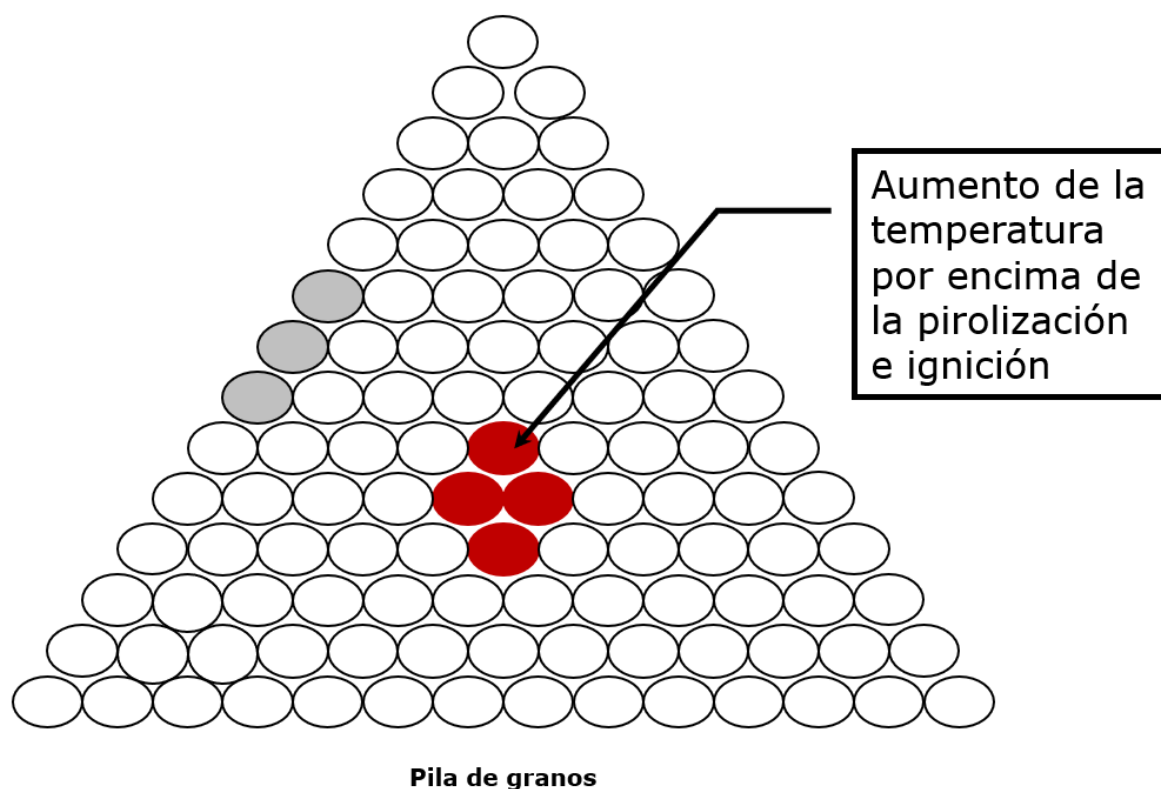
Si este grano se encuentra solo, el calor se pierde en la atmósfera y nada cambia, sólo la oxidación del combustible.



En una pila de granos, cada grano en esta pila sufre el mismo fenómeno descrito anteriormente, pero ahora el calor no se pierde en la atmósfera, sino que lo absorben y acumulan los otros granos que los rodean.

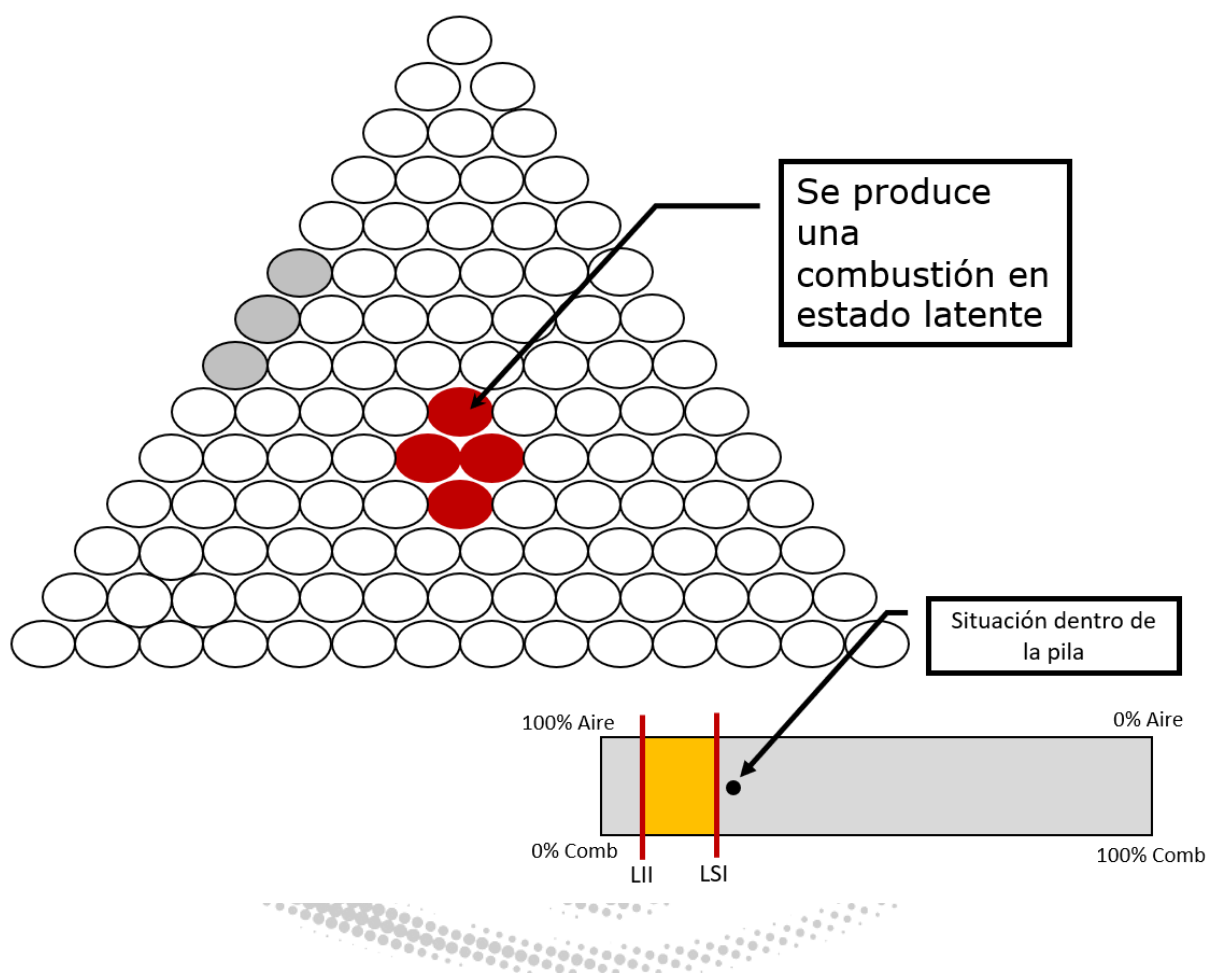
De esta manera los granos en el interior de la pila sufren un proceso de acumulación de calor con el consiguiente aumento gradual de la temperatura. Este aumento de la temperatura hace que el grano, o los granos interiores, se calienten hasta un punto donde podrían comenzar a generar llama si no fuera por falta suficiente de aire (el aire en el interior de la pila se consume en el proceso de

oxido-reducción y la renovación por convención o renovación natural es muy lenta), se produce una “combustión latente” como si fuera una combustión de masa o brasa, no presentan llama y es una combustión muy lenta, que no emite llama por falta de aire suficiente, los gases combustibles que desprende el grano se acumulan y cuando éstos granos se exponen a un ambiente abierto, se presenta la llama y se transforma en una combustión “normal”.



Se puede decir que en realidad la llamada “combustión espontánea” es un proceso de acumulación de calor por la oxidación del combustible, que hace que el combustible pirolize, genere gases combustibles y eleve su temperatura por encima de la temperatura de ignición, generando las condiciones para que en el momento de que la cantidad de aire genere una mezcla por debajo del LSI, se encienda y produzca una combustión. Se puede redefinir a la combustión espontánea como una combustión por auto-acumulación de calor.

Un material granulado necesita como condición necesaria que, además, de una alta tasa de generación de calor por oxidación, el entorno inmediato reúna condiciones suficientes de aislamiento térmico.



Las causas de toda combustión espontánea son, principalmente, dos:

- Disponibilidad de aire (comburente) en íntimo contacto con el combustible, circunstancia que se alcanza cuando el producto está notablemente disgregado.
- Balance térmico del conjunto o relación entre calor generado y calor liberado.

Prácticamente todas las sustancias orgánicas y muchas metálicas expuestas a la acción atmosférica, si son capaces de combinarse con el oxígeno, se oxidarán con desprendimiento de calor.

La tasa de oxidación a temperaturas normales es, generalmente, tan baja que el calor que se desprende se transfiere al entorno inmediato a medida que se genera, con el resultado de que no existe aumento de temperatura en el material combustible sujeto a oxidación. Sin embargo, cuando se conjugan la naturaleza del producto, su grado de disgregación y la geometría de su distribución con ciertas condiciones, se produce la combustión espontánea.

3.2) Factores que Regulan el Proceso

Entre los principales factores que regulan, modifican y aceleran el proceso de la combustión espontánea se pueden citar las siguientes:

- **Oxidación bacteriana**

Los productos orgánicos, en presencia de oxígeno, se descomponen, como consecuencia de este proceso natural se genera calor.

Este calor se suma al generado en el proceso de oxido-reducción.

La oxidación bacteriana es causa frecuente del calentamiento de cosechas agrícolas (grano, paja, heno, etc.) por ser el calor uno de sus efectos.

Puesto que la mayor parte de las bacterias no sobreviven a temperaturas superiores a 70 u 80°C, se cree que el calentamiento continuo de estos productos agrícolas hasta alcanzar sus temperaturas de ignición podría deberse a una oxidación rápida iniciada a continuación, y como consecuencia de un precalentamiento por oxidación bacteriana.

- **Humedad**

La humedad incrementa el proceso de oxidación bacteriana, además, el agua del aire húmedo o de los granos húmedos permite acumular mayor cantidad de calor.

El contenido de humedad de los productos agrícolas tiene una definitiva influencia en el riesgo de calentamiento espontáneo.

La experiencia indica que tal calentamiento puede originar una combustión espontánea tras un largo período de almacenamiento del producto, incluso después de dos y hasta seis semanas.

Así, el heno húmedo o curado indebidamente tiende a calentarse dentro de los pajares. La alfalfa troceada que se haya expuesto a la lluvia y se haya almacenado a continuación, en cajones o en montones, es muy susceptible de sufrir un calentamiento espontáneo.

- **Ventilación**

El aire exterior remueve el calor acumulado en el interior del ambiente y de los granos, si es seco el aire baja el nivel de humedad de los granos.

Nunca se debe ventilar con aire húmedo, al menos con mayor nivel de humedad que la de los productos almacenados.

- **Movimiento**

Remover la pila para mezclar el material interior más caliente con el más material exterior más frío es una muy buena técnica para mantener la temperatura de los materiales almacenados.

- **Evitar focos de calor exteriores al producto**

La aportación de calor puede iniciar una combustión espontánea en algunos productos que no están sujetos a este fenómeno a temperaturas ordinarias.

En estos casos, el calentamiento aumenta la tasa de oxidación lo suficiente para que ésta produzca a su vez más calor del que se disipa.

La aparición de combustiones espontáneas en sólidos combustibles disgregados es más frecuente en los almacenamientos de dichos productos que en los procesos industriales, por lo que las medidas de prevención contra este peligro deben extremarse en los almacenamientos de los sólidos combustibles disgregados, tanto a granel como en envases.

3.3) Almacenamiento a Granel

Los almacenamientos a granel pueden adoptar dos modalidades: en montones o en silos.

3.3.1) Almacenamiento en Montones

Los montones pueden disponerse al aire libre o a cubierto. Las disponibilidades de espacio pueden condicionar una u otra modalidad.

En efecto, cuando las condiciones meteorológicas (humedad, sol, lluvia, etc.) impliquen un factor de riesgo cierto para favorecer la génesis de una combustión espontánea deberá hacerse el almacenamiento siempre en el interior o a cubierto. En todo caso, cuando se almacenen materiales en montones al exterior (en general, todos los forrajes) es preciso limitar el tamaño de los montones, de modo que la superficie exterior que permite la evacuación del calor sea suficiente para disipar el generado en el interior.

El almacenamiento de carbón a granel en montones o pilas es, posiblemente, el más frecuente de este tipo de almacenamientos.

El almacenamiento a montones presenta las siguientes características:

- Baja posibilidad de mezclar o mover el material consigo mismo.
- El corazón de la pila queda sin mover hasta el consumo de esta.
- Poca o nula ventilación.

- Control de la temperatura manual.



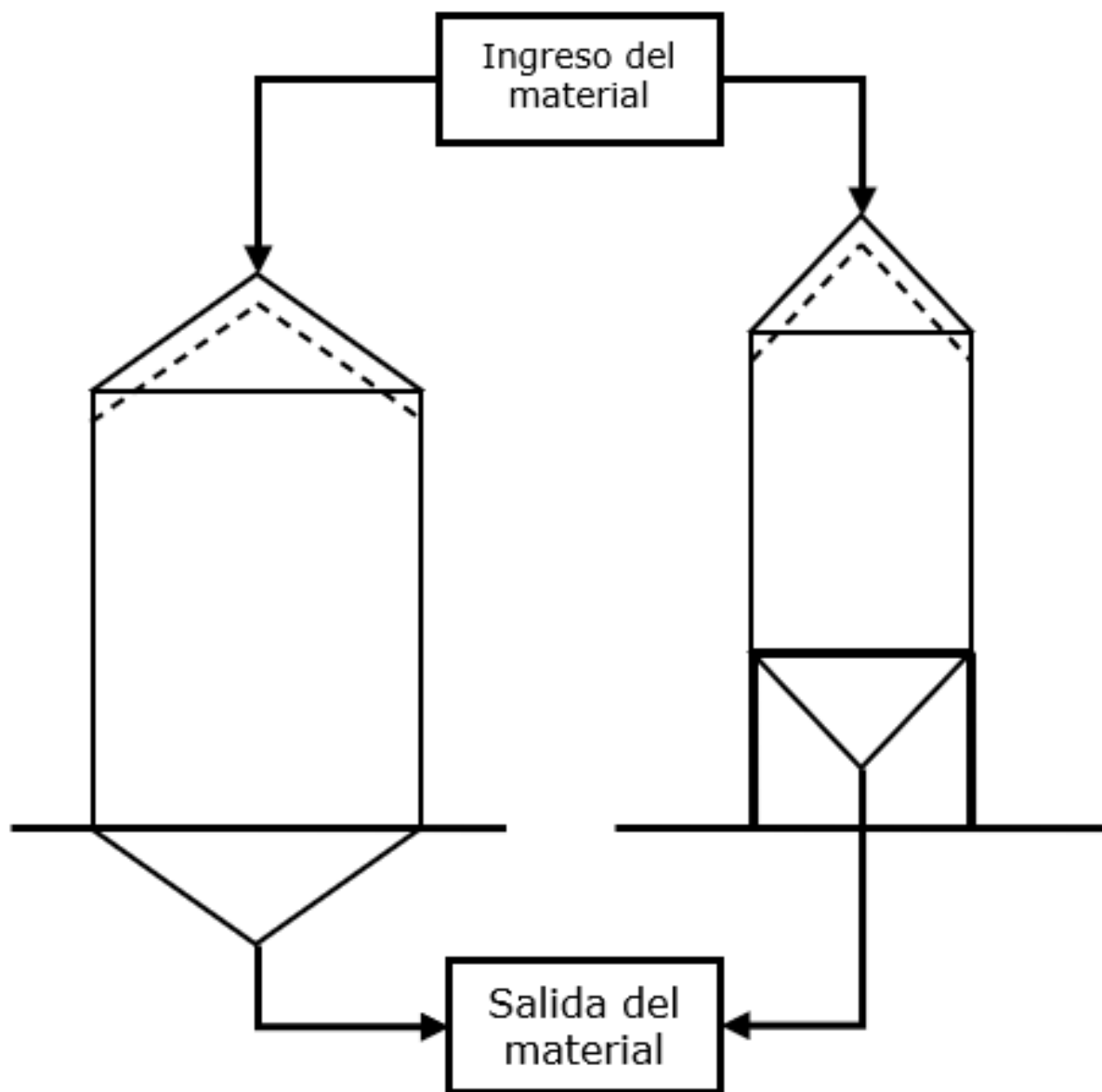
3.3.2) Almacenamiento en Silos

Los almacenamientos a granel en silos constituyen un sistema más perfeccionado que el almacenamiento en pilas, pues es posible no sólo almacenar, sino, también, manipular más fácilmente grandes cantidades de productos disgregados.

Los productos almacenados en silos resultan menos expuestos al aire, por lo que se reduce el riesgo de oxidación directa de los mismos, pero pueden, por el contrario, originarse en su interior oxidaciones bacterianas de alta tasa de liberación de calor, en un medio con poca capacidad de disipación.

La manipulación de materiales combustibles a granel produce casi siempre polvo, lo que implica un riesgo suplementario de explosión, especialmente cuando esta

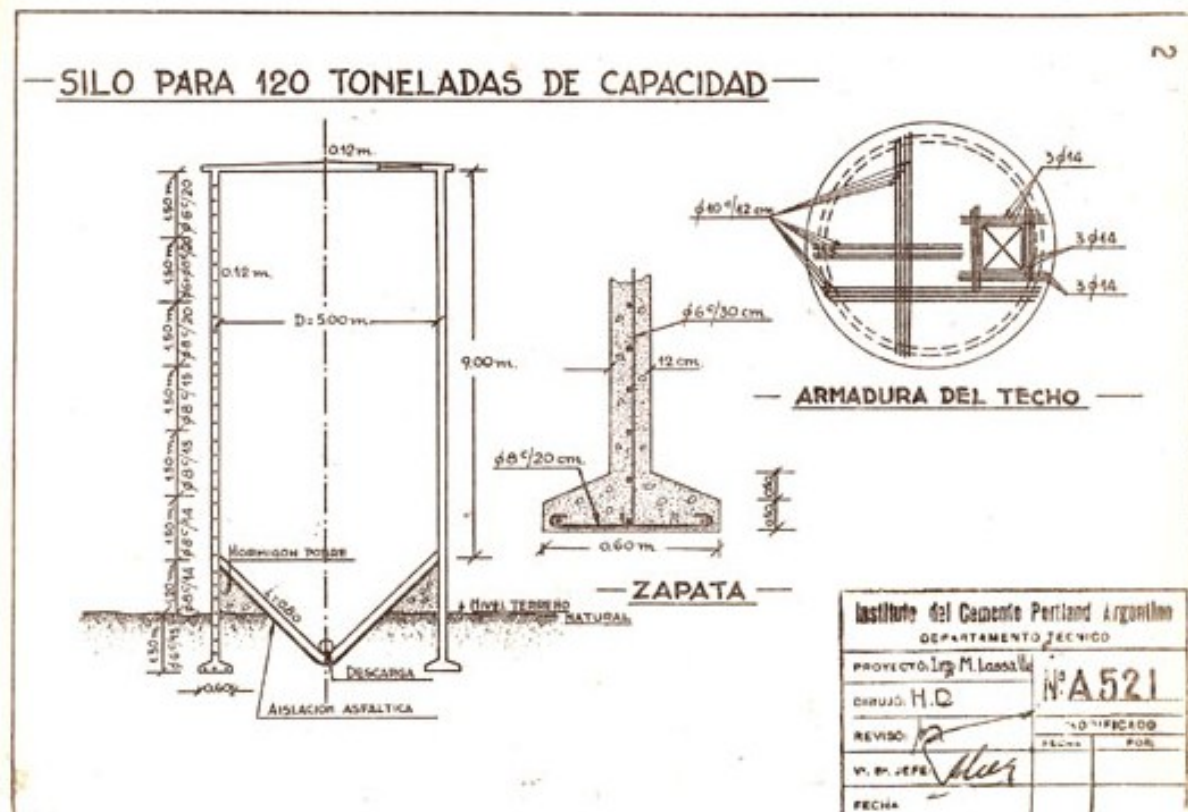
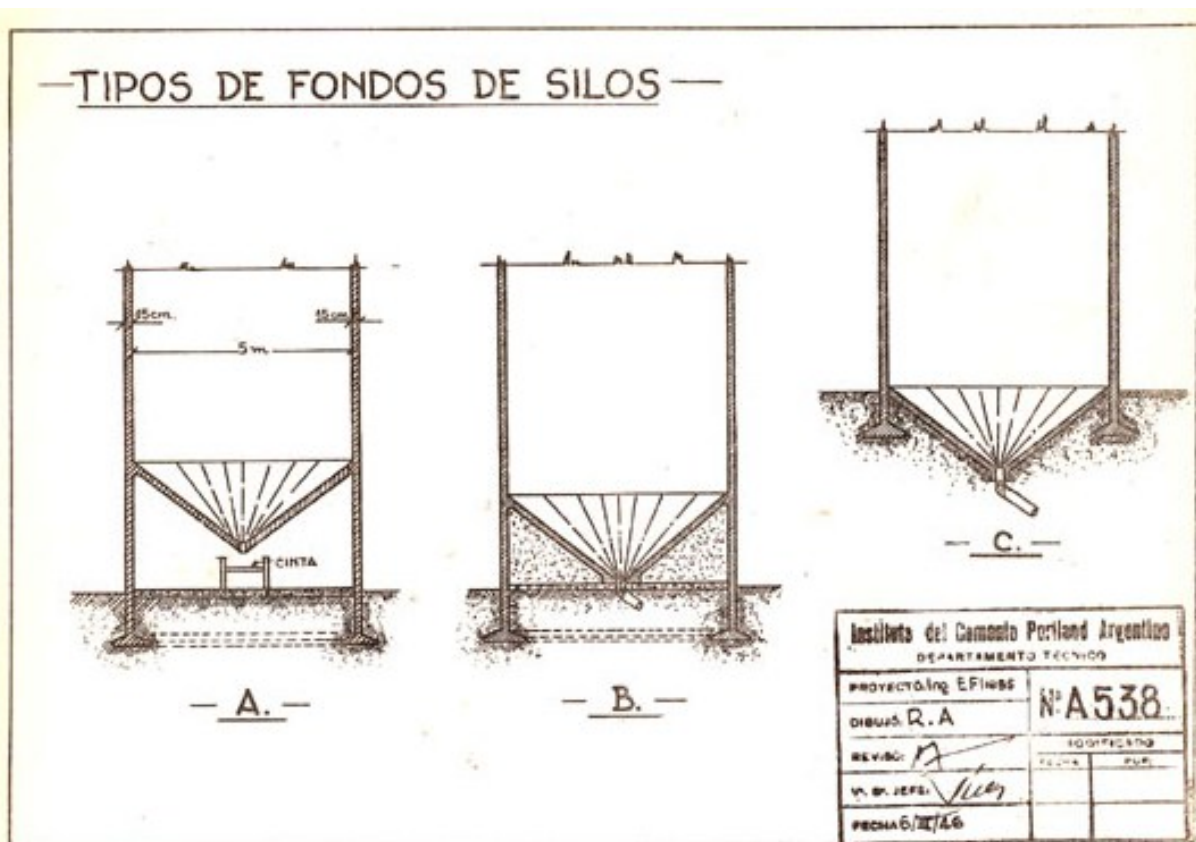
manipulación se hace en espacios cerrados, como son los silos. Por ello, deben tomarse medidas constructivas del silo para evitar las explosiones o minimizar sus efectos.



Los silos ofrecen las siguientes características:

- Alta movilidad del material.
- Buena ventilación, por ventilación forzada.
- Permite sistema de control de temperatura automáticos y manuales.

- Representan un ambiente confinado.



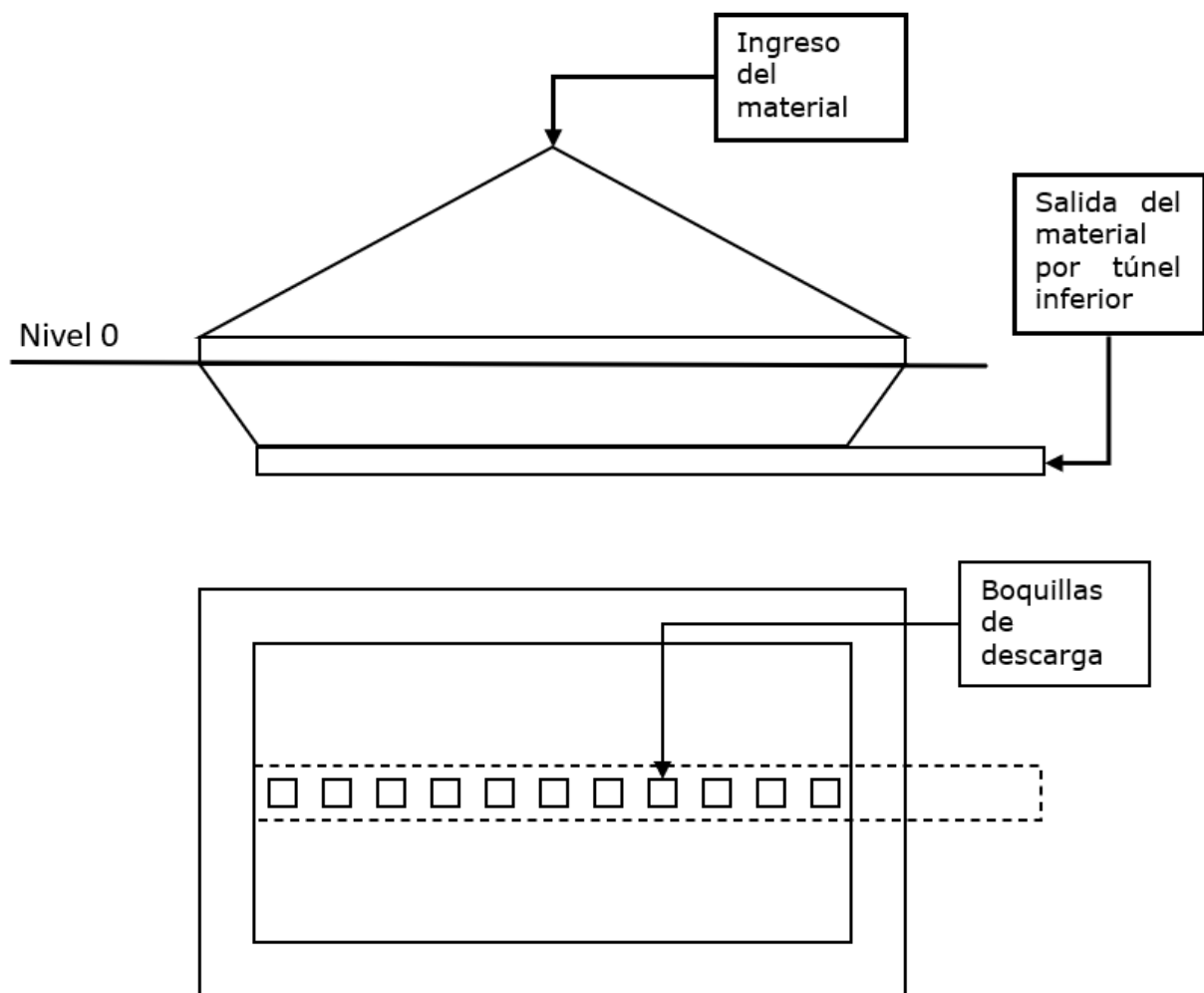




3.3.3) Almacenamiento en Celdas

Las celdas son un sistema similar a un silo pero de capacidad mucho mayor. Sus características son las siguientes:

- Alta capacidad de almacenamiento (100.000 Tn o más).
- Buena ventilación, por ventilación forzada.
- Permite implementar un sistema de control de temperatura automático.
- En su mayoría tienen piso plano, lo que produce una movilidad del material irregular, existiendo zonas inmóviles o muertas.
- Mucha inercia de material. Su vaciado por problemas técnicos lleva tiempo, no es algo que se puede hacer en forma rápida.

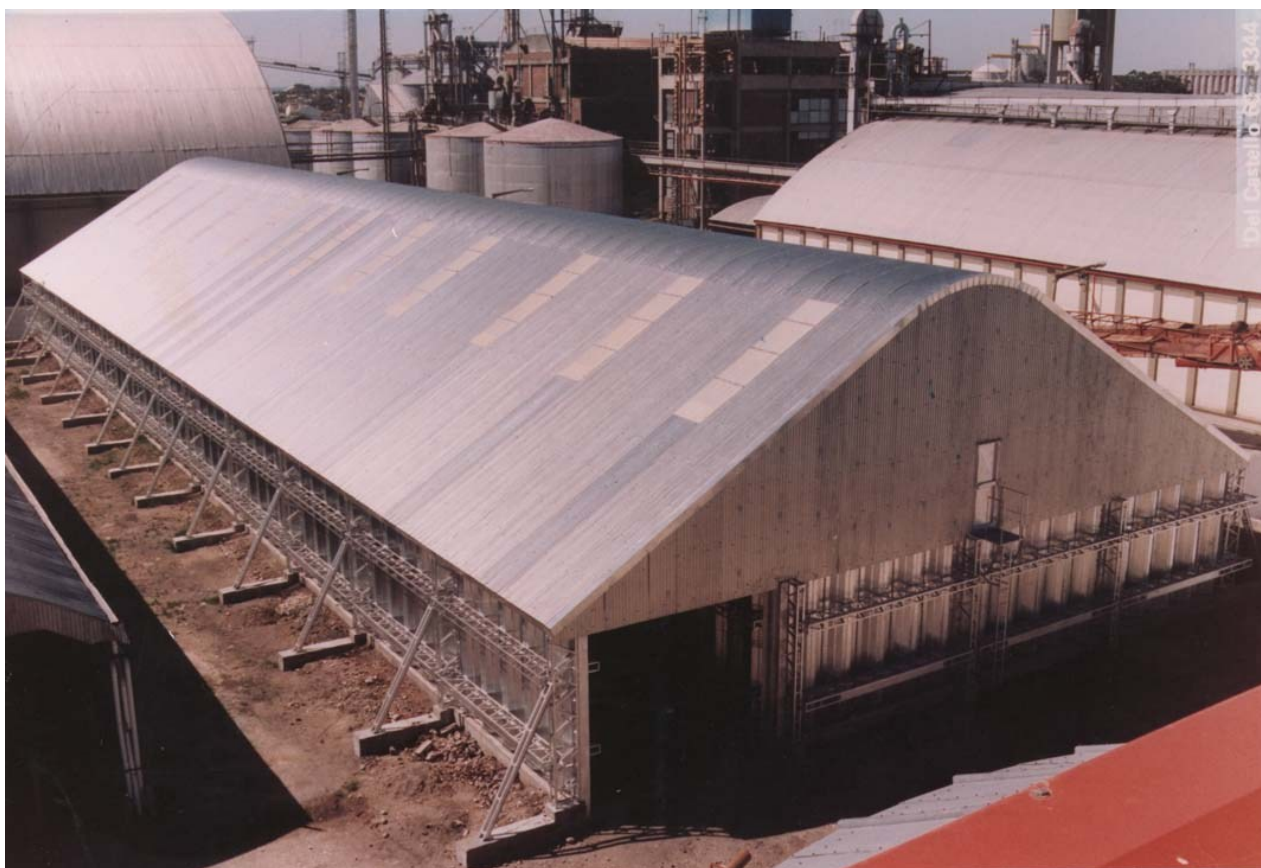


En la foto siguiente se pueden observar celdas de distintos tamaños y silos. Se puede apreciar la diferencia de tamaño entre los mismos.

Las celdas son de gran capacidad pero ocupan una gran superficie, mientras que los silos, aunque se puede hacer todo lo grande que se quieran, su capacidad es

menor al de las celdas. Ocupan menos superficie dado que almacenan en el eje vertical, es decir, a lo alto.





En la anterior foto se observa un silo del tipo galpón. La diferencia con un silo es que en el silo el material almacenado apoya su peso sobre el piso y las paredes que están enterradas, es decir la carga la soporta la tierra. En el galpón el peso del material es soportado por el piso y por las paredes del galpón que están al aire libre, por eso se pueden observar vigas a modo de apuntalamiento de la pared del galpón.

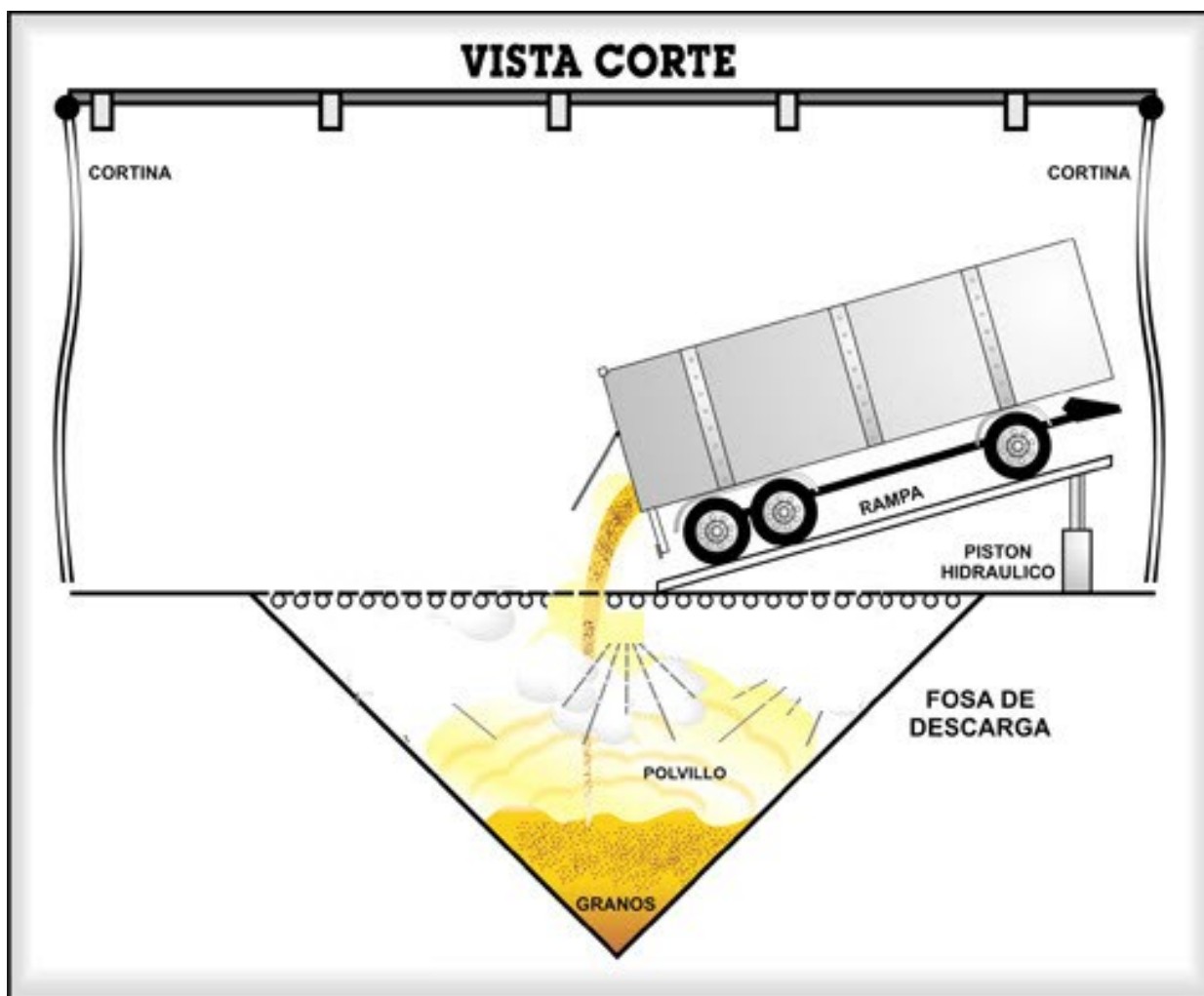
Los silos permiten un gran volumen de almacenamiento, mientras que los galpones suelen ser de menor capacidad. Los usos también suelen ser distintos, distintos materiales y objetivos dentro del proceso.

3.4) Movimiento de materiales en Silos y Celdas

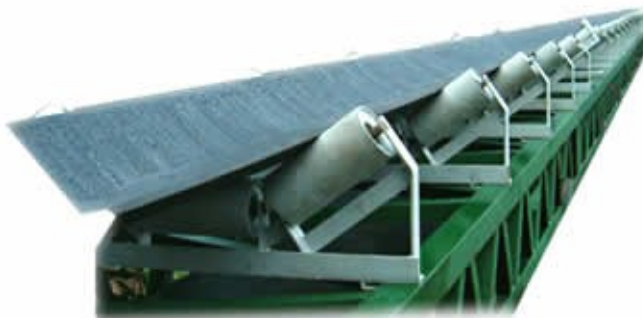
Todo el movimiento de material granulado sea en silos o celdas, está mecanizado, es decir, la carga y descarga se hace utilizando equipamiento mecánico o neumático para algunos tipos de materiales.

El ingreso del material que proviene generalmente en camiones se descarga utilizando la gravedad, para ello se eleva e inclina el camión y su acoplado en una rampa, quedando literalmente el camión colgado.

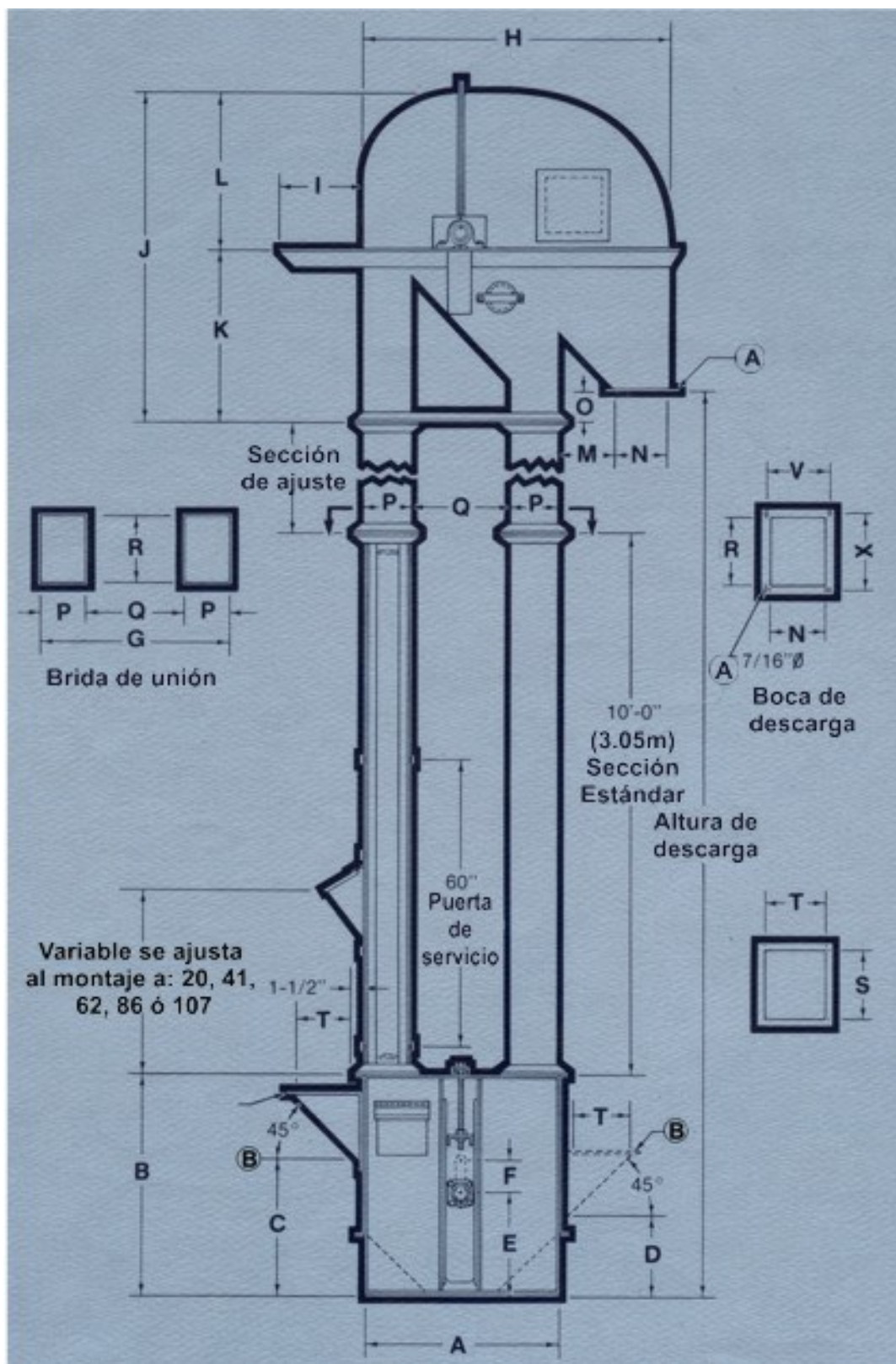




El chasis y el acoplado descargan por su parte trasera hacia una tolva, que no es otra cosa que un gran embudo ubicado bajo el nivel cero. Esta tolva, abierta en su extremo inferior, descarga a su vez en una cinta de transporte horizontal que se encuentra en un túnel ubicada debajo de la tolva.

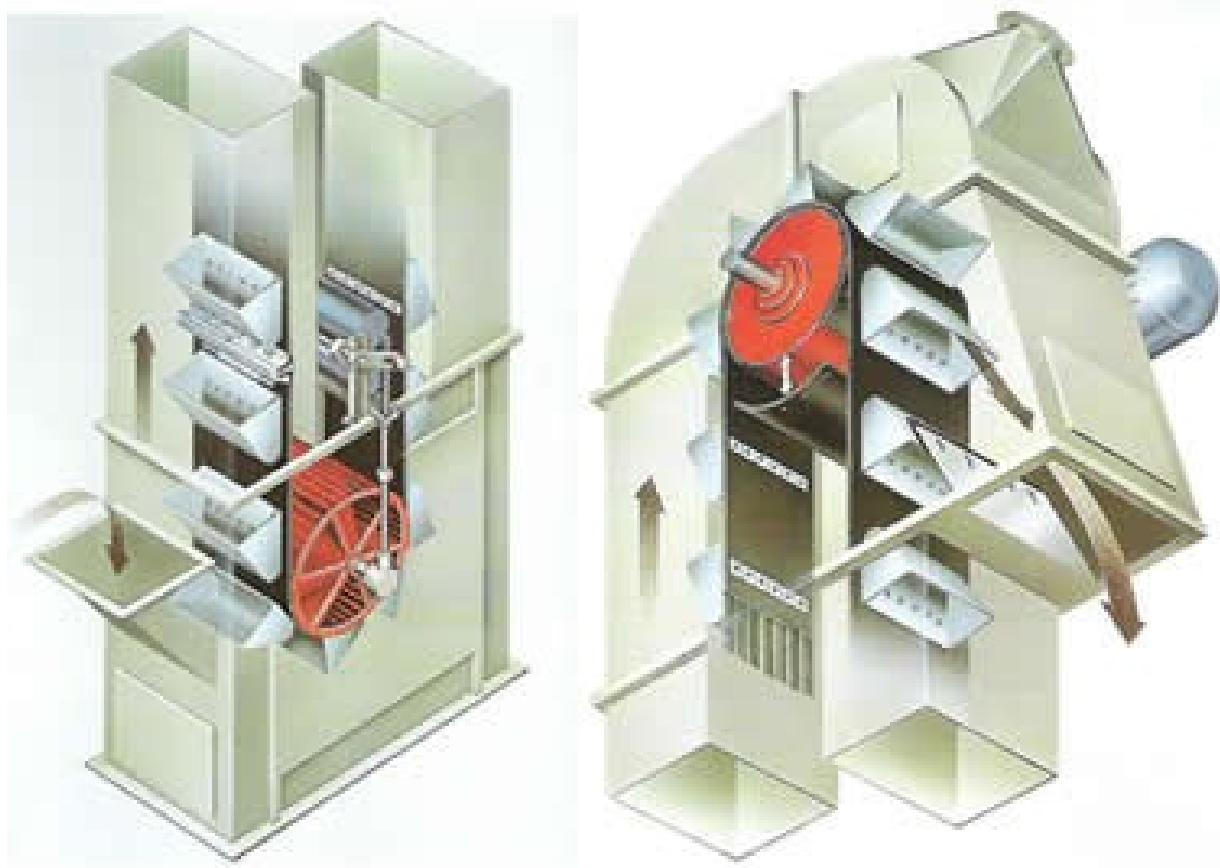


Estas cintas, por lo general en forma de "V", trasladan horizontalmente el material granulado hacia el elevador a cangilones que tiene como función elevar el material y "tirarlo" dentro del silo o de la celda.





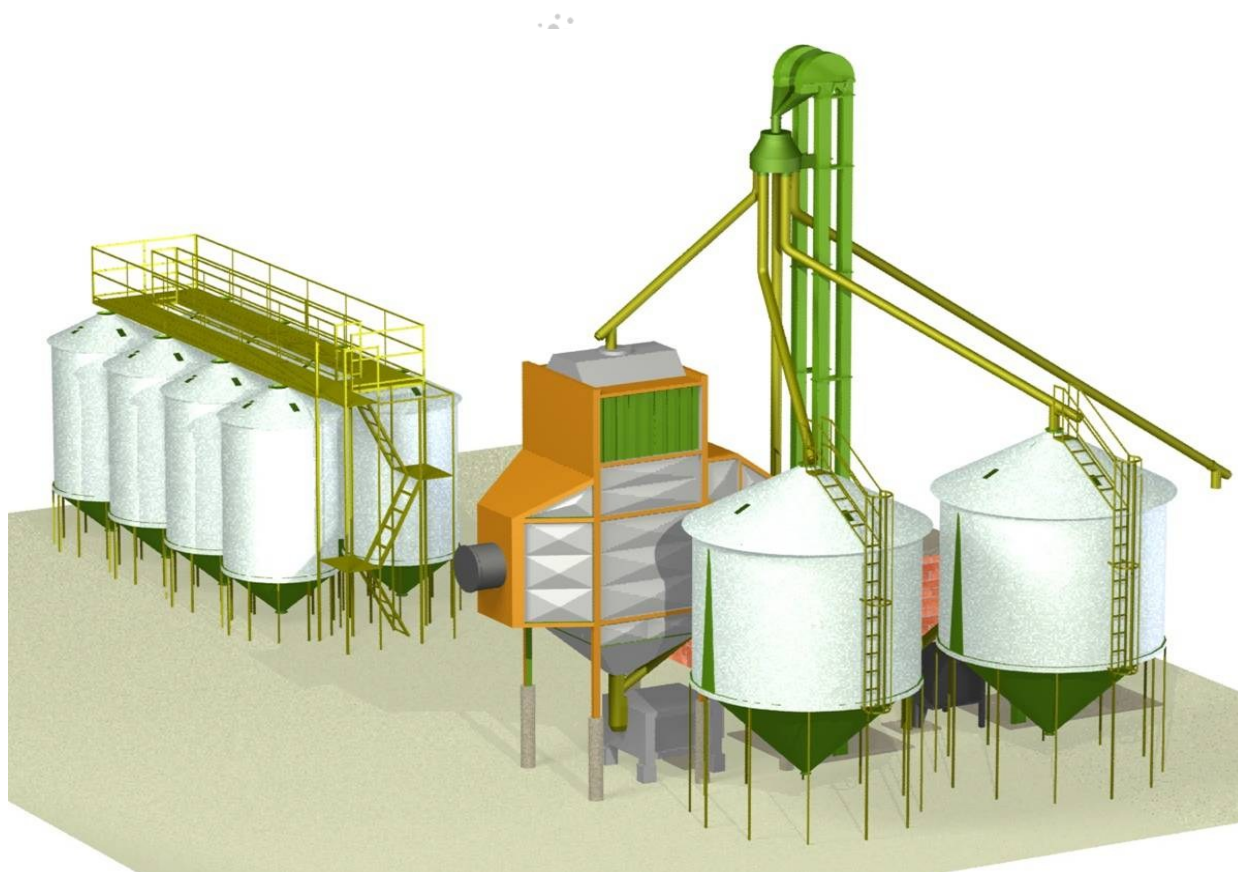




Cuando la descarga se realiza a silos, como el de la figura anterior, suele haber un solo elevador para un grupo de silos, y la descarga a cada silo se hace por medio de tubos de descarga.

Cuando la descarga se realiza a celdas, el elevador descarga a otra cinta horizontal que recorre la parte superior de la celda en todo su largo, para que esta a su vez, mediante un mecanismo especial, descargue en forma homogénea en toda la superficie.

Tanto en silos o celdas, la entrada del material se realiza por caída libre, es decir, el material se tira dentro del mismo como si se estuviera llenando una bolsa.





Elevador de Cangilones Auto Portante



Elevador de Cangilones en Torre de Norias

El vaciado de los silos y celdas son similares, en ambos casos se realiza por gravedad desde la parte inferior de los mismos.

Los silos al ser en su gran mayoría de piso cónico, descarga en su punto central a una cinta transportadora horizontal que se encuentra debajo, en un túnel, si el silo tiene la base apoyada sobre la tierra, o a nivel cero, si el silo es aéreo como los de la figura anterior. Esta cinta lleva el material hasta el pie del elevador (parte inferior del mismo) y así sigue el proceso.

A donde se quiera llevar material granulado por medio de instalaciones mecanizadas fijas existirán cintas, elevadores, tolvas y tubos de descarga, y todo el proceso utiliza la gravedad al máximo.

En las celdas, al ser en su gran mayoría de piso plano, la descarga se realiza por medio de múltiples aberturas en el piso o llamadas boquillas, que se encuentran en el piso a lo largo del eje central mayor o longitudinal. En todas las celdas existe debajo de la misma un túnel que lo recorre en todo su largo donde se encuentra la cinta transportadora.



Descarga de silos de cono aéreo por la parte inferior hacia un transporte ubicado sobre nivel de tierra debajo de los mismo

Existe otro elemento usado para el transporte horizontal o inclinado y son los tornillos sinfín. Por lo general son de uso limitado y para cortas distancias.



En instalaciones menores, los silos suelen descargar desde el fondo del silo por medio de un tornillo sinfín colocado paralelo al cono.



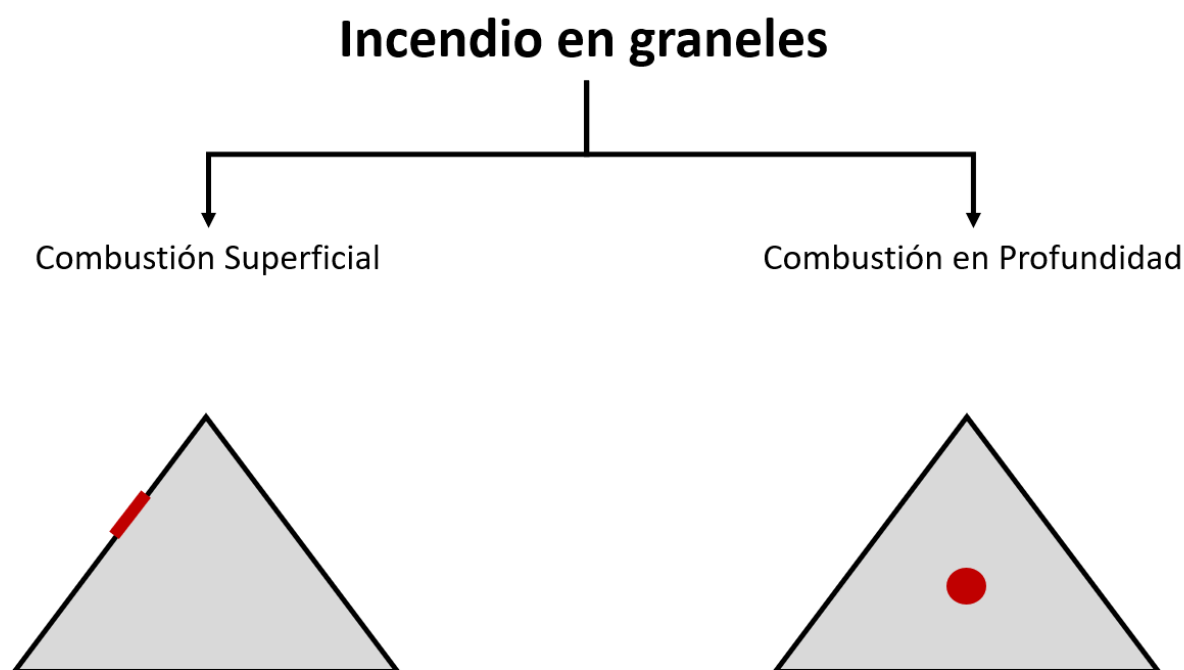
3.5) Almacenamiento en Envases

Los almacenamientos de envases pueden adoptar tanta variedad como tipos de envases, recipientes o embalajes son posibles: sacos de papel, yute, arpillera, etc., frascos, latas o bidones, balas, barriles de madera o metal, cajas de cartón, madera o fibra, etc. El producto así envasado se almacena luego en cualquier tipo de almacenamiento.

La prevención del incendio en estos almacenamientos comienza por la adecuación del envase al tipo de producto, con el fin de evitar el inicio de una combustión espontánea.

3.6) Incendio en Graneles

Si las medidas de prevención contra incendios fracasan y éste llega a producirse, es necesario combatirlo de acuerdo con las peculiaridades técnicas que exige el estado de disgregación del combustible.



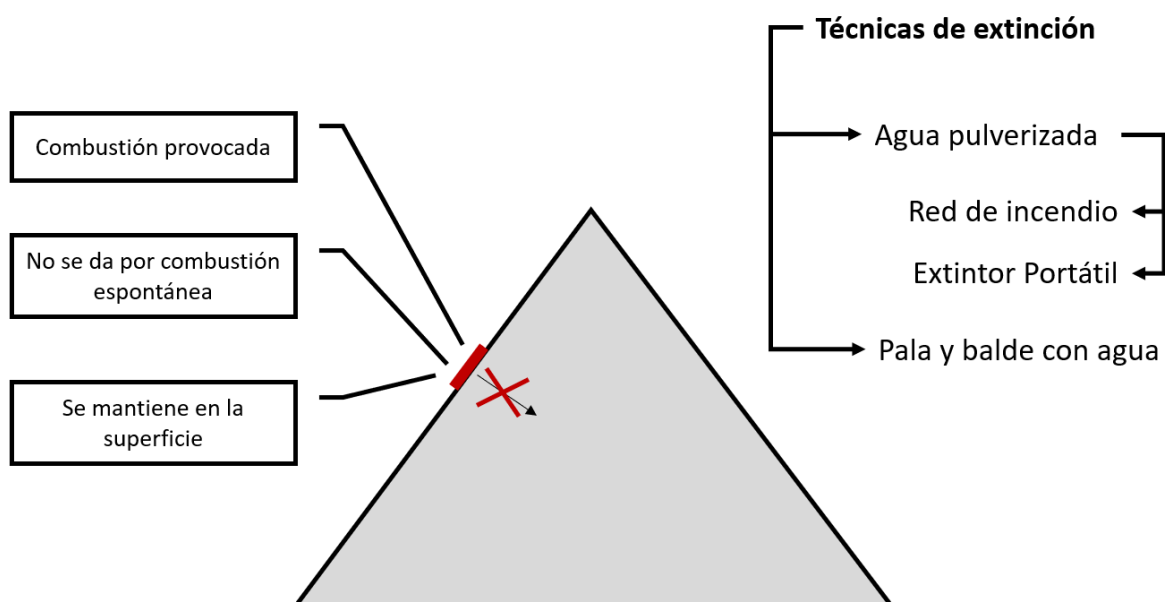
Los incendios de los productos almacenados a granel pueden iniciarse en la superficie o por debajo de ella, es decir, en el interior de la pila; en cualquier caso, el incendio superficial puede penetrar y desarrollarse profundamente en el interior. Los incendios de superficie son siempre atribuibles a incendios provocados por fuentes de ignición externas.

Son atribuibles a la combustión espontánea los incendios iniciados en el interior de la pila.

3.7) Incendio en el Almacenamiento el Pilas

Si la combustión se da en la superficie, es común que el fuego se mantenga superficialmente, si la naturaleza química del material lo hace aceptable.

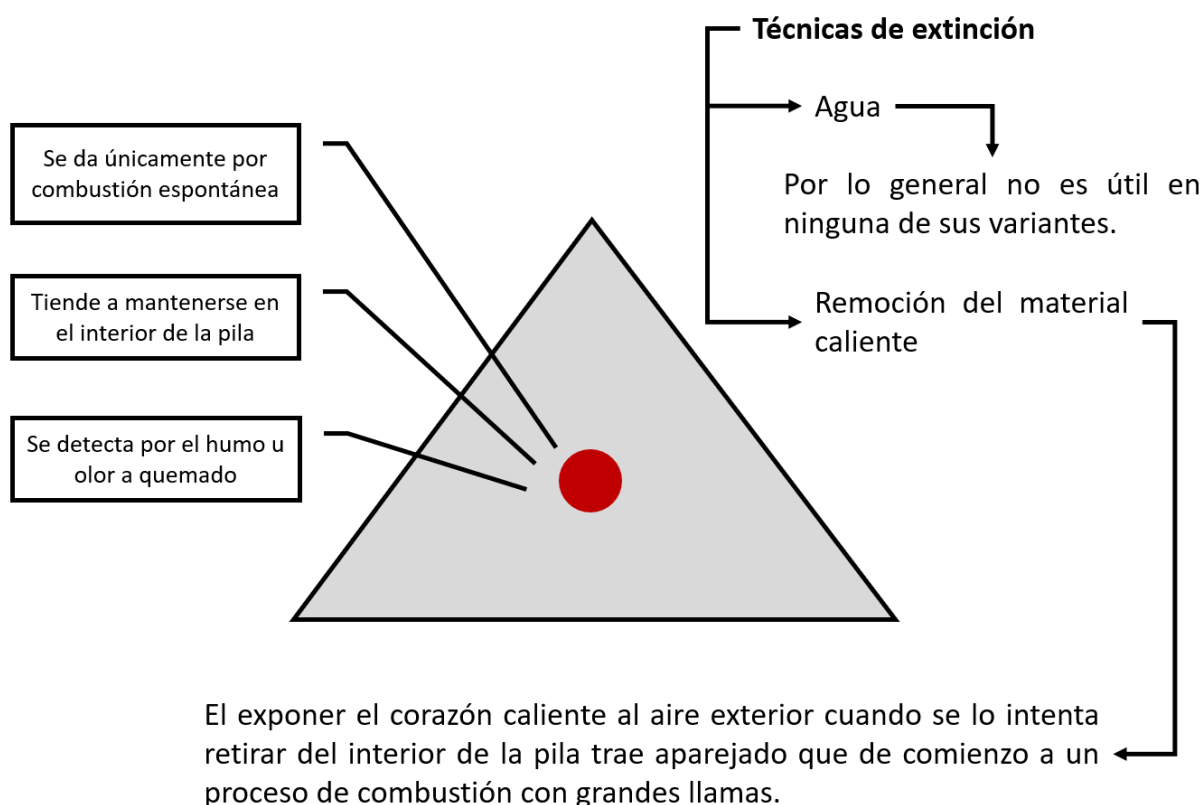
Suele ser efectiva el agua pulverizada cuando se trata del incendio de graneles amontonados o simplemente retirar el material con una pala de metal y volcar las brasas en un balde agua o al piso.



Si el fuego se propaga hacia el interior de la pila y penetra con profundidad, o se está en presencia de una combustión espontánea, la protección con agua

pulverizada o con rociadores automáticos (si el almacenamiento se hace en interiores) no es recomendable, pues resulta poco efectiva, y la extinción más eficaz se logra extrayendo del almacén el material en combustión.

El exponer el corazón caliente al aire exterior cuando se lo intenta retirar del interior de la pila trae aparejado que dé comienzo a un proceso de combustión mayor y con grandes llamas.



Cuando se está en búsqueda de este tipo de combustiones, que se detectan por olor a quemado típico del material o por un poco de humo que sale del interior de la pila, es recomendable que esté presta a responder la brigada de incendio para hacer frente al incendio que en casi todos los casos se va a desatar.

En el caso de almacenamiento a granel en interiores, serán recomendables los rociadores automáticos cuando, a pesar de ser posible los fuegos profundos, los edificios en que se realiza el almacenamiento son construcciones combustibles, o de una resistencia al fuego inferior a 120 minutos, o no se dispone de medios para

extraer los productos almacenados del interior. En estos casos, el sistema de rociadores puede permitir un control del incendio (para extinguirlo con otros medios) durante un tiempo razonable.

3.8) Incendio en el Almacenamiento en Silos

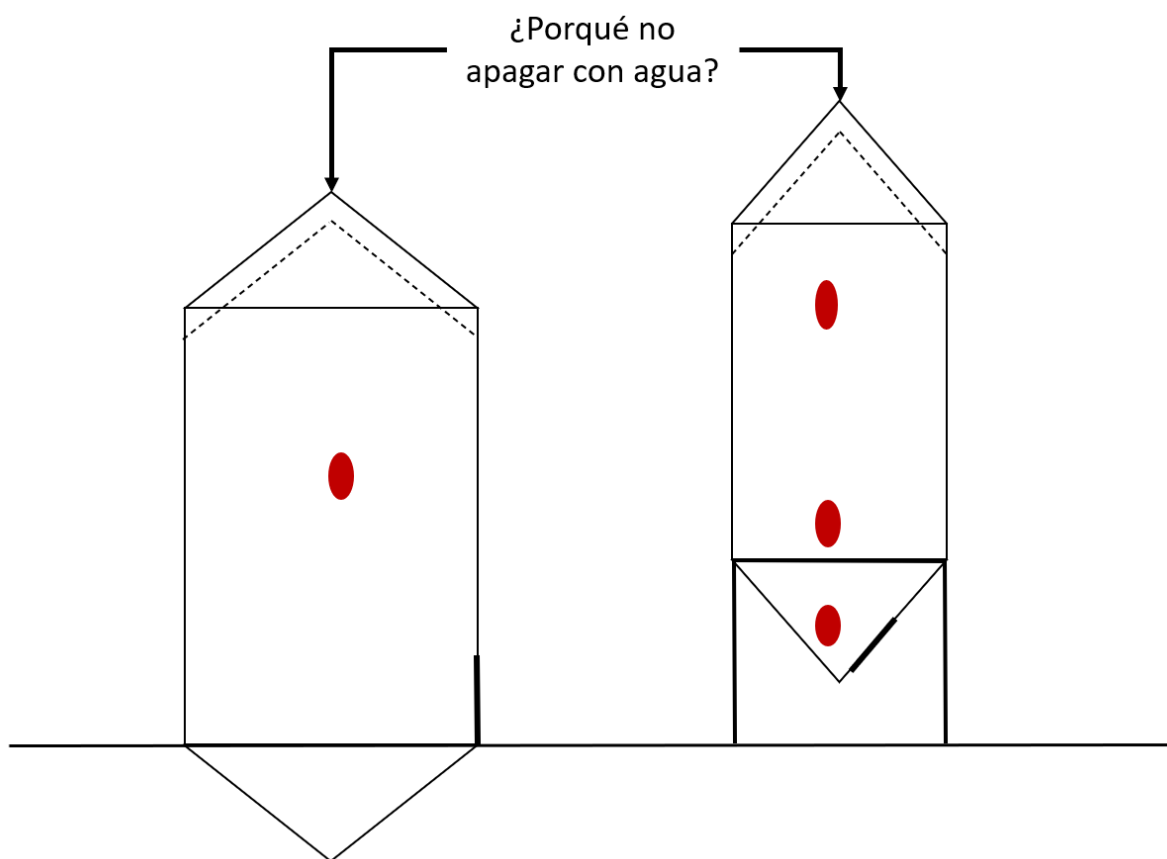
La extinción de incendios en silos presenta algunas particularidades que la dificultan notablemente. Por tratarse de depósitos de difícil acceso, en los que el aire se encuentra ocupando los huecos que deja el producto almacenado, el incendio iniciado por combustión espontánea es de difícil localización y se detecta, muchas veces, cuando lleva algún tiempo que se desarrolló y se han formado fuegos de brasas en profundidad.

El método más eficaz para extinguir un incendio asentado en un silo que contiene sólidos disgregados consiste, casi siempre, en separar el combustible no afectado aún por el incendio. Sin embargo, la descarga o extracción del combustible no siempre puede realizarse en la práctica en condiciones seguras.

El vaciado del silo por su parte inferior podría ser una opción, pero si se usan los equipos normales, salvo el tornillo sin fin, el resto está conformado por material combustible, por consiguiente todo lo que se haría es extender el incendio a los equipos de transportes y por medio de estos a los otros silos o partes del proceso industrial.

3.9) ¿Por qué No Apagar con Agua?

Inundar el silo con agua no es una buena alternativa, primero porque se echaría a perder todo el material del interior del silo, sólo por unos pocos kilos de material caliente y segundo, es que los silos no son herméticos al agua.

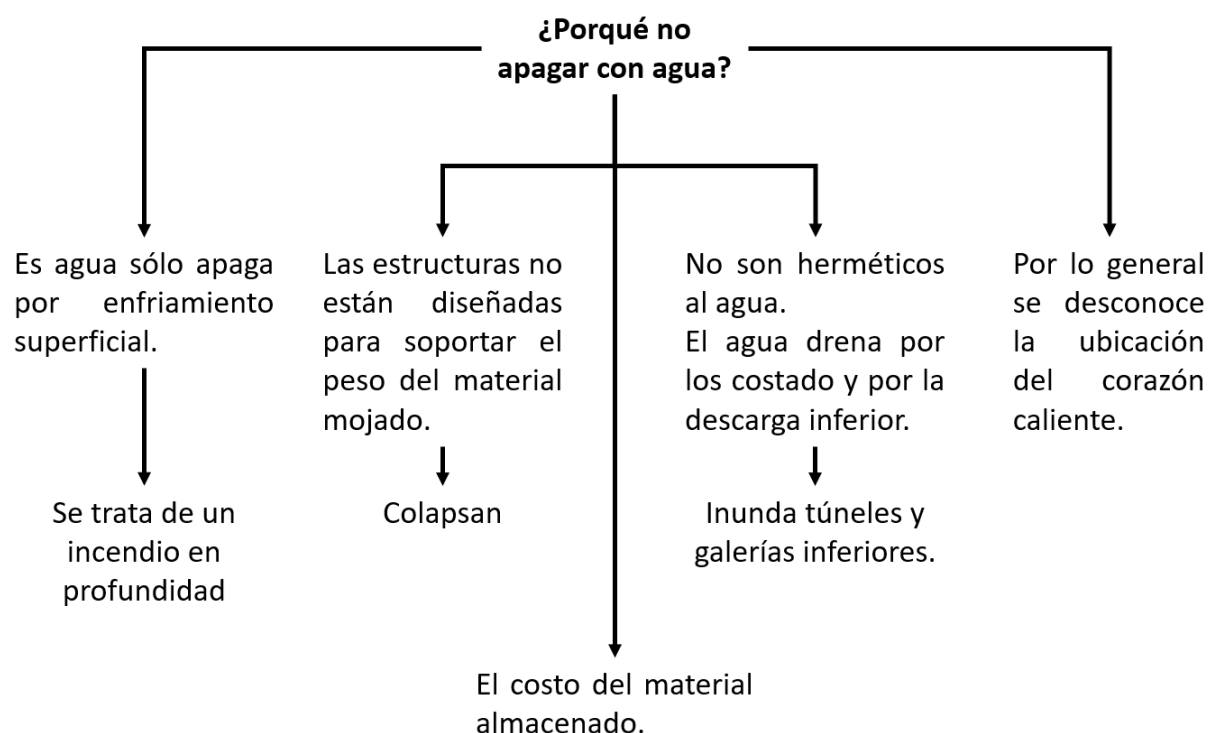


Tirar agua al interior del silo tampoco constituye una buena opción, primero porque no se sabe la ubicación exacta del corazón caliente, y segundo, porque el agua debido a su tensión superficial va a recorrer el camino que menos problemas le presente, una vez que el agua “construya” un camino entre el material granulado, el resto del agua va a seguir ese camino y no otro, es decir, el agua va a tomar el camino que quiera y no el que convenga a la extinción. Tirar agua con aditivos para reducir su tensión superficial tampoco va a ayudar a combatir el incendio, aunque es mejor que tirar agua normal.

El principal problema de tirar agua dentro de un silo, no lo constituye la poca efectividad del método o el arruinar el resto del material dentro del silo; el problema es que se pueden crear graves condiciones de inseguridad por razones mecánicas que afectan a la estabilidad del silo.

Los productos ensilados son, frecuentemente, celulósicos, de origen vegetal u otros orgánicos que, casi siempre, tienen una baja densidad, inferior a la unidad.

El cálculo de la estabilidad y resistencia del silo se realiza considerando los valores de carga prevista de acuerdo con el volumen de almacenamiento y la densidad del producto almacenado.

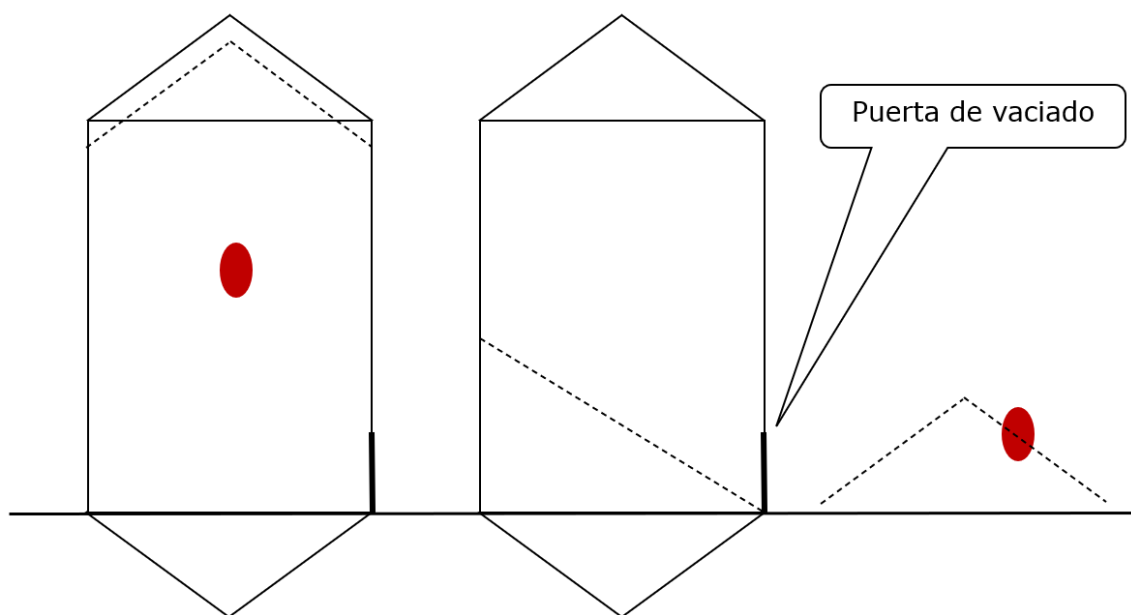


Si por medios automáticos o manuales se aportan cantidades importantes de agua en el interior del silo, se pueden producir sobrecargas tan importantes y superiores a las previstas, que la estructura portante o la cimentación del silo no serán, en general, capaces de resistirlas, dando lugar a asentamientos de la construcción o la destrucción de la misma.

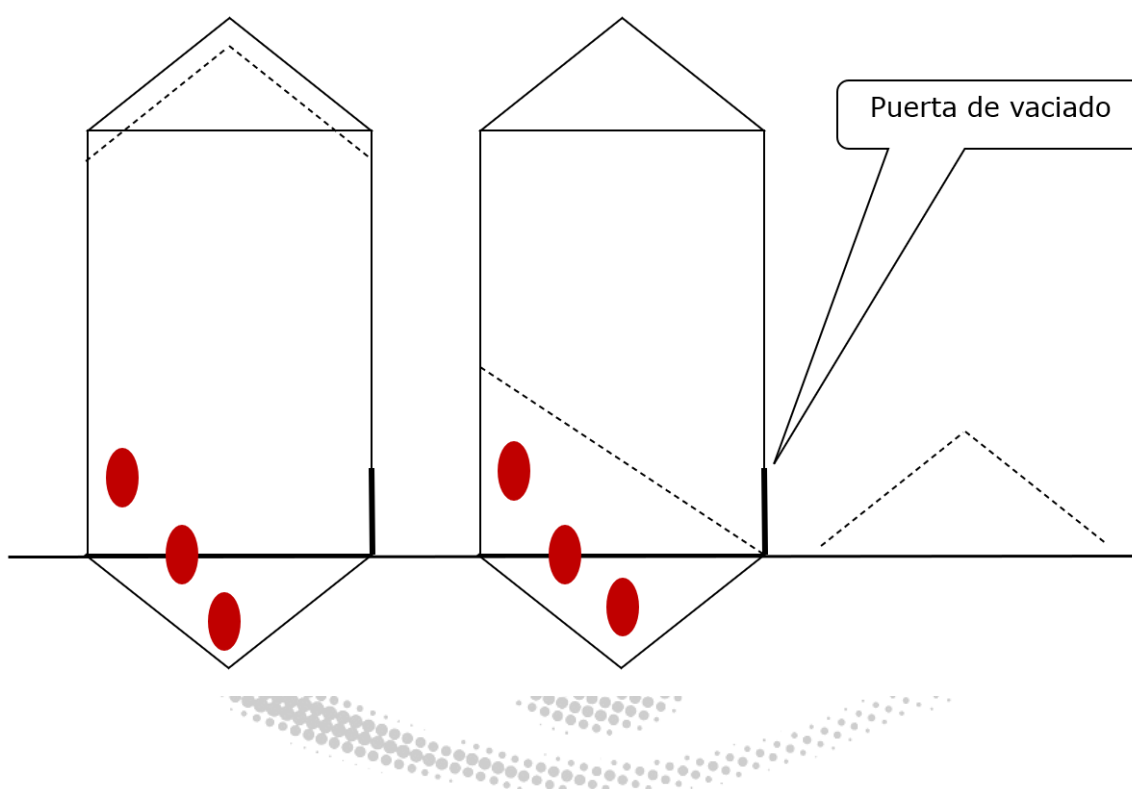
Fenómenos semejantes, que afectan también a la resistencia mecánica de la estructura, pueden darse cuando se trata de silos metálicos, como consecuencia de la pérdida de resistencia del acero cuando alcanza temperaturas superiores a los 500°C, y a las contracciones y dilataciones producidas por las variaciones de temperaturas debidas al incendio y, en su caso, a la aportación de agua.

3.10) Técnica de Vaciado Rápido de Silos

Es conveniente, en especial en los silos con su cono enterrado, que dispongan de una puerta lateral de vaciado.

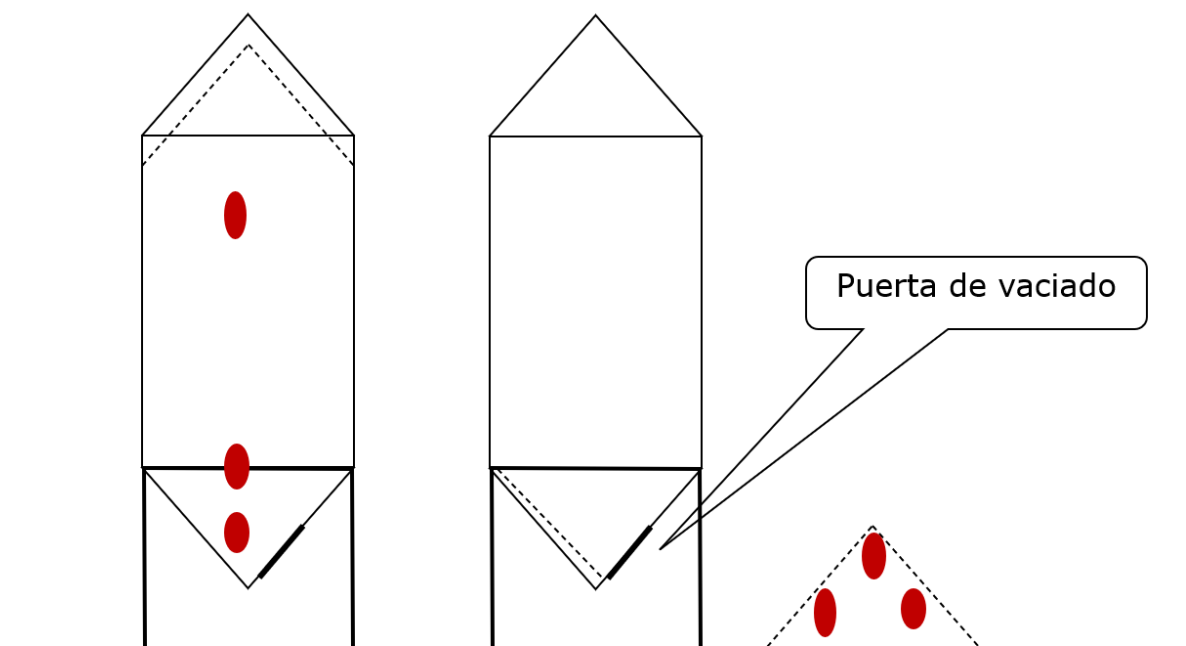


Si el corazón caliente está debajo del nivel del cono o debajo de la línea de talud del material almacenado, cuando se produzca la apertura de la puerta de vaciado, este corazón caliente no podrá salir por sí sólo. En estos casos la puerta lateral ayudará a vaciar parte del silo y a tener mejor acceso a la zona inferior. Tomando todas las precauciones de seguridad del caso, se podrá hacer ingresar personas a su interior para palear al exterior el contenido, con la ayuda de palas y/o tornillos sinfín.



En todos los casos, para la apertura de la puerta lateral, es necesario estar preparado con una brigada contra incendios y una manguera de incendios con presión de agua por si la salida del material al entrar en contacto con aire exterior se enciende espontáneamente. Lo mismo puede suceder dentro del silo.

En el caso de silos con conos aéreos como el de la figura inferior, el vaciado es mucho más simple y menos riesgoso. El mismo se puede hacer por la parte inferior del cono, desvinculándolo del equipo de transporte y tirando el material al piso, si no, se puede hacer la puerta de vaciado pero en el cono, de esta manera el vaciado es más rápido.



3.11) Incendio en el Almacenamiento en Celdas

Las celdas presentan los mismos problemas que los silos, salvo por el problema de estabilidad, dado que su base plana de hormigón está construida sobre el suelo.

El principal problema de las celdas a la hora de intentar combatir un “incendio” o mejor dicho la presencia de un corazón caliente dentro de la pila, está relacionada al gran tamaño de la misma, lo que dificulta en extremo la ubicación, además, de la gran masa de material que existe en su interior, lo que le otorga una enorme inercia de material.

Si se quisiera pensar en vaciar la celda lo único disponible serían los mismos transportes con que se la llenó y estos están contruidos con materiales combustibles, además, de un posible incendio de estos equipos y la propagación del material caliente o brasas a otros equipos o instalaciones, los tiempos de vaciados serían muy grandes, se puede pensar de un par de meses. También hay que pensar en donde se va a colocar todo el material que se está sacando del interior de la celda.

Las celdas también cuentan, al igual que la mayoría de los silos, con sistemas de control de temperatura y sistemas de ventilación forzada.

El mejor sistema de protección y la mejor técnica para combatir un incendio en el interior de una celda es que nunca ocurra, pues ocurrido un principio de incendio o un corazón caliente en el interior de la pila, lo que se puede hacer es muy poco por no decir nada.

3.12) Incendio en el Almacenamiento de Envases

Cuando los combustibles sólidos disgregados se encuentran en envases y éstos se almacenan, a su vez, atendiendo a los criterios habituales de organización de los almacenes, no es necesario considerar medidas especiales de extinción para caso de incendio, siempre que el envase sea el adecuado al producto, para evitar combustiones espontáneas.

Sin embargo, el tipo de envase deben considerarse como incremento de la carga térmica del almacenamiento que, a veces, puede ser muy importante.

Con carácter general, los sistemas fijos de rociadores automáticos constituyen el medio más eficaz de lucha contra incendios, especialmente si los envases son de material combustible.

3.13) Sistema de Ventilación

Uno de los parámetros que se pueden controlar para minimizar el efecto de la combustión es mediante la ventilación del material ensilado, tanto sea en silos como en celdas.

La ventilación se lleva el calor que se genera en el proceso de oxidación y en la descomposición bacteriana, en el caso de materiales orgánicos, además, si se ventila con aire seco, también se retiraría humedad del material.



Sistema de distribución de aire



Ventilador externo desmontable

Los sistemas de ventilación para celdas son similares, salvo que los conductos de ventilación están incorporados en el piso, y no sobresalen o están expuestos como en los silos.

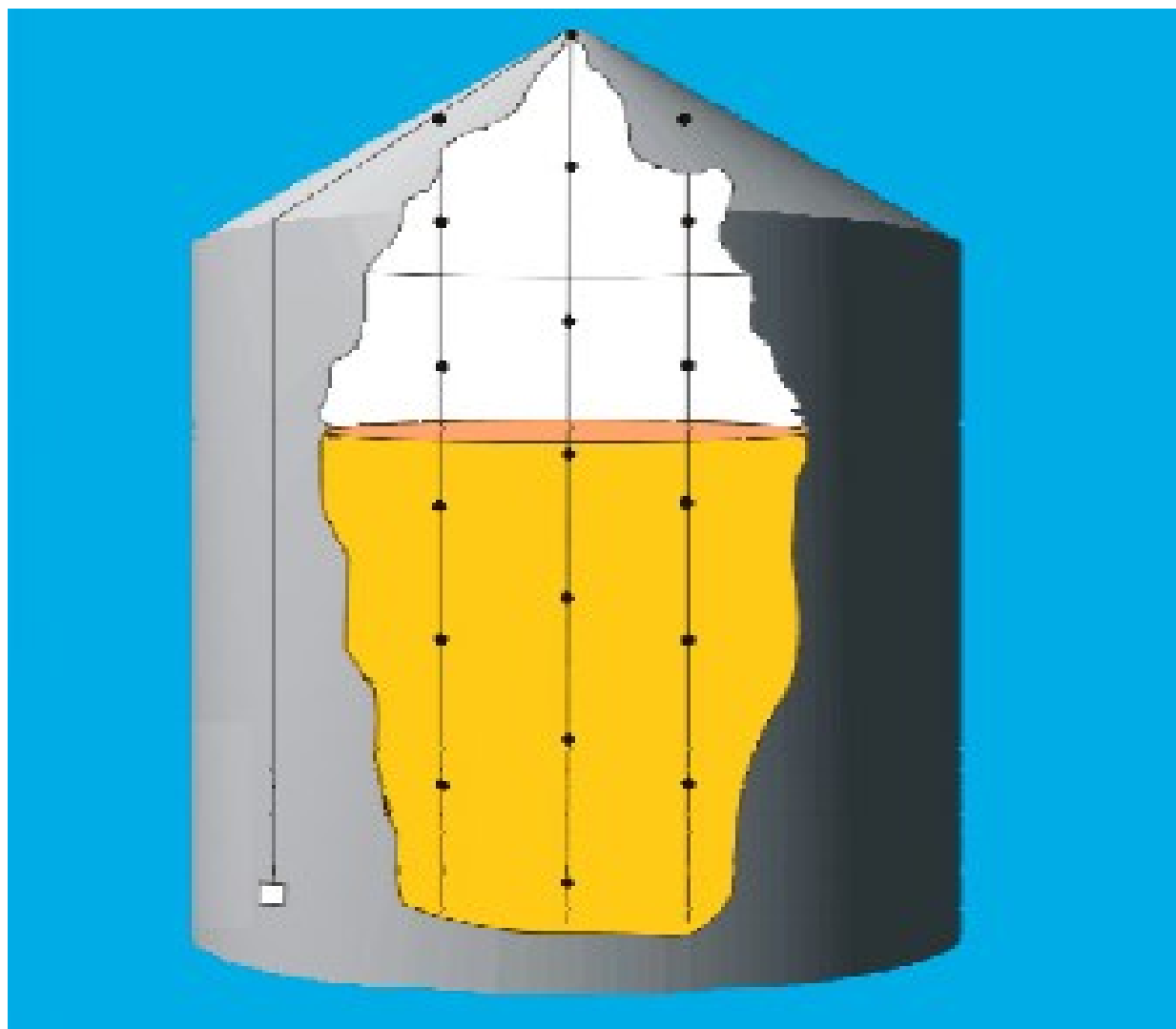
3.14) Sistema de Control de Temperatura

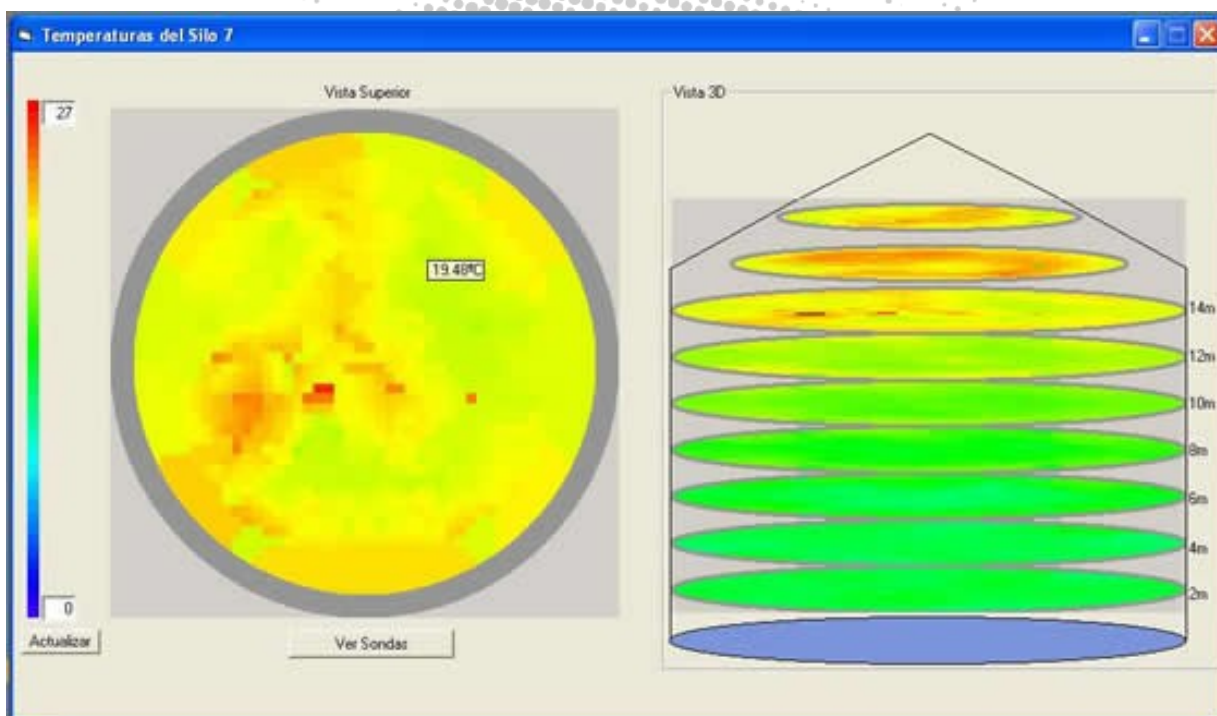
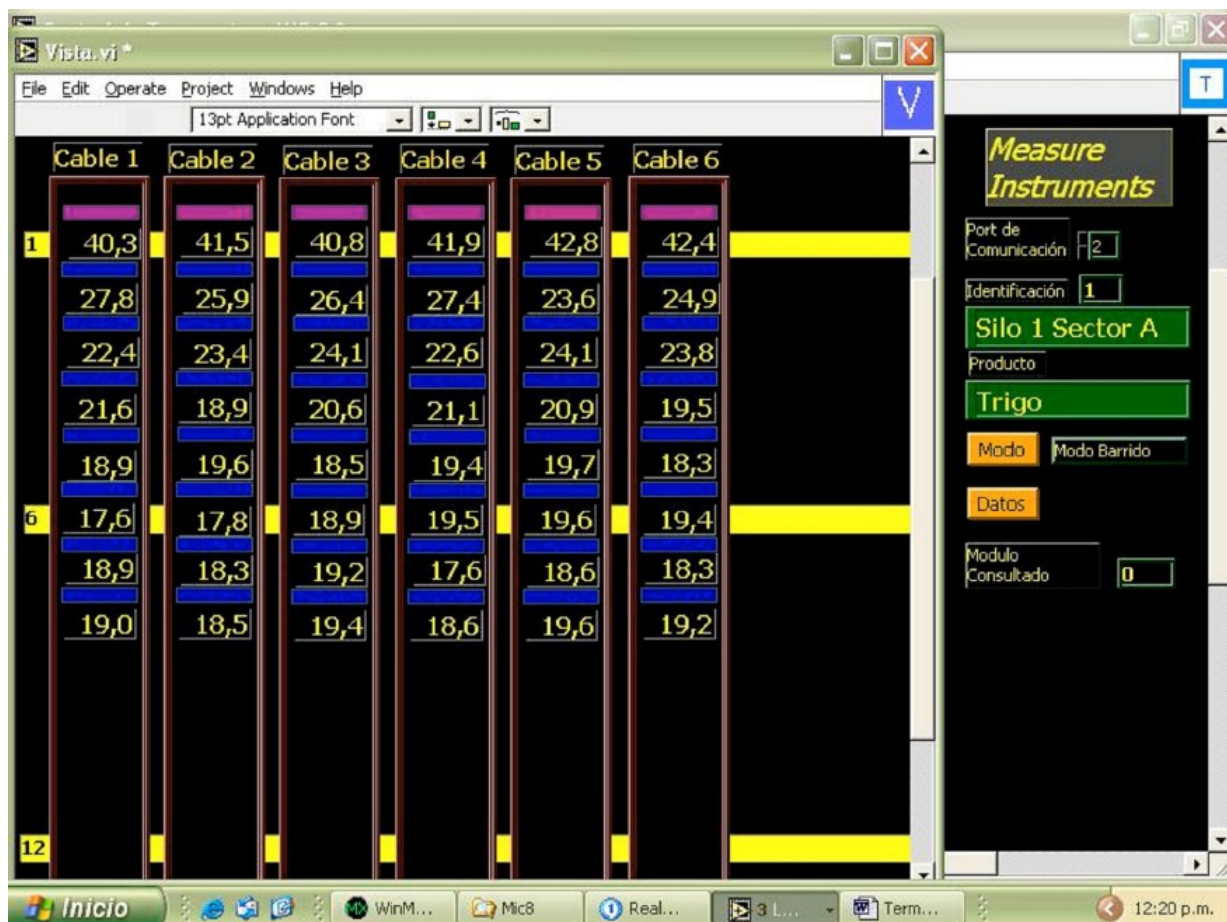
Como elemento de prevención, en todas las celdas y en casi todos los silos, se instalan sistemas de medición de temperatura en la pila del material, llamada termometría.

Los sistemas de medición constan de cables de acero que tienen montadas termocuplas a lo largo del mismo. Estos cables se cuelgan del techo separados una distancia tal que el alcance de medición de la termocupla cubra toda la superficie del almacenamiento. Como cada cable tiene colocado a lo largo varias termocuplas, con estos sistemas se logra una medición de temperatura tridimensional del material almacenado.

Los sistemas miden en forma permanente y automatizada, y envían los datos a una PC que los procesa y muestra de diferentes formas.

También existen sistemas manuales de medición de temperatura, pero debido a que hay que introducir el termómetro digital en la pila de material con el empleo de una lanza que se va alargando agregando tramos hasta alcanzar el punto de medición en el interior de la pila, el proceso es lento, se necesita de mucha fuerza y poco confiable, pues no se pueden medir muchos puntos. Sirve a lo sumo de control.





4) COMBUSTIBLES SÓLIDOS DISGREGADOS PULVERULENTOS

Del mismo modo que el estado de disgregación no pulverulenta de productos combustibles sólidos introduce un nuevo factor de perturbación en el incendio de tales productos, como lo es la combustión espontánea; cuando dichos productos se encuentran en estado pulverulentos, además, de esa posibilidad aparece otro peligro asociado, muy importante: la explosión.

En los procesos y almacenamientos de sólidos combustibles pulverulentos, además, del incendio normal, pueden darse otros dos fenómenos:

- El incendio por combustión espontánea.
- La explosión, originada, casi siempre, por una deflagración del polvo en el aire.

5) INCENDIO DE SÓLIDOS DISGREGADOS PULVERULENTOS

Las medidas de prevención y lucha contra incendios de los combustibles sólidos pulverulentos coinciden, en gran parte, con las ya examinadas anteriormente para materiales granulados. Sin embargo, a aquellas consideraciones deben añadirse algunas más, peculiares de los polvos.

Los polvos de productos combustibles que no se encuentran dispersos en una nube, si entran en combustión y existe el suficiente comburente para mantenerla, desarrollarán un incendio semejante al del producto disgregado no pulverulento.

En el caso del polvo que está acumulado en capas, montones, silos o cualquier otro tipo de depósito, la velocidad de propagación del incendio será la correspondiente a la naturaleza del producto y su propagación tendrá lugar entre partículas individualizadas. Como la cantidad de polvo por unidad de volumen es mucho mayor que en una nube explosiva, el incendio de un cierto volumen de producto

liberará mucho más calor que la explosión de una nube del mismo tamaño, aunque la duración de la emisión del calor será mucho más larga.

5.1) Desarrollo del Incendio

El incendio de los polvos acumulados puede adoptar dos modalidades: con llama o con brasa; ello depende de las características del polvo (contenido de volátiles), la geometría del depósito y la facilidad de acceso de aire.

Las fuentes de ignición pueden ser las mismas que han sido citadas como iniciadoras de la explosión y, además, la combustión espontánea.

El tamaño de las partículas influye notablemente en la velocidad de propagación del incendio y en su distribución a través de la masa.

Si las partículas son muy finas, el incendio se extenderá sobre la superficie de la capa en contacto con el aire y, probablemente, entrará toda ella en combustión antes de que ésta se propague a las capas inferiores. Desde el punto de ignición origen del incendio se propagará éste a una velocidad que depende de si es requerido o no la formación de brasa para que continúe su propagación.

Si las partículas de polvo son más gruesas la propagación del incendio puede tener lugar simultáneamente por la superficie de la capa de polvo y en profundidad. La lucha contra el incendio puede adoptar las mismas modalidades que en los incendios convencionales en varios aspectos, pero es preciso recordar el estado peculiar del combustible. Cualquiera que sea el método que se utilice, debe ponerse el máximo cuidado para evitar que una perturbación en el estado de reposo del polvo pueda dar lugar a la formación de una suspensión del mismo en el aire, pues si llega a formarse la nube de polvo en presencia de la importante fuente de ignición que es el incendio, sería fácil que sobreviniera una explosión.

5.2) Extinción del Incendio

La aceptación del daño que puede producir el incendio es una alternativa posible y hasta frecuente en el incendio de polvos, y en tal caso, se permitirá la combustión del producto hasta que el incendio se agote. Sin embargo, la alternativa más frecuente será el intento de extinción, eligiendo el agente extintor más adecuado, en función de la naturaleza del polvo, su situación, presencia de otros equipos o materiales en las proximidades del incendio, disponibilidad de medios, etc.

5.2.1) Agua

El agente extintor de uso más frecuente es el agua, excepto en el caso de incendios de metales que reaccionan con ella (como el aluminio, magnesio) o en presencia de tensión eléctrica.

El agua actúa con eficacia en los incendios de polvos de origen vegetal y sintético (tales como plásticos), siempre aplicada en forma nebulizada o de fina pulverización.

Si la capa de polvo tiene una profundidad de más de un metro, el agua no penetrará en la masa de polvo, sino que se embarrará la superficie y el resto del agua se perderá sobre ésta. Es recomendable utilizar entonces aditivos humectantes con el agua.

5.2.2) Espuma

La espuma puede emplearse como agente extintor, pero tiene un uso muy limitado en este tipo de incendios, pues no puede penetrar en los depósitos de polvo y su acción sofocante, una vez extendida sobre la superficie del mismo, es pequeña, por la existencia de aire ocupando los huecos de la masa del polvo.

5.2.3) Polvo Químico Seco

El polvo químico seco también puede emplearse como agente extintor, pero siempre en circunstancias especiales. Su principal utilización está en los incendios de polvo de metales capaces de reaccionar con otros agentes extintores y, en general, muy reactiva. La aplicación suele ser manual, lo que significa que está limitada a incendios de pequeñas proporciones.

5.2.4) Anhídrido Carbónico y Nitrógeno

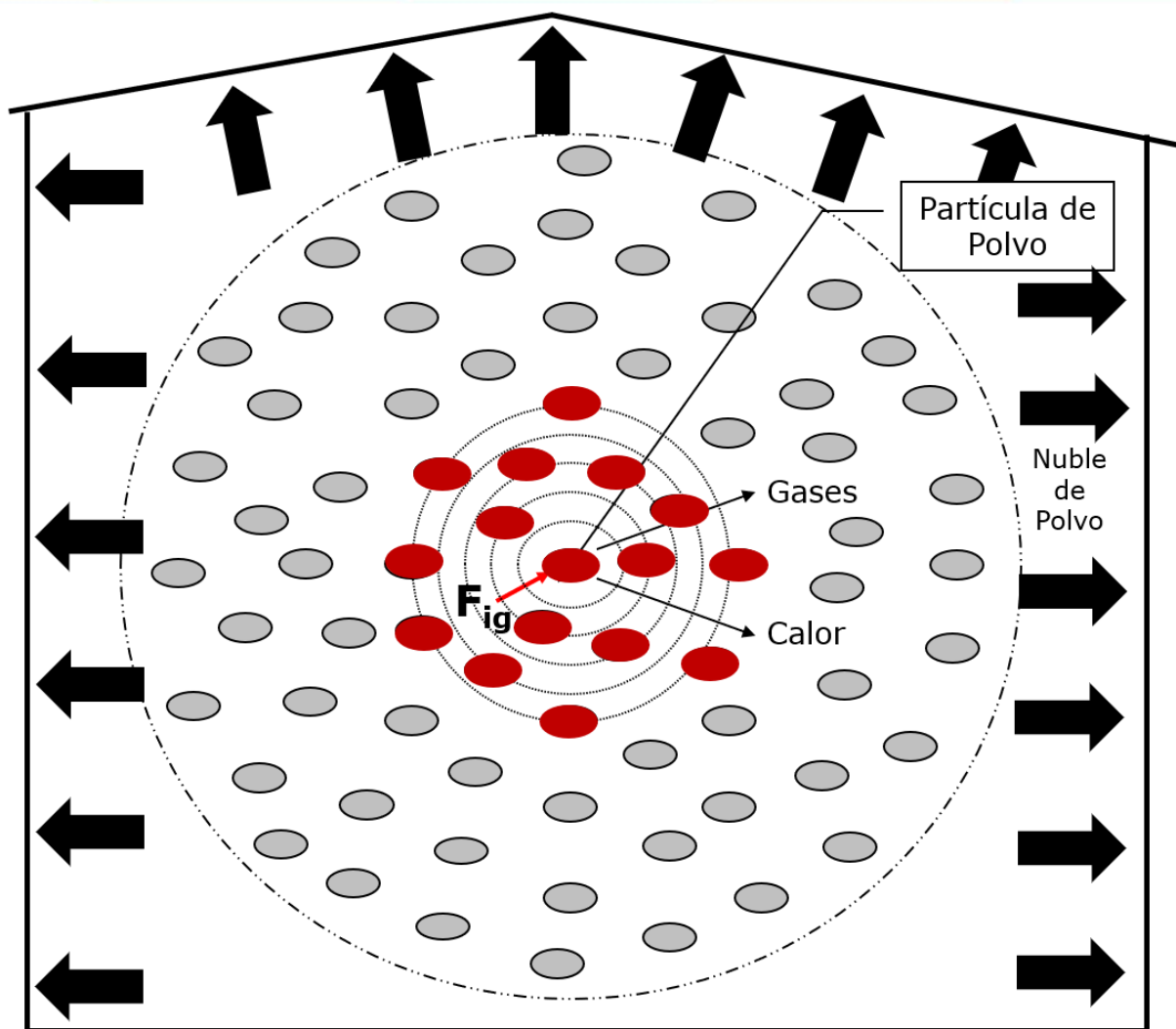
El anhídrido carbónico, el nitrógeno, e incluso el vapor de agua, también pueden utilizarse como agentes extintores de incendios de polvos, con la excepción de los polvos de metales reactivos y siempre que no se produzca turbulencias.

Son efectivos cuando la masa de polvo está confinada en un volumen cerrado al paso de gases (depósitos, silos, bodegas de buques, etc.). Para asegurar una completa extinción, el gas o vapor debe mantenerse durante un largo período de tiempo, que puede ser de días o semanas, y son precisas aportaciones suplementarias de gas o vapor para compensar las pérdidas inevitables que tendrán lugar.

6) EXPLOSIONES DE POLVOS

Las nubes de polvo combustible (partículas sólidas en suspensión en el aire) se comportan de manera similar a las mezclas de gas o vapor combustible y aire.

Si la mezcla está confinada y el grado de confinamiento es suficiente, se acumulan los productos gaseosos de la deflagración y se eleva la presión. Si se alcanza una presión suficiente para romper súbitamente el confinamiento (por rotura del recipiente o por rotura de las paredes del recinto), se libera el gas a alta presión y se produce, por tanto, una explosión.

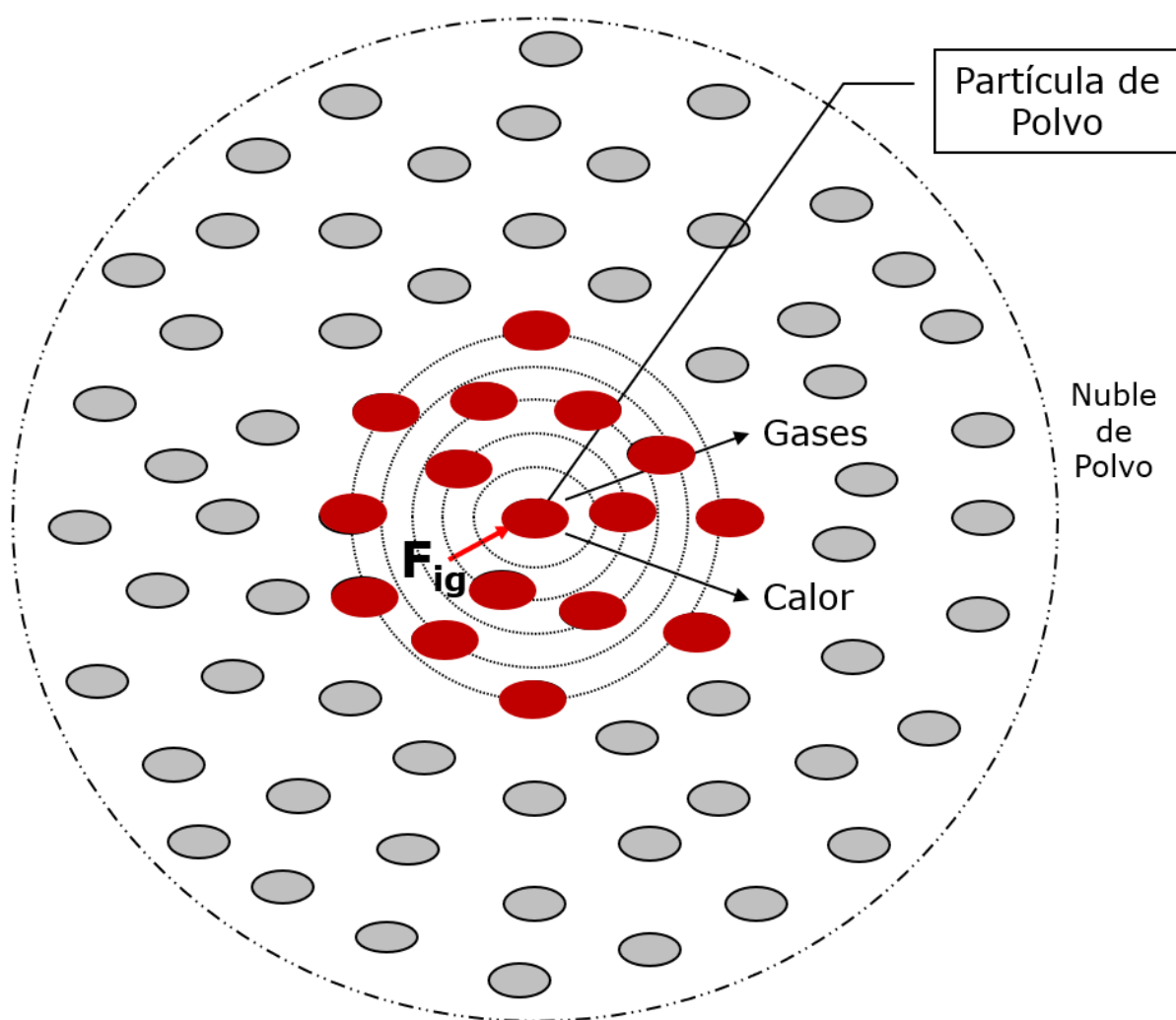


Se define a una "explosión de polvo" como una combustión de una nube de polvo que se propaga a sí misma, y se desarrolla lo "suficientemente rápida" como para que los gases y el calor producto de esta combustión generen en un ambiente lo "suficientemente confinado" una elevación de la presión interior a una velocidad tal como para producir la rotura del confinamiento y generar los efectos de una explosión.

6.1) Génesis de la Explosión de Polvo

El polvo es una sustancia con una extremadamente alta relación superficie/masa, es decir, tiene una gran superficie en relación con su diminuta masa. Si a una

partícula de polvo se le acerca una fuente de ignición, esta energía al comienzo calienta el polvo, le saca la humedad, lo piroliza y por consiguiente comienza a emitir gases combustibles que se mezclan con el aire circundante y generan una mezcla combustible, la fuente de ignición sigue calentando al combustible y a la mezcla combustible hasta que llegan a la temperatura de ignición, momento en el cual la fuente de ignición como todavía tiene energía suficiente, enciende la mezcla y produce la combustión de la mezcla de gas y aire.



Producto de esta combustión, se producen calor y gases. El calor que genera la combustión de la primera partícula actuará a modo de fuente de calor y fuente de

ignición de todas las partículas que la rodean, produciendo una combustión en cadena que enciende a toda la nube de polvo.

Al estar las partículas de polvo suspendidas en el aire y cerca una de otras, se produce una combustión de muy alta velocidad, que toma valores similares a la combustión de productos inflamables, es decir, una nube de polvo deflagra.

Los gases que generan la combustión de cada partícula, más el aumento de la temperatura del aire ($PV = \text{cte.}$) produce un aumento de la presión dentro del recinto donde se encuentra confinada esta nube de polvo, en forma rápida, produciendo la rotura del mismo y por consiguiente una explosión.

6.2) Factores que Influyen en las Explosiones de Polvo

Para que se produzca una "explosión de polvo" deben concurrir simultáneamente las siguientes condiciones:

- Polvo combustible en suspensión.
- Concentración de polvo en suspensión por encima del límite inferior de inflamabilidad (LII).
- El polvo debe tener una distribución de tamaños de partículas capaz de propagar la llama.
- Aire (oxígeno) u agente oxidante.
- Fuente de ignición de potencia adecuada (cumple la función de F_{ig} y F_{calor})
- Confinamiento de la nube de polvo.

En general, puede afirmarse que es más difícil que se inicie una "explosión de polvo" que una inflamación de gases o líquidos inflamables, pues las energías de ignición de los polvos son superiores (del orden de mJ) a las de los gases (del orden de los μJ).

6.2.1) Propagación de las Explosiones

Es lógico suponer que todas las condiciones mencionadas anteriormente no se van a cumplir simultáneamente en todos los puntos de una instalación en la que se maneje polvo. Sin embargo, 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, de no excesiva importancia y que, en principio, debería afectar sólo a un pequeño recinto y no ser grave.

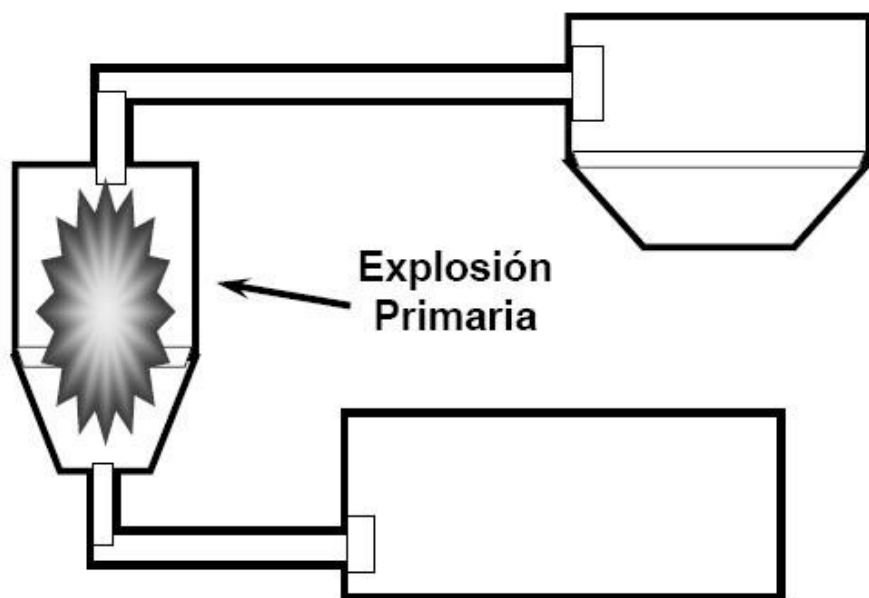
Ahora bien, esta explosión primaria genera ondas de presión que aumentarán la turbulencia del ambiente y favorecerá el que una cierta cantidad de polvo depositado o en tránsito por el lugar pase a la atmósfera en forma de nube.

Con ello se alcanzan de nuevo las condiciones para la explosión, y es la propia explosión primaria quien ceba o enciende (es decir, se transforma en la fuente de ignición) la nueva nube de polvo, generando así una nueva explosión llamada explosión secundaria.

Los efectos de esta segunda explosión (más potente y destructiva que la primera) que al propagarse puede dar lugar a sucesivas explosiones en diferentes partes de la instalación, son las realmente catastróficas, debido a la considerable energía que de forma repentina es capaz de liberar.

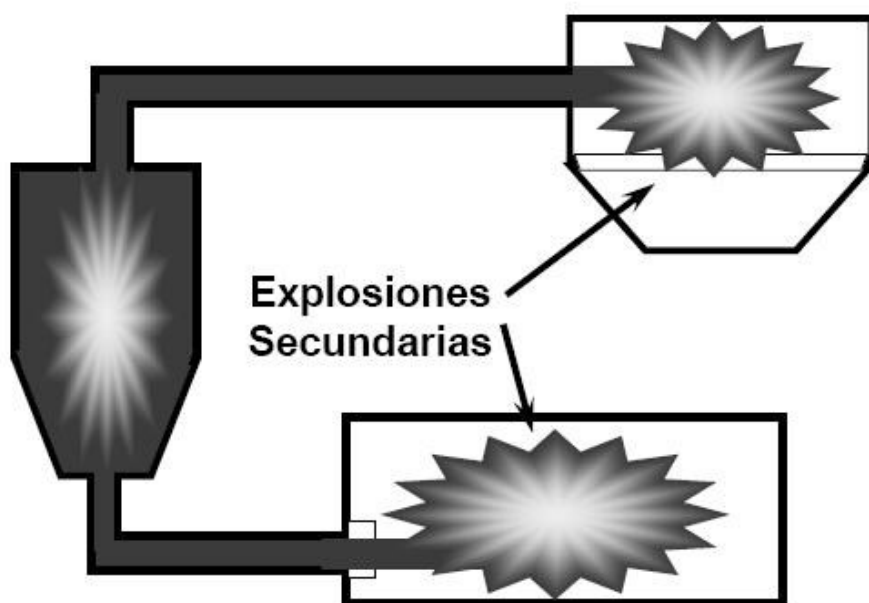
EXPLOSIÓN DE POLVO

Características y condicionantes



EXPLOSIÓN DE POLVO

Características y condicionantes



6.2.2) Dimensiones de las Partículas de Polvo

La combustión de una nube de partículas sólidas en suspensión en un gas oxidante sólo puede tener lugar en la superficie de contacto entre las partículas y el gas. Para una masa dada de polvo, cuanto más pequeño es el diámetro de las partículas, mayor es la superficie de contacto.

Cuanto menor es el tamaño de las partículas de polvo, más fácil es que la nube de polvo entre en ignición, puesto que es más íntima la interacción del combustible con el comburente. Es decir, la capacidad para explosionar está directamente relacionada con la superficie del polvo (relación entre la superficie de las partículas y su masa).

La dimensión de las partículas influye, también, sobre la velocidad de incremento de la presión, aumentando con su finura.

Al mismo tiempo, al disminuir el tamaño de las partículas, disminuye la concentración mínima necesaria, la temperatura de ignición y la energía requerida para que ésta comience.

Finalmente, la disminución del tamaño de las partículas aumenta la capacidad eléctrica de la nube de polvo, es decir, la carga eléctrica que puede acumular la nube, aumentando, por tanto, el riesgo de que se produzcan cargas electrostáticas. Así pues, el tamaño de las partículas del polvo influye en la explosividad de la nube de polvo, de modo que la disminución de su tamaño incrementa muy notablemente los factores de riesgo.

La disminución de las partículas de polvos permite que la nube permanezca durante más tiempo en suspensión y con ello la posibilidad de una explosión.

6.2.3) Concentración

En las nubes de polvo, para que tenga lugar la combustión se requiere una concentración mínima de materia en el aire, denominada límite inferior de

inflamabilidad, que es el equivalente al de las mezclas gaseosas. Esta concentración se mide en masa de polvo por unidad de volumen (mg/l)

Como sucede con los gases y vapores inflamables, existen unas concentraciones límites (límites de inflamabilidad) del polvo, dentro de las cuales la explosión es posible.

Los límites de inflamabilidad suelen expresarse en masa del polvo por unidad de volumen de aire y son: el límite inferior de inflamabilidad (LII) y el límite superior de inflamabilidad (LSI).

El LII ha sido determinado, en ciertas condiciones de ensayo, para muchos polvos, aunque el valor medio puede desviarse del que se presenta en situaciones reales por la influencia que en la inflamabilidad tienen otros parámetros, como ya se ha indicado (tamaño del polvo, pureza, concentración de oxígeno, potencia de la fuente de ignición, etc.).

El LSI no se ha determinado, debido, sobre todo, a dificultades experimentales; se plantea además, la cuestión de si el LSI está claramente definido y aún si es de verdadera utilidad.

En general, el límite inferior de inflamabilidad de los polvos orgánicos de partículas finas es de alrededor de 20 mg/l. Pero este límite teórico se ve disminuido, en la práctica, por la tendencia del polvo a depositarse y a levantarse de nuevo súbitamente.

6.2.4) Características de Deflagración de Polvos Combustibles

Para cada polvo la tabla muestra las medias del tamaño de las partículas de las materias ensayadas, así como los siguientes resultados de los ensayos obtenidos en un recipiente de 1 cm³: la concentración mínima de material, la presión máxima creada por la explosión ($P_{\max}$) y la velocidad máxima de aumento de presión $(dP/dt)_{\max}$. También se refleja el valor de K_{st} .

Producto	Media del tamaño partículas	Concentración mínima de material	P_{max}	$(dP/dt)_{max}$	K_{st}
	μ	gr/m ³	bar	bar/s	bar m/s
Productos Agrícolas					
Celulosa	33	60	9,7	229	229
Pulpa de celulosa	42	30	9,9	62	62
Corcho	42	30	9,6	202	202
Maíz	28	60	9,4	75	75
Clara de huevo	17	125	8,3	38	38
Leche en polvo	83	60	5,8	28	28
Leche descremada seca	60	---	8,8	125	125
Harina de soja	20	200	9,2	110	110
Almidón de maíz	7	---	10,3	102	202
Almidón de arroz	18	60	9,2	101	101
Almidón de trigo	22	30	9,9	115	115
Azúcar	30	200	8,5	138	138
Lactosa	27	60	8,5	82	82
Azúcar de remolacha	29	60	8,2	59	59
Tapioca	22	125	9,4	62	62
Cebada	41	125	9,8	140	140
Harina de trigo	29	---	10,5	205	205
Polvos Carbonosos					
Carbón activado	28	60	7,7	44	44
Carbón de madera	14	60	9,0	10	10
Carbón bituminoso	24	60	9,2	129	129
Coque de petróleo	15	125	7,6	47	47
Negro de carbón	< 10	60	8,4	121	121
Lignito	32	60	10,9	151	151
Turba 15% H ₂ O		58	10,9	60	157
Turba 22% H ₂ O		46	8,4	25	69
Hollín de pino	< 10	---	7,9	26	26
Polvos Químicos					
Acido adípico	< 10	60	8,0	97	97
Antraquinona	< 10	---	10,6	364	364

Acido ascórbico	39	60	9,0	111	111
Acetato cálcico	92	500	5,2	9	9
Acetato cálcico	85	250	6,5	21	21
Estearato cálcico	12	30	9,1	132	132
Carboximetilcelulosa	24	125	9,2	136	136
Dextrina	41	60	8,8	106	106
Lactosa	23	60	7,7	81	81
Estearato de plomo	12	30	9,2	152	152
Metilcelulosa	75	60	9,5	134	134
Paraformaldehido	23	60	9,9	178	178
Ascorbato sódico	23	60	8,4	119	119
Estearato sódico	22	30	8,4	123	123
Azufre	20	30	6,8	151	151
Polvos Metálicos					
Aluminio	29	30	12,4	415	415
Bronce	18	750	4,1	31	31
Hierro carbonilo	< 10	125	6,1	111	111
Magnesio	28	30	17,5	508	508
Zinc	10	250	6,7	125	125
Zinc	< 10	125	7,3	176	176

6.2.5) Impurezas

Entre las impurezas, cuya presencia influye de modo notable en la explosividad de la nube de polvo, están las siguientes:

- **Humedad**

La humedad contenida en las partículas de polvo hace aumentar la temperatura necesaria para la ignición como consecuencia del calor absorbido por la evaporación del agua presente.

Sin embargo, la humedad del aire que forma la nube de polvo no tiene efecto significativo en la deflagración, una vez alcanzada la temperatura de ignición.

Desde un punto de vista práctico, sin embargo, la humedad contenida en el polvo no puede considerarse como un medio preventivo efectivo contra las explosiones, porque la mayor parte de las fuentes de ignición proporcionan calor más que suficiente para evaporar el agua presente y llevar el polvo al estado de ignición.

Por otra parte, para que la humedad impidiera la ignición del polvo a partir de fuentes comunes de ignición, éste tendría que estar tan empapado que no podría formarse una nube.

- **Polvos Inertes**

La presencia de un sólido inerte en estado pulverulento reduce la combustibilidad de los polvos explosivos porque absorbe calor, pero la cantidad que sería necesaria para impedir la explosión se considera generalmente mayor que las concentraciones que puedan encontrarse normalmente o puedan tolerarse como materia extraña.

La adición de polvos inertes reduce la velocidad de aumento de la presión y aumenta el valor del LII. Esta circunstancia hace que, en algunos casos, se utilice como medida preventiva la pulverización con polvos inertes, para evitar explosiones. Así, en minas de carbón se emplea la pulverización de roca en las entradas de la mina (en proporción no inferior al 65% del total de polvo previsto) para evitar la explosión del polvo combustible del carbón.

- **Gases Inertes**

La presencia de gases inertes en la nube explosiva de polvo afecta de modo directo a la concentración de oxígeno y, por ello, a la facilidad de ignición del polvo.

Por esto, los gases inertes se emplean como medio preventivo de las explosiones para que actúen como diluyentes del oxígeno hasta alcanzar concentraciones de éste demasiado bajas como para que se mantenga la combustión.

En tales casos es muy importante elegir cuidadosamente los gases inertes apropiados para que no incorporar algún reactivo con el polvo. Algunos polvos metálicos reaccionan con el dióxido de carbono o el nitrógeno, por ejemplo, y deberían utilizarse el helio o el argón como diluyentes apropiados.

- **Gases Inflamables**

La presencia de gases inflamables en la nube de polvo, aún en muy pequeña cantidad, facilita la ignición del aerosol y refuerza la violencia de la explosión, sobre todo con bajas concentraciones de polvo.

Han llegado a producirse así explosiones muy violentas, con más frecuencia de lo que cabría esperar, considerando la fracción de la mezcla representada por el vapor inflamable. Incluso, se han producido explosiones en mezclas aire-polvo combustible-vapor inflamable, en las que la porción de la mezcla aire-vapor inflamable estaba por debajo de su límite de inflamabilidad.

Estas circunstancias pueden darse cuando se produce el secado de un polvo combustible que contiene un líquido cuya evaporación da lugar a la aparición de vapor inflamable. En tales casos es preciso tomar medidas de prevención especiales.

6.2.6) Concentración de Oxígeno

Las variaciones de la concentración de oxígeno afectan a la facilidad de ignición de las nubes de polvo y también, muy notablemente, a las presiones de su explosión.

Al disminuir la presión parcial de oxígeno, aumenta la energía necesaria para que se produzca la ignición, la temperatura de ignición también aumenta y las presiones máximas de explosión disminuyen.

6.2.7) Turbulencia

La combustión del polvo se produce en las superficies de las partículas. La velocidad de reacción, por tanto, depende de la íntima mezcla de polvo con el oxígeno. Por esta razón, la mezcla del polvo y aire en estado turbulento produce explosiones más violentas de las que se producen en mezclas relativamente inactivas.

6.2.8) Potencia de la Fuente de Ignición

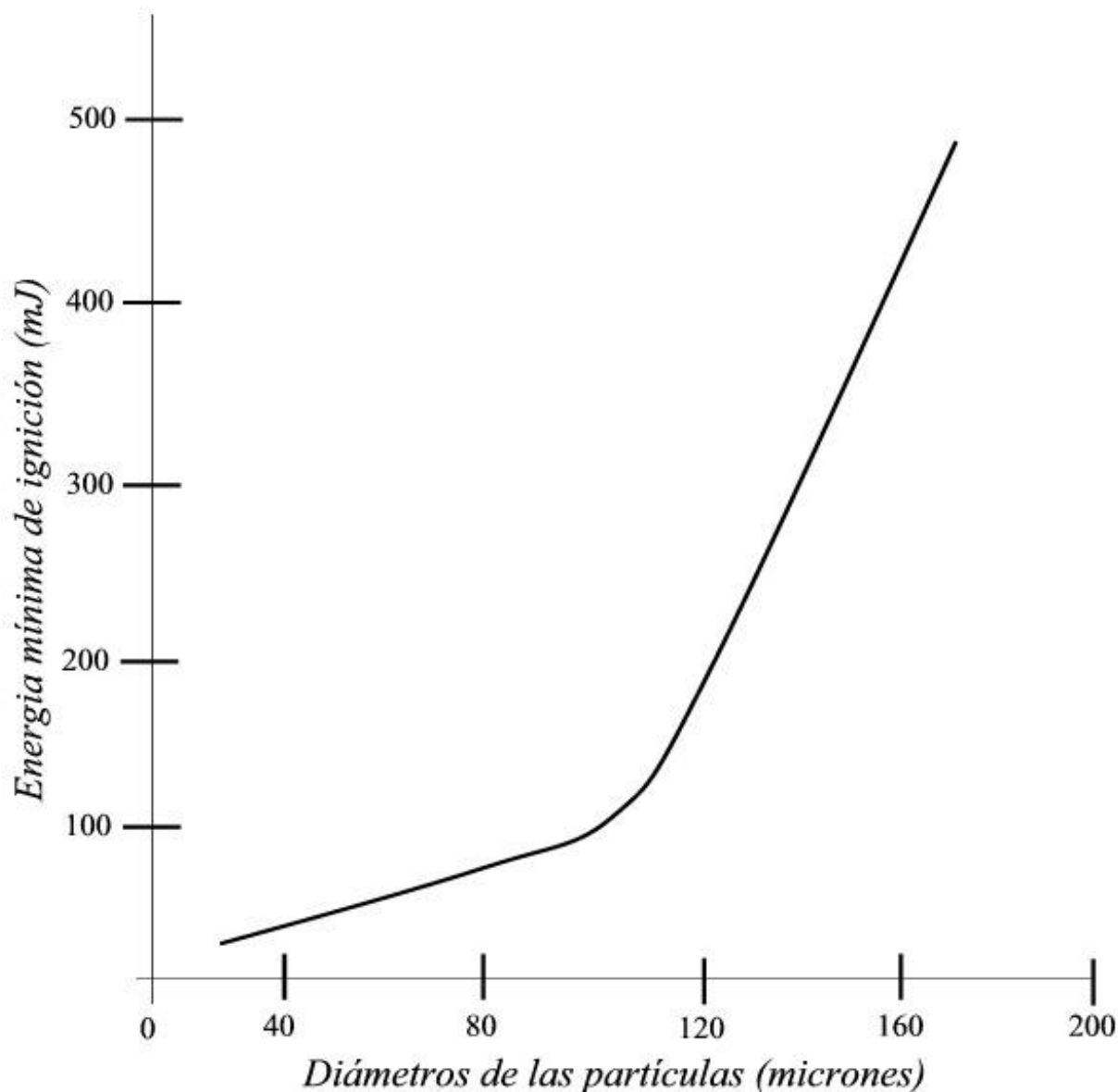
La energía mínima de ignición depende de los factores siguientes:

- La naturaleza del polvo combustible.
- La concentración de polvo en el aire.
- El tamaño de las partículas.
- El contenido de humedad de las partículas.

La energía mínima de ignición de las nubes de polvo es generalmente cien veces superior a la de las mezclas gaseosas. De todas formas, la mayor parte de las fuentes de ignición comunes superan la energía necesaria.

En general, la concentración más favorable a la ignición es entre cinco y diez veces superior al límite inferior de inflamabilidad, según el tipo de polvo.

La energía mínima de ignición varía extraordinariamente con el tamaño de las partículas.



Efecto del diámetro de las partículas en la energía mínima de ignición

La humedad absorbida por las partículas generalmente tiene el efecto de aumentar la temperatura y la energía mínima de ignición. Sin embargo, el contenido de humedad en el aire no tiene efecto significativo en el desarrollo de la deflagración, una vez que se la ignición ha tenido lugar.

Las nubes de polvo pueden entrar en combustión por la acción de llamas abiertas, luces, lumbres de un cigarrillo, arcos eléctricos, filamentos incandescentes de bombillas, chispas procedentes de fricción mecánica, conducciones de vapor de

agua y otras superficies calientes, chispas originadas por cargas estáticas, calentamiento espontáneo, soplete de corte y soldadura o por las chispas procedentes de estas operaciones, así como otras fuentes comunes de calor.

La mayor parte de las temperaturas necesarias para la ignición de las nubes de polvo se sitúan entre los 300°C y los 600°C, y la gran mayoría de las chispas cuya energía de ignición es conocida está entre los 10 y 40 milijulios (de 20 a 50 veces más de energía de ignición que los vapores inflamables).

Como la temperatura y la energía de ignición necesarias para hacer explosionar los polvos son mucho más bajas que las producidas por la mayor parte de las fuentes de ignición comunes, no es sorprendente que se hayan producido explosiones de polvos causadas por toda clase de fuentes de ignición. La eliminación de cualquier fuente de ignición posible es, pues, un principio básico de la prevención de explosiones de polvos.

La ignición en el centro geométrico del recipiente produce, en general, la deflagración más violenta.

6.2.9) Suspensión del Polvo

Puesto que antes de que se produzca la explosión del polvo debe estar presente una nube o suspensión del mismo en el aire, sería esta presencia el primer condicionante para que exista la explosión.

En un establecimiento o almacén industrial la nube de polvo puede dispersarse antes (prevención de la explosión) o después de iniciada su ignición (control o supresión de la explosión).

Por otra parte, la formación de la suspensión de polvo puede darse o bien por una acción mecánica independiente, o bien por una pequeña explosión previa que crea nuevas y más importantes suspensiones que deflagran a continuación (explosión secundaria).

6.2.10) Temperatura Ambiental

La propagación de la llama a través de la suspensión del polvo es más violenta si la temperatura del polvo y la nube son superiores a la atmosférica, siempre que no se alteren las propiedades químicas. Estas circunstancias pueden darse en almacenes y establecimientos industriales (por ejemplo en secaderos).

6.2.11) Presión Ambiental

En general, las explosiones tendrán lugar siempre en condiciones de presión ambiental, pues no se considera como variación de esta presión la elevación que tiene lugar en el proceso de la explosión.

Por ello, casi todos los ensayos se realizan a presiones ambientales coincidentes con la atmosférica. Sin embargo, de algunos ensayos iniciados con presiones distintas se ha deducido la influencia que ésta tiene sobre la explosión. Por ejemplo, en un ensayo con polvo de carbón, se comprobó que una presión incrementada en el 100% de la ambiental, aumentó en un 75% la presión máxima de la explosión.

6.3) Poder de Destrucción de las Explosiones de Polvo

Los parámetros que definen la violencia o poder de destrucción de una explosión de polvo son:

- Presión máxima desarrollada.
- Velocidad de aumento de presión.
- Duración de la sobrepresión.
- Grado de confinamiento del volumen de explosión.
- Concentraciones de oxígeno.

6.3.1) Presión Máxima de Explosión

La presión máxima de una deflagración de polvo depende de la velocidad química de la combustión, es decir, de los factores siguientes:

- Naturaleza del polvo combustible.
- Concentración de la nube.
- Tamaño de las partículas.
- Temperatura ambiental.
- Presión ambiental.
- Turbulencia.

La presión máxima tiene lugar, en general, con una concentración entre cinco y diez veces superior al límite inferior de inflamabilidad (LII).

Por ejemplo, el polvo de ácido benzoico tiene un límite inferior de inflamabilidad a 139 mg/l y su presión máxima de deflagración tiene lugar aproximadamente una concentración de 800 mg/l. En conjunto, las presiones máximas tienen lugar a concentraciones comprendidas entre 200 y 1.000 mg/l, según el caso.

La presión máxima aumenta de manera apreciable a medida que disminuye el tamaño de las partículas. El mayor aumento se produce cuando el diámetro de las partículas baja de 420 a 200 μm .

El valor de la presión máxima de explosión (medida en ensayos de laboratorio) de la gran mayoría de los polvos, está comprendido entre 3,5 kg/cm² y 8,5 kg/cm², con pocas excepciones.

El valor más frecuente de la presión máxima de explosión es, sin embargo, de 6 kg/cm² y 7 kg/cm².

Este valor, obtenido en condiciones de ensayo, está sujeto a la influencia de los diferentes condicionantes que se dan en situaciones reales. Proporciona, no

obstante, una indicación sobre el orden de magnitud de la presión máxima que puede preverse.

Teniendo en cuenta que un muro de ladrillos ordinario de 30 cm de espesor puede destruirse con una sobrepresión de $0,07 \text{ kg/cm}^2$, es evidente que es práctica construir un edificio cuyos elementos resistentes y de cerramiento sean capaces de soportar las sobrepresiones debidas a la presión máxima de la explosión previsible. En muchos casos, el grado de destrucción producida por las deflagraciones del polvo no alcanza el nivel previsible, porque no existe una dispersión uniforme a través de todo el volumen de explosión. Es raro que se incendie la nube de polvo en las condiciones óptimas de concentración (y de los otros factores influyentes) para que se alcancen en la práctica las máximas presiones de explosión calculadas.

6.3.2) Velocidad de Aumento de Presión

Al igual que la presión máxima, la velocidad máxima de elevación de presión tiene lugar, en general, con una concentración de entre cinco y diez veces superior al límite inferior de inflamabilidad.

La velocidad máxima de elevación de presión aumenta, de una manera más acentuada que la presión máxima, conforme disminuye el tamaño de las partículas. El mayor aumento se produce cuando el diámetro de las partículas baja de $50 \mu\text{m}$.

6.3.3) Efectos de la Velocidad de Aumento de Presión

La velocidad del aumento de la presión puede definirse como la relación entre el aumento de la presión de explosión y el período de tiempo en que ésta tiene lugar. Es el factor más importante para evaluar la peligrosidad de un polvo dado y determinar el grado de destrucción que puede producir su deflagración.

También es un dato importante para calcular las dimensiones de los elementos de ventilación en caso de explosión.

Los valores de la velocidad del incremento de presión medidos en laboratorio varían mucho más que los de la presión máxima alcanzada, según la naturaleza del producto.

Esta dispersión alcanza desde un valor tan bajo como el de 7 kg/cm²/seg (para polvos de huesos o de cadmio) hasta el de 1.400 kg/cm²/seg (para el aluminio atomizado o en copos). Sin embargo, una gran mayoría de polvos deflagran con velocidades del incremento de la presión de explosión comprendidas entre 250 y 750 kg/cm²/seg.

6.3.4) Duración de la Sobrepresión

Este parámetro corresponde al tiempo durante el cual las paredes del recipiente o recinto sufren una presión superior a su presión de trabajo.

El tiempo durante el que actúa la sobrepresión sobre el espacio circundante está íntimamente relacionado con la presión máxima y con la velocidad máxima de aumento de presión. El área que queda debajo de la curva presión-tiempo determina el impulso total ejercido. Es el impulso total, no la fuerza ejercida en un momento dado, lo que determina la magnitud de la destrucción. La relación entre la destructividad y el impulso total explica en parte por qué las explosiones de polvos, que por lo general tienen velocidades de aumento de presión más bajas que las explosiones de gases, pueden ser más destructivas.

6.3.5) Efectos del Confinamiento

Cuando se produce una explosión de polvo, se forman productos gaseosos y se libera calor que hace aumentar la temperatura del aire contenido en el recinto. Como los gases se expanden al calentarse, se ejercen presiones destructivas en el espacio circundante, a no ser que se proporcionen suficientes áreas de ventilación

para evacuar los gases calientes antes de que se alcancen niveles de presión peligrosos.

6.3.6) Productos en Fase Condensada

La deflagración de polvos genera cantidades considerables de productos en fase condensada a muy elevadas temperaturas, tales como sólidos incandescentes, alquitranes y aceites. Estos productos se adhieren a las superficies con las que entran en contacto, produciendo daños por calor y, con frecuencia, incendios secundarios.

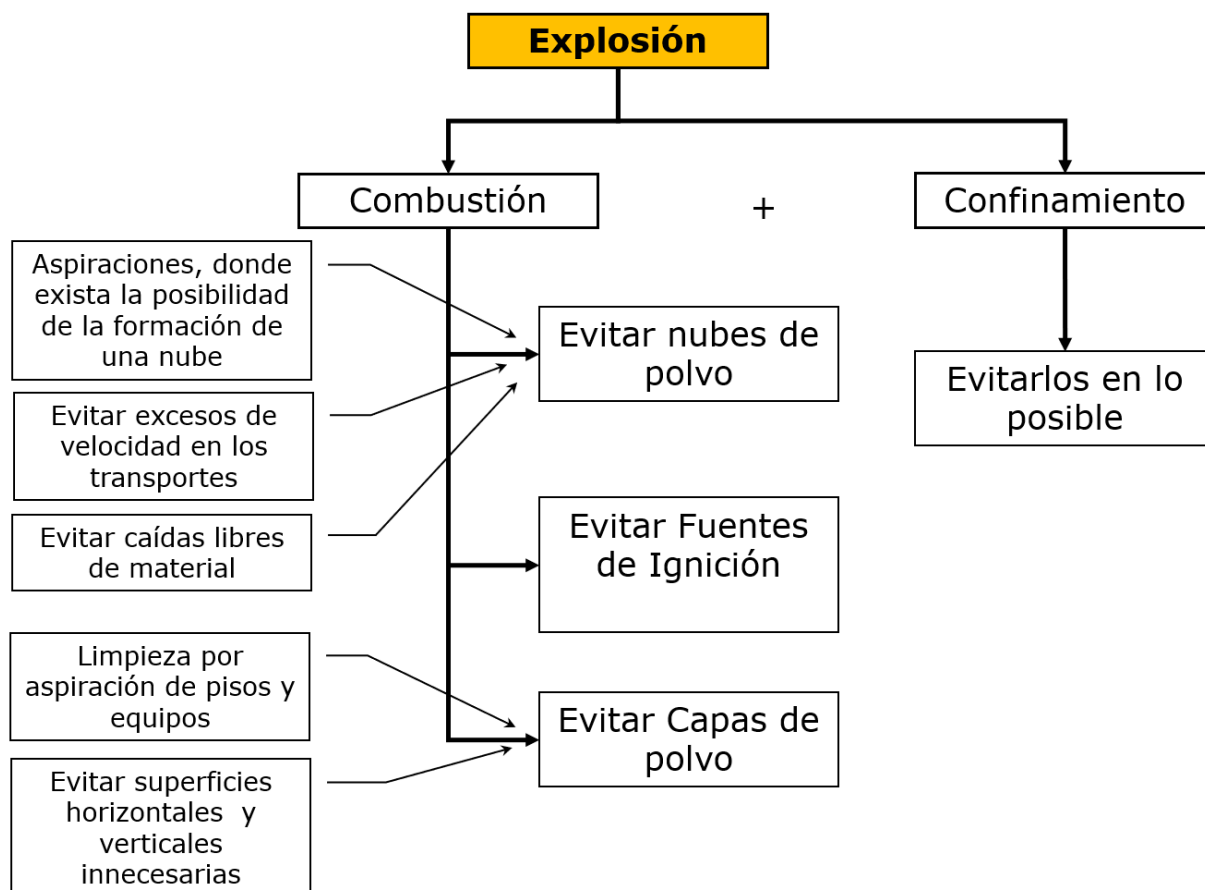
6.4) Desarrollo de Medidas Preventivas

La prevención estudia la manera de evitar que sucedan los hechos, en este caso en particular, una explosión de polvo.

Para evitar una explosión de polvo nada mejor que evitar que se den las condiciones para que exista una deflagración, en principio, y posteriormente la explosión.

Las condiciones que deben concurrir simultáneamente para que se produzca una explosión de polvo son:

- Polvo combustible en suspensión.
- Concentración de polvo en suspensión por encima del límite inferior de inflamabilidad (LII).
- El polvo debe tener una distribución de tamaños de partículas capaz de propagar la llama.
- Aire (oxígeno) u agente oxidante.
- Fuente de ignición de potencia adecuada.
- Confinamiento de la nube de polvo.



6.4.1) Polvo Combustible en Suspensión

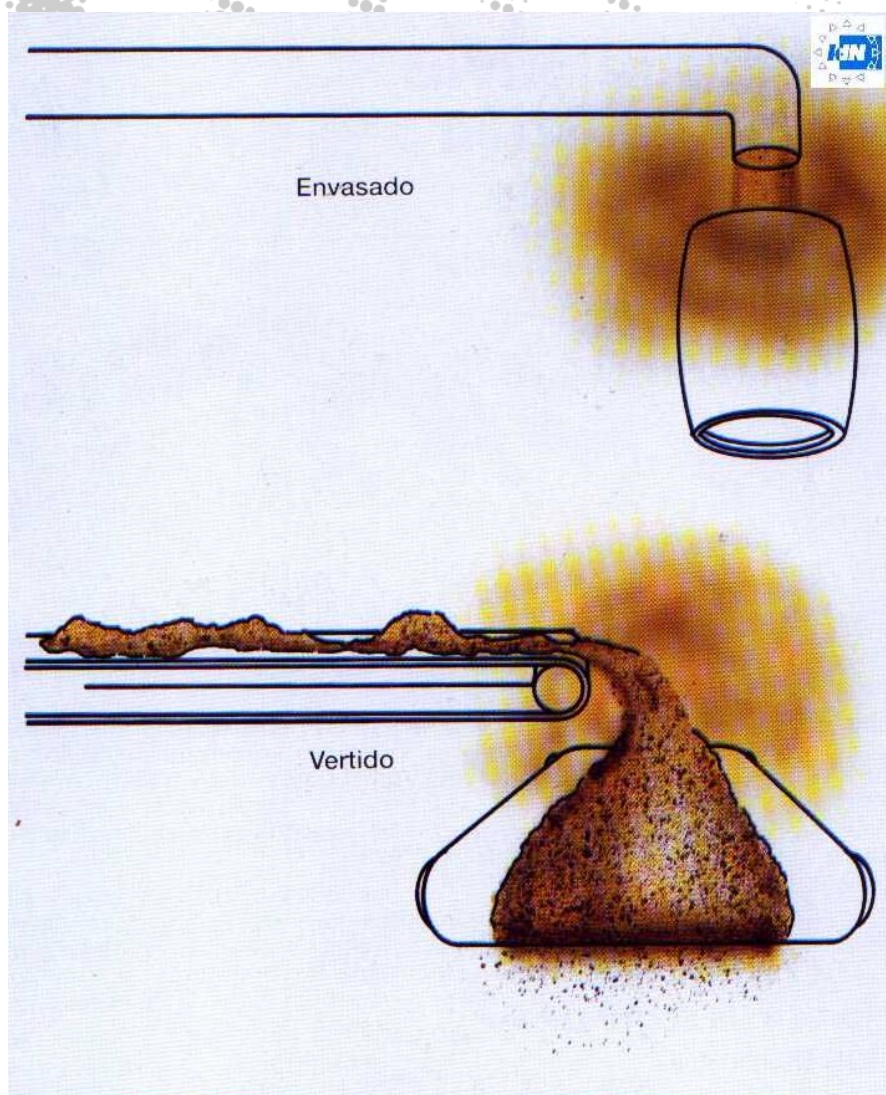
No hay "explosión de polvo" si no hay un ambiente lo suficientemente confinado, o no existe polvo en suspensión, por más que haya un ambiente confinado y fuentes de ignición.

El proceso primario de la prevención se basa entonces en evitar nubes de polvos y como segunda medida preventiva pero no menos importante, evitar la generación de todo tipo de fuentes de ignición; y para evitar en efecto de cadena o de mecha, mantener los más altos estándares de limpieza.

En la industria el peligro más grande está durante el transporte de este tipo de materiales, aunque también es importante tener en cuenta los depósitos, dado que por un accidente el polvo depositado puede pasar al ambiente y formar una mezcla "explosiva".

Estos materiales están continuamente en movimiento, la presencia de polvo es inevitable, es más, el polvo es la materia prima o una parte importante de esta, por ende no se puede evitar o eliminar, pero sí se puede trabajar para que no esté en suspensión en lugares que no debería.

El tratamiento de las nubes de polvo tiene básicamente dos puntos fuertes a saber: no generar nubes de polvos, es decir, por ejemplo, mover los materiales pulverulentos en equipos adecuados y a velocidades adecuadas, como ser una harina se debería mover en equipos cerrados y no mediante una cinta de transporte abierta, evitar caídas libres excesivas, evitar corrientes de aire fuertes, etc.; y segundo es instalar en los puntos del proceso donde se generan nubes de polvo equipos de extracción del polvo en suspensión.



Aunque siempre será inevitable alguna dispersión del polvo en el aire y no puede pretenderse alcanzar una total ausencia de polvo suspendido, el cuidadoso diseño de la planta o almacén puede reducir y minimizar el volumen de polvo en suspensión. Algunos aspectos de diseño a tener en cuenta son los siguientes:

a) Caída Libre

Evitar la caída libre de polvo en recipientes o zona de almacenamiento desde la altura sobre el material ya antes depositado, puesto que ello daría lugar a una importante nube de polvo. Es conveniente, entonces, conducirlo hasta su punto de caída o bien, si se trata de una tolva, hacerlo llegar desde varios orificios en su costado.

b) Limpieza – Polvo en Capa

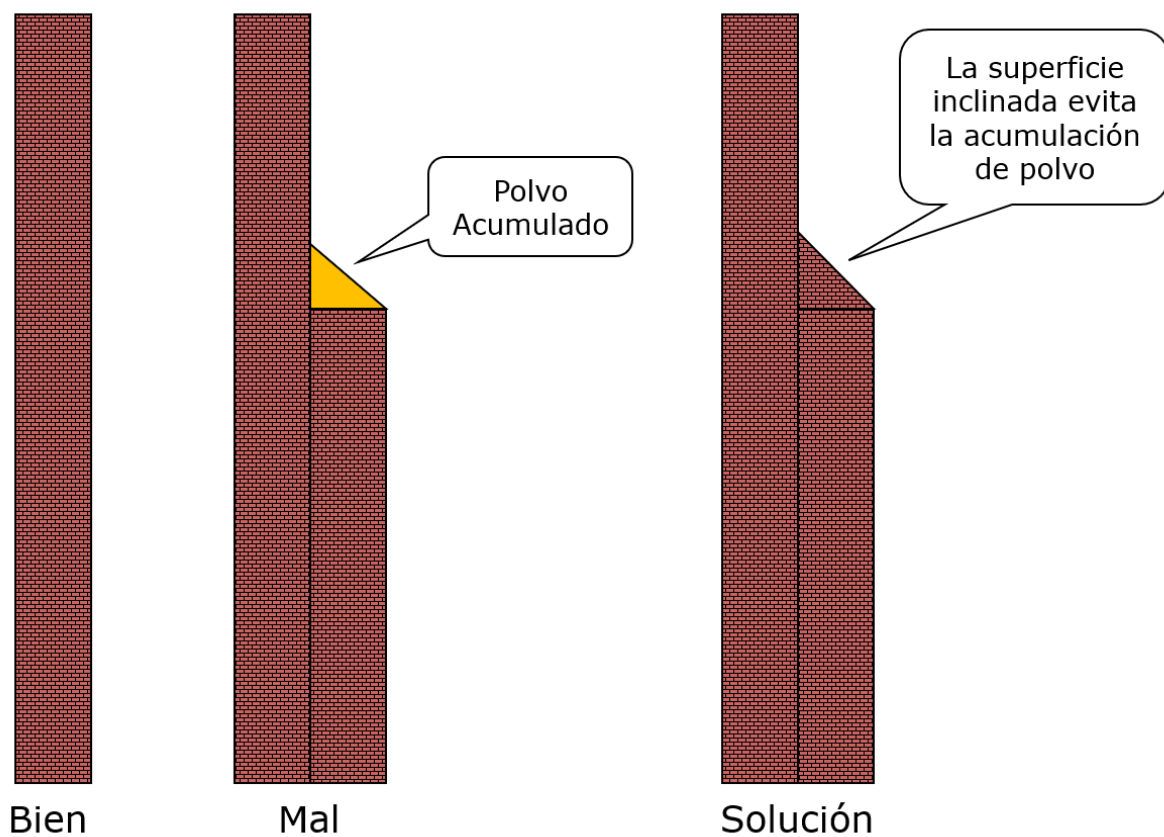
Deben limpiarse regularmente aquellos elementos constructivos, de equipo y de almacenamiento que se encuentre en zonas con polvo en suspensión y en los que pueda posarse el polvo, pues las explosiones secundarias del polvo son particularmente destructivas.

Esto es aplicable también a unidades tales como ciclones, filtros, etc., cuya función es extraer el polvo, pues no sólo se reduce a eficacia de su función, sino que representa un peligro adicional.

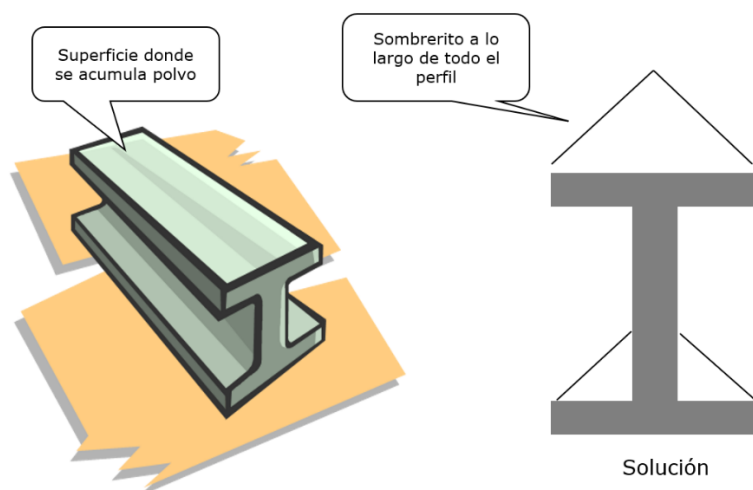
La limpieza siempre debe hacerse por aspiración y nunca por soplado o sopleteado con aire comprimido o barrido con escoba; en el caso del barrido de piso, una técnica es la de humedecer previamente el piso para no levantar polvo mientras se barre.

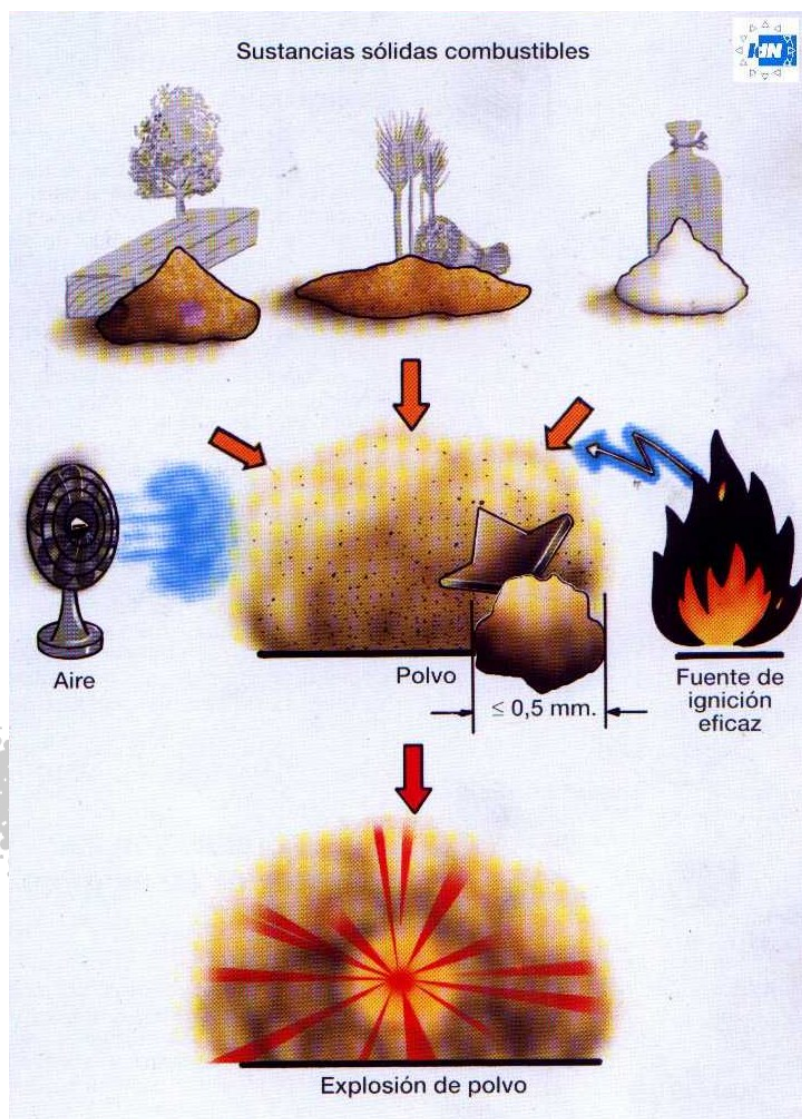
Una medida constructiva que ayuda a evitar la acumulación de polvo en capa es evitar superficies horizontales innecesarias, como ejemplo se puede poner el de

una pared. Es mejor hacer una pared lisa y sin escalones que hacerla de varios espesores distintos, como se muestra en dibujo siguiente.



Las vigas "T" o doble "T" presentan una superficie plana superior donde se puede acumular polvo en capa, para evitar esto se puede hacer un sombrerito en forma de "V" invertida





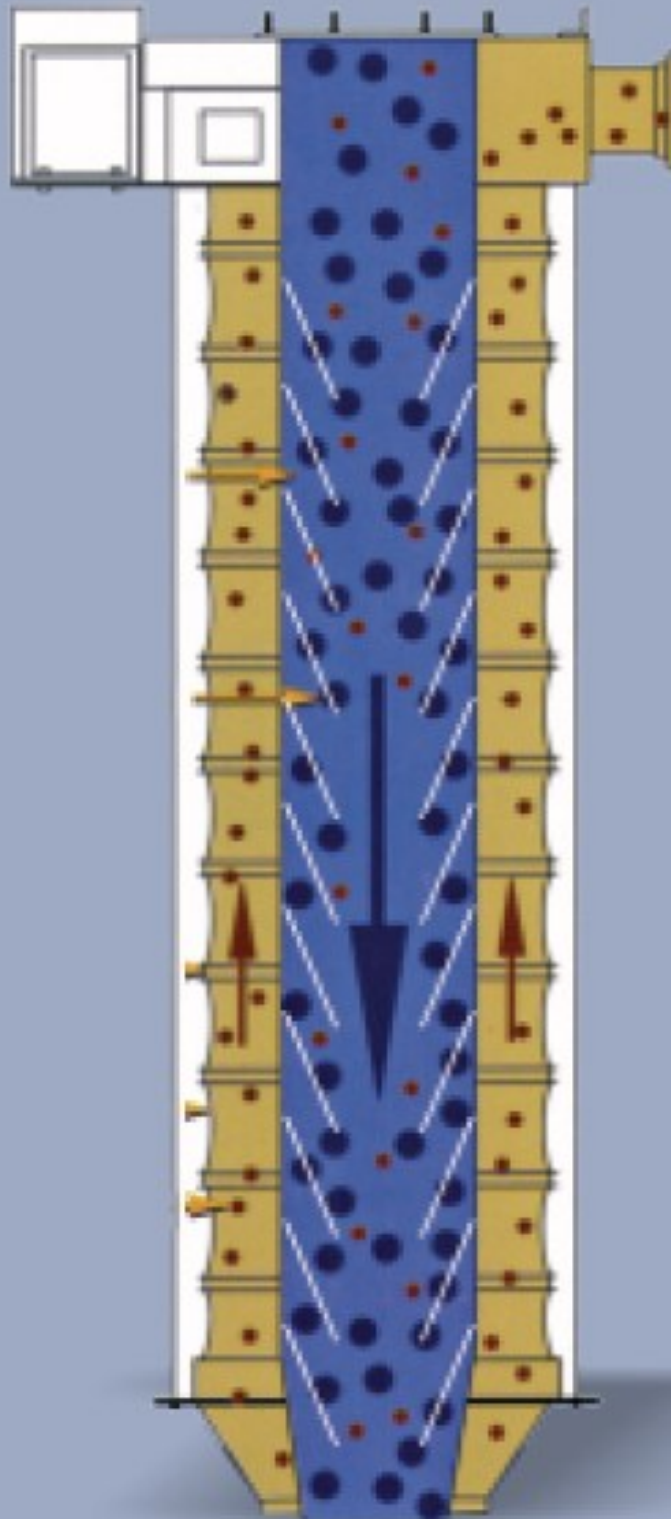
c) Carga de Camión

La carga de un camión con producto granulado y pulverulento produce a su alrededor una gran nube de polvo, es como agarrar un paquete de harina de un kilogramo, abrirlo y tirarlo a la mesa desde una altura de 2 metros o más.

En estos casos se suelen usar dos técnicas: una es la manga retráctil y la otra es realizar la carga en un ambiente cerrado y preparado como ambiente antiexplosivo y con aspiración para evitar la formación de la nube y la contaminación ambiental por la dispersión de la misma.



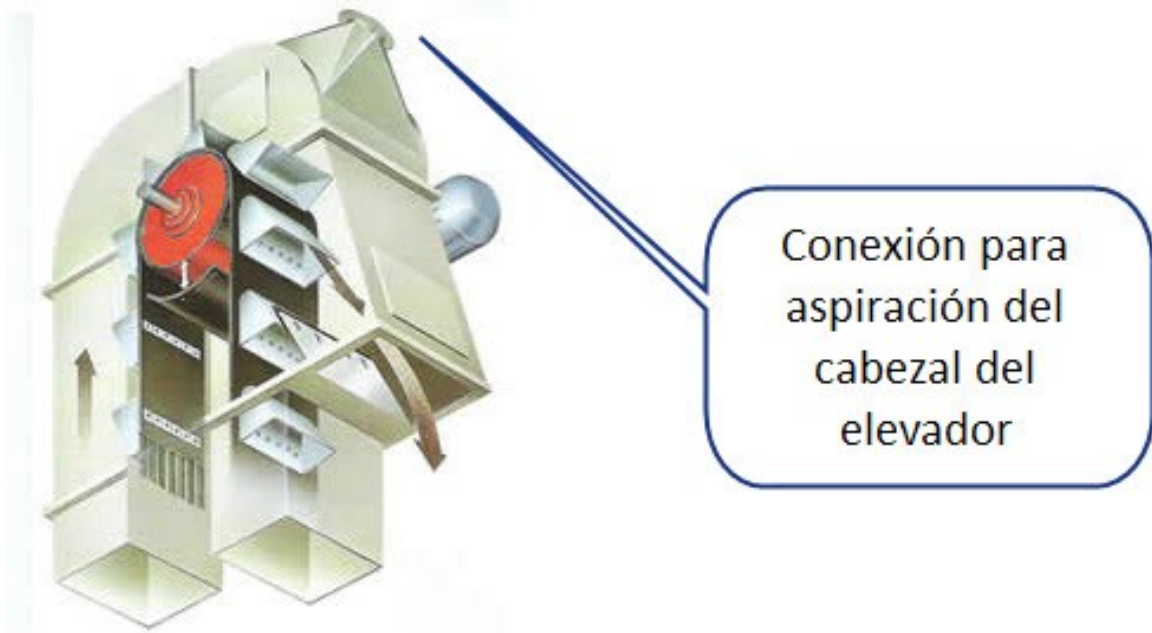
cascada de descarga con supresión de polvo



d) Aspiraciones Localizadas

Todos los lugares donde exista una caída libre de material, o donde el material cambie de dirección en forma brusca, como lo es el pie y el cabezal de un elevador de cangilones, deben tener aspiraciones que retire el polvo que se forma en el lugar.





6.4.2) Fuente de Ignición de Potencia Adecuada

Primero, casi todas las fuentes de ignición que existen en la industria tienen la potencia adecuada como para encender una nube de polvo; segundo, aunque trabajar sobre este elemento nos asegura la falta de un pilar muy importante en la cadena de sucesos y son unos de los pilares de la prevención, no hay un 100% de seguridad de que no pueda existir alguna que se nos haya escapado a los controles o al análisis, o que se pueda generar por condiciones operativas no adecuadas, como ser: elementos metálicos o generadores de chispa en el transporte, que a algún equipo se le haya desprendido algún "tornillo" o se soltó alguna parte metálica.

El rozamiento de partes móviles contra partes de fijas de los equipos presenta otro punto importante de análisis y en particular en equipos tan críticos desde el punto de vista de las explosiones como lo son los elevadores de cangilones y las cintas transportadoras.

En ambos casos hay una cinta, por lo general de goma, que gira por medio de dos tambores, uno que tiene el motor y es llamado mando y el otro que rueda libre. A esta cinta le pueden pasar dos cosas, entre tantas, una es que la cinta se desplace

lateralmente del tambor y empieza a rozar contra el lateral de chapa, situación que genera una gran cantidad de calor por rozamiento justo donde el equipo genera una gran cantidad de polvo en suspensión. Lo segundo que puede pasar, es que la cinta resbale sobre el tambor en vez de girar con el tambor, este resbalar o rozar sobre el tambor también genera calor. En estos casos se instalan cintas incombustibles, y controles que detectan el desplazamiento lateral de la cinta o banda, así como el resbalamiento sobre el tambor. También se instalan tensores de cinta y controles de tensión de la cinta. Si la cinta gira floja, los baldes o cangilones pueden golpear contra los pantalones del equipo o hacer resbalar la cinta.

El giro de la cinta de goma sobre un tambor metálico revestido por lo general en goma genera y acumula energía electrostática. Esta energía que se acumula y por diferencia de potencial entre dos elementos produce un arco eléctrico en forma de chispa. Para estos casos se instalan cintas antiestáticas y todo el sistema está conectado a tierra y al mismo potencial, por consiguiente si se logra acumular estática no hay una diferencia de potencial en el sistema donde está puede producir un arco eléctrico.

6.4.3) Concentración de polvo en suspensión por encima del LII

Muy difícil de trabajar haciendo prevención sólo con este elemento, dado que las variables que intervienen son muchas y complejas, como ser: heterogeneidad en la constitución y tamaño de las partículas de polvo, impurezas, humedad, etc. Además, no hay valores unificados o suficientemente confiables de LII como para adoptar uno y trabajar por debajo de él.

Los valores que hay de LII son de laboratorio y se realizaron sobre muestras de tamaño predeterminado, que pueden no ser las mismas que están en la planta.

6.4.4) Aire

Siempre existe, el trabajar con ambientes inertes es sólo aplicable en equipos o situaciones muy especiales.

La inertización del espacio donde puede producirse la explosión es, además de una medida preventiva para evitarla, un medio adecuado para reducir su gravedad. Suelen emplearse gases, excepto en circunstancias muy especiales (como minas de carbón, donde se utiliza polvo de roca). Los gases más frecuentemente empleados son el anhídrido carbónico y el nitrógeno. Otros gases como el argón, el helio y los hidrocarburos halogenados pueden ser recomendables en casos especiales.

Además de ser inerte, desde el punto de vista del fuego y la explosión, debe ser químicamente no reactivo con respecto a los materiales que debe proteger y estar libre de contaminantes.

Si existiera un problema de corrosión, o si tuviera que entrar en contacto con productos químicos que reaccionan con el agua, tendría que ser posible la eliminación de la humedad.

Debe disponerse de volumen suficiente de gas para atender la demanda de los períodos de punta.

La cantidad de gas inerte necesario y la velocidad de aplicación dependerá de:

- La concentración de oxígeno permisible.
- El factor de seguridad que deba obtenerse.
- La cantidad perdida por fugas.
- Las condiciones atmosféricas.
- Las condiciones impuestas por la actividad industrial que se protege.
- La geometría y las dimensiones del local que se protege.
- El método de aplicación.

En cuanto a los métodos de aplicación del gas inerte dentro de un espacio cerrado, pueden considerarse dos modalidades:

- El método de cargas o de volumen fijo.
- El método continuo.

En todos los casos, deben aceptarse las limitaciones de los métodos de inertización. Estas limitaciones se refieren a la fiabilidad y la adecuación del suministro, a la eliminación de componentes que puedan contaminar o degradar el producto, a seguridad de los instrumentos y dispositivos para la liberación de la presión excesiva y a la idoneidad del sistema de suministro.

El ambiente debe ser clasificado y señalizado como peligroso dada la falta de oxígeno.

6.4.5) Confinamiento

Todos los materiales en forma de polvos o granulados, o mezclas de estos, se trabajan y se almacenan en lugares cerrados, salvo raras excepciones. El confinamiento, es pues, imposible de evitar, aunque sí, se puede trabajar evitando confinamientos excesivos, no necesarios o no adecuados.

6.5) Desarrollo de Medidas Protección

Además de ser necesario adoptar medidas preventivas para evitar las explosiones de polvo, cuando estas medidas fracasan y se produce el accidente, es preciso disponer de los sistemas adecuados para anular, limitar o minimizar los efectos de la explosión.

En términos generales puede establecerse que hay cuatro formas de evitar, o, al menos, reducir los efectos de una explosión, estos son:

- Confinamiento.
- Separación (aislamiento).
- Alivio.
- Supresión.

6.5.1) Confinamiento de la Explosión

La primera consideración que debe hacerse al analizar los resultados que puede producir una explosión es si ésta puede o no ser contenida en el recinto en que tiene lugar, sin facilitar un alivio de presión.

En general, el control de los daños producidos por una explosión por confinamiento es poco frecuente. La mayoría de los recintos construidos de forma convencional pueden soportar presiones de 0,20 kg/cm², como máximo, por lo que las presiones generadas en la mayor parte de las explosiones (que pueden ser del orden de 7 kg/cm²) destruirían los recintos ordinarios. El diseño especial de los recintos para soportar la presión de una onda expansiva resulta, en general, muy caro y sólo puede realizarse cuando se trata de volúmenes muy reducidos (por ejemplo, en zonas de pulimentación o de transporte neumáticos) que, además, puedan delimitarse con facilidad.

Para que la explosión sea contenida, las distintas unidades del recinto no sólo estarán diseñadas para soportar la presión máxima más el factor de seguridad, sino que las conexiones y enlaces entre unidades deberán tener la misma resistencia.

Ocurrida una explosión, la apertura del recinto afectado debe hacerse con muchas precauciones, ya que puede existir residuos del polvo o productos explosivos de la combustión junto con pequeños incendios residuales o gases tóxicos, y la rápida entrada de aire puede originar una segunda explosión.

6.5.2) Aislamiento. Separación de Plantas y Recintos Explosivos

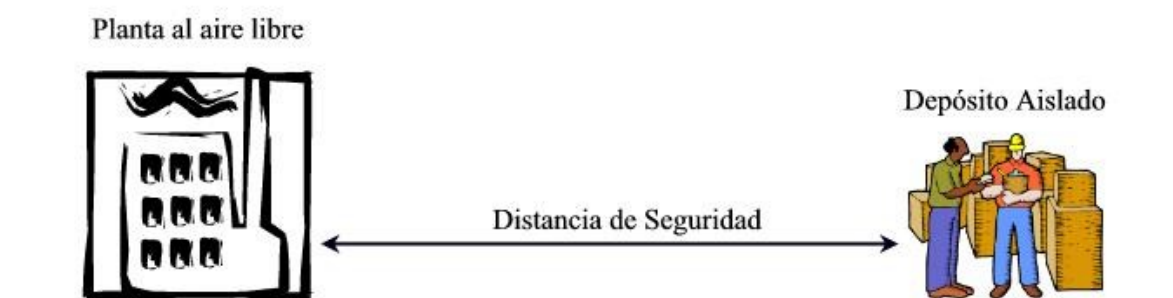
El método más simple y, probablemente, el más efectivo para limitar los efectos de la explosión, es construir alejado el recinto con riesgo de explosión y, a ser posible, al aire libre, de modo que el proceso se controle desde un centro bastante distante como para no ser afectado por una eventual explosión.



Aislamiento o Alejamiento

Si se sitúan los recintos peligrosos en el exterior, no sólo se evita la propagación de los daños al conjunto de la planta, sino que puede, además, reducirse la energía liberada en la explosión separando, a su vez, en pequeños recintos aislados los que puedan provocar explosiones.

El principio de la separación, como medio de protección contra explosiones, puede aplicarse a un grupo de plantas industriales o almacenes, a cada planta o almacén y a cada sección de éstos.



Para alcanzar la protección necesaria es preciso aislar las unidades entre sí de una manera cierta, aun en caso de explosión. Pero como, por otra parte, las necesidades de producción, mantenimiento, almacenaje, transporte, etc., requieren de las distintas unidades de producción y almacenes estén permanentemente conectados y situados, a ser posible, próximos, es preciso adoptar una serie de disposiciones que aseguren, que aun estando próximas unas unidades de otras, exista una efectiva protección que evite la transmisión de la explosión entre ellas. Para ello, los conductos y comunicaciones necesarios entre unidades de planta y almacenes que deben quedar enlazados han de permitir un aislamiento total, en caso de explosión.



Con este fin se utilizan dos tipos de dispositivos que permiten estrangular estas comunicaciones: válvulas rotatorias y transportadores de tornillo sin fin.

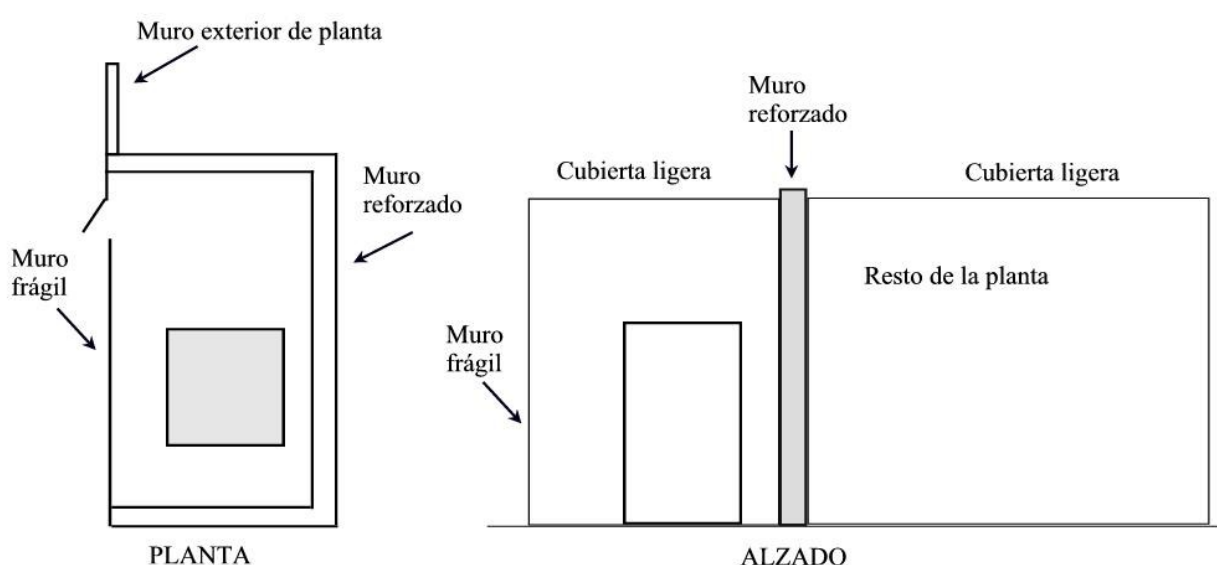
Como ambos dispositivos son metálicos y giratorios, es importante que no entren objetos extraños (trozos de metal, piedras, etc.) en su circuito de alimentación, pues el riesgo de producir chispas por fricción o choque puede dar lugar a la ignición en los mismos elementos estranguladores.

a) Disposiciones Constructivas

Como no siempre es posible ubicar los procesos peligrosos al aire libre, una solución aceptable es situar el espacio donde se realiza el proceso en un cubículo

adosado al muro exterior del edificio. El cubículo debe estar separado del resto del edificio por muros de resistencia adecuada (calculada con un coeficiente de seguridad mínimo de 2,5), pero los muros exteriores del cubículo, si existen, deben ser de material frágil.

La cubierta puede hacerse también de material frágil para facilitar el alivio de la explosión. En todo caso, deben evaluarse los efectos del desahogo de la explosión por muros exteriores y cubiertas, así como su alcance y dirección.



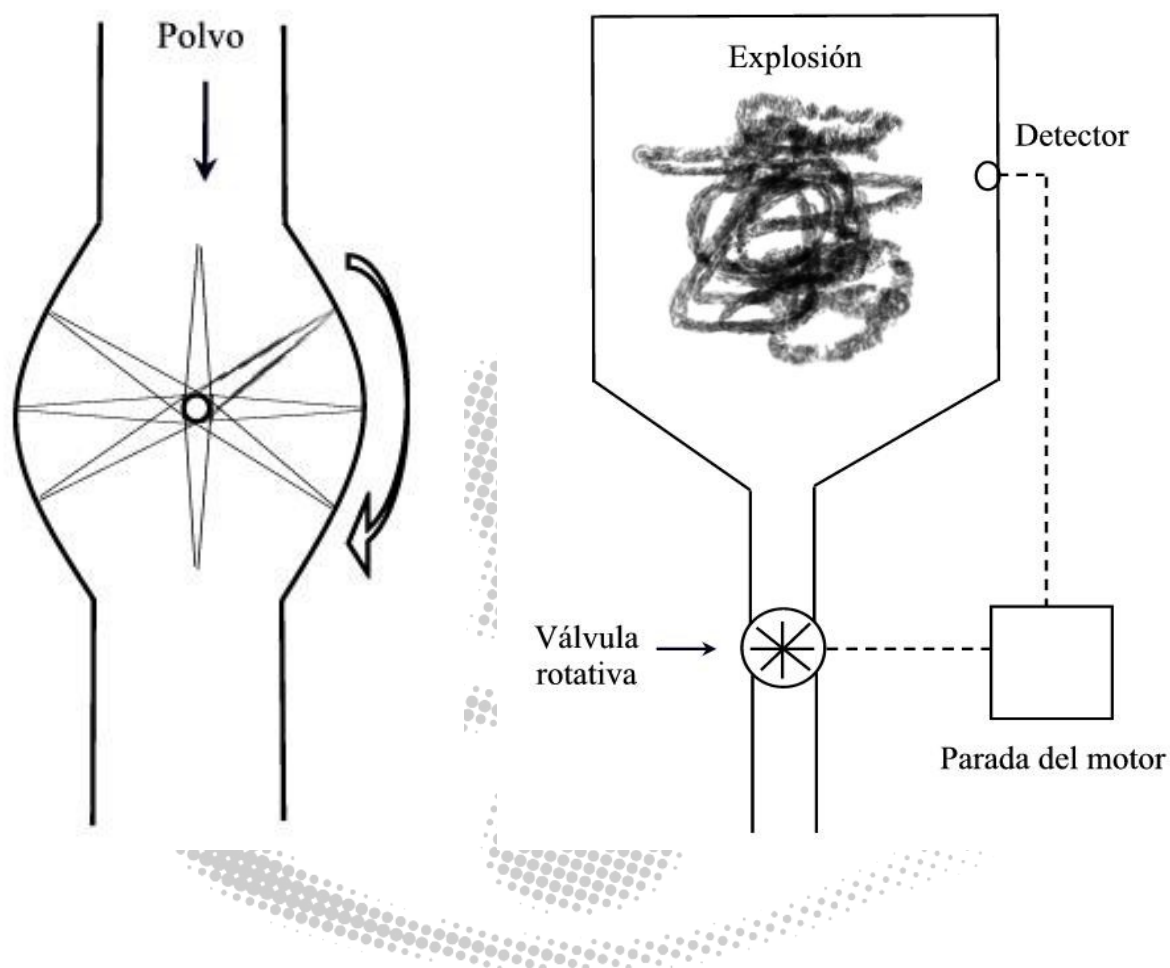
b) Válvula Rotativa

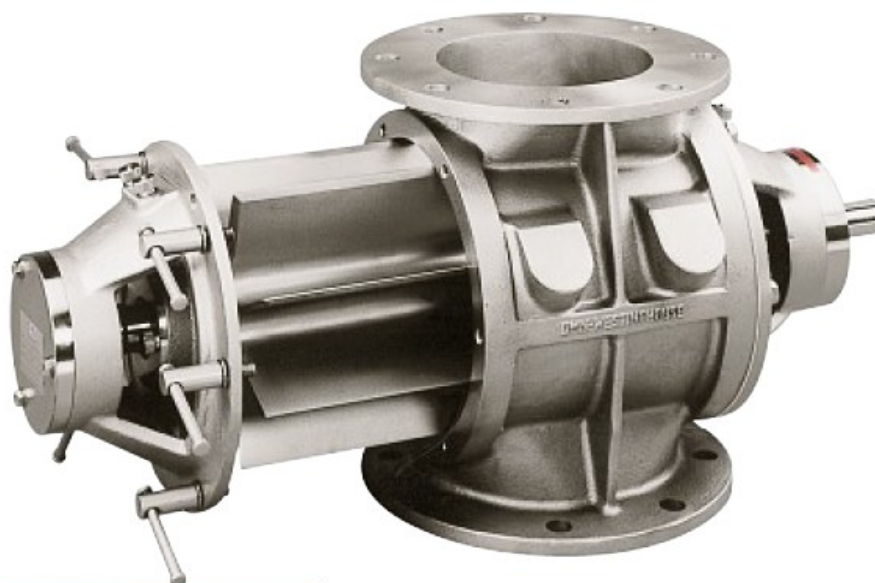
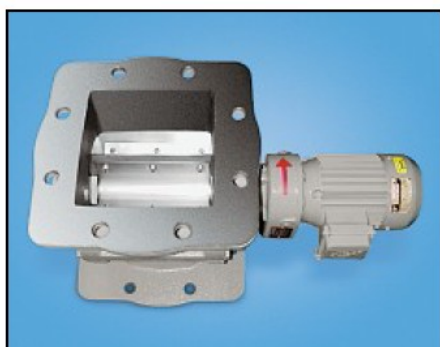
Una válvula rotativa permite aislar espacios o recintos donde pueda generarse una explosión, propagada desde otro recinto a través de una comunicación entre ambos.

La válvula está formada por varias paletas que giran accionadas por un motor. Las paletas están confinadas herméticamente en una camisa. No existe ningún camino directo entre la entrada y salida de la válvula.

La rotación permite el paso de polvo por el conducto, pero evita el paso directo de una onda frontal procedente de una explosión. Las partículas de polvo incendiadas

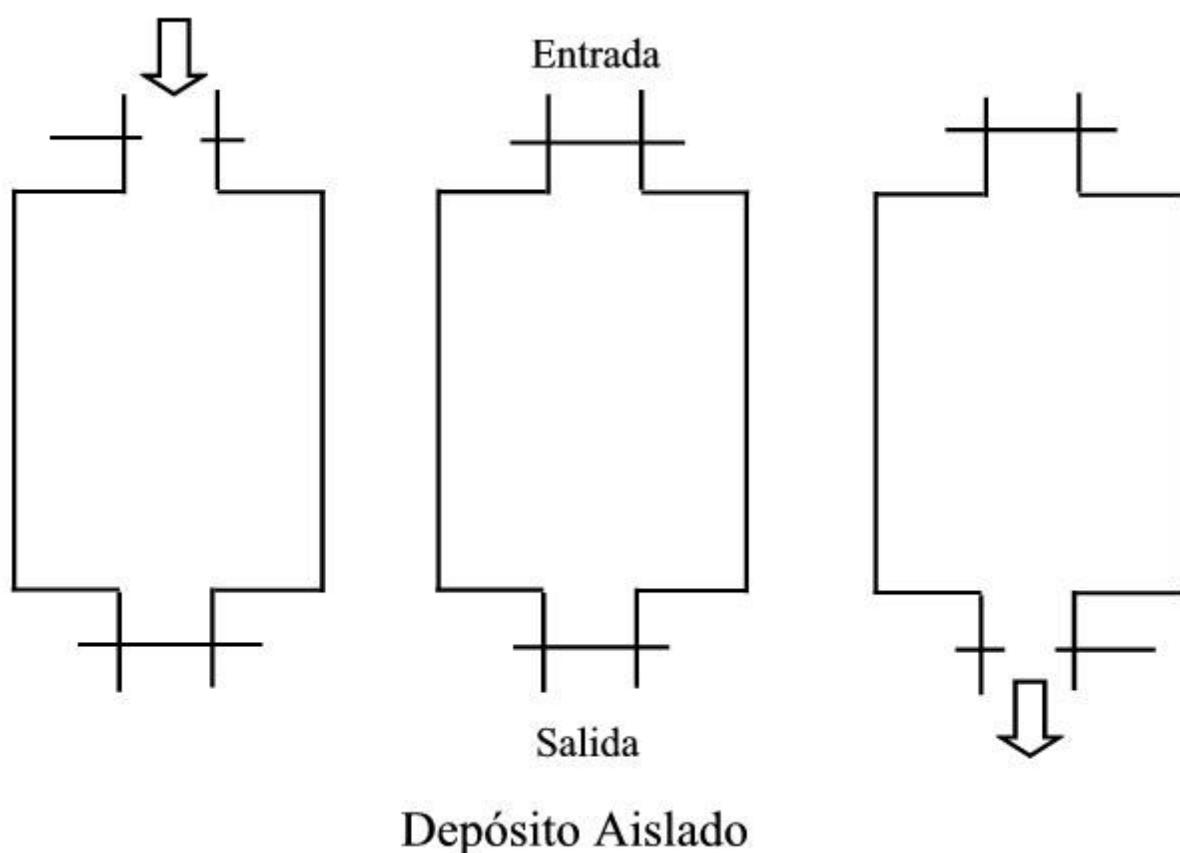
podrían pasar a través de la válvula si ésta siguiera girando y, para evitarlo, se puede prever un interruptor a distancia que pare el motor, en caso de que la explosión se produzca y active el interruptor.





c) Depósito Aislado (Depósito de Compuertas Sincronizadas)

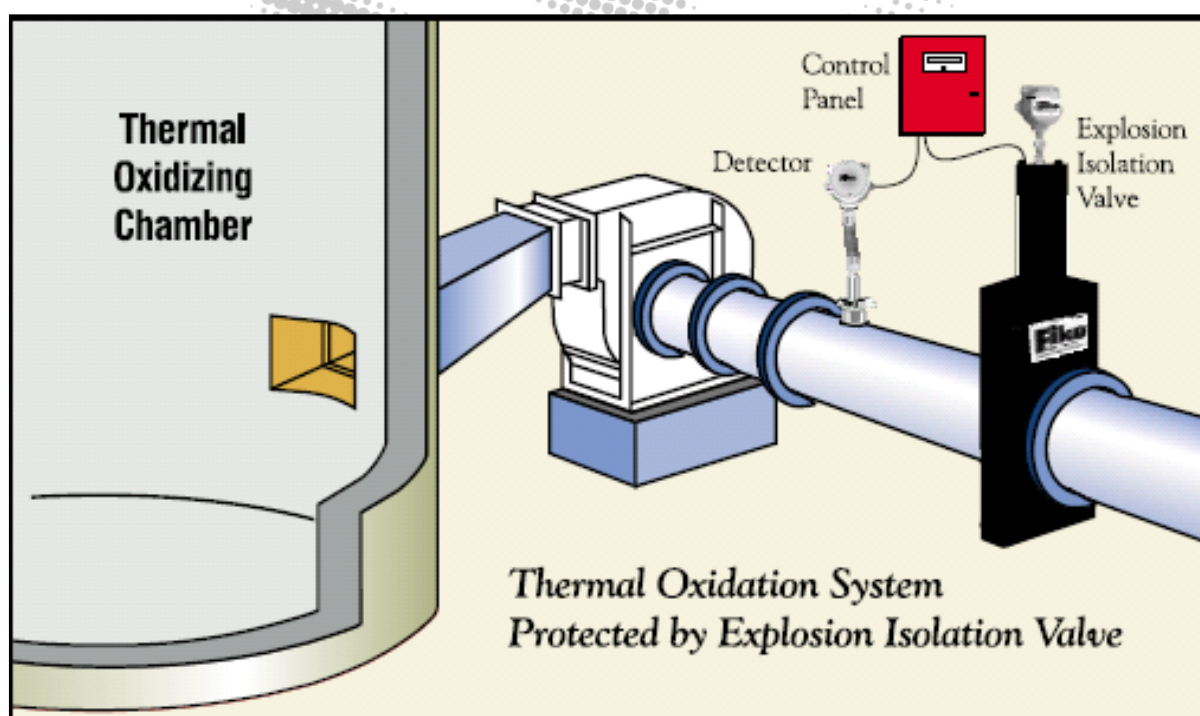
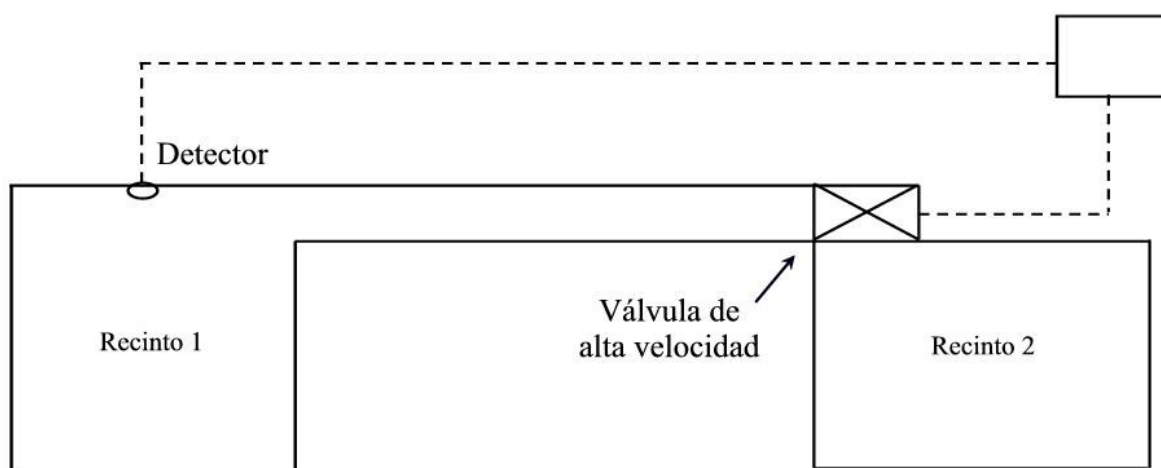
Este dispositivo consiste en montar un contenedor resistente, para recibir el polvo, cuya entrada y salida disponen de válvulas de aislamiento muy robustas y resistentes. Las válvulas están sincronizadas (y enclavadas) de modo que una no se puede abrir hasta que la otra está cerrada. De esta forma, las dos partes de la planta (o un recinto) a cada lado del depósito nunca están en conexión directa.



Estos depósitos se usan frecuentemente en las plantas donde se manipulan polvos metálicos.

d) Válvula Aislante de Alta Velocidad

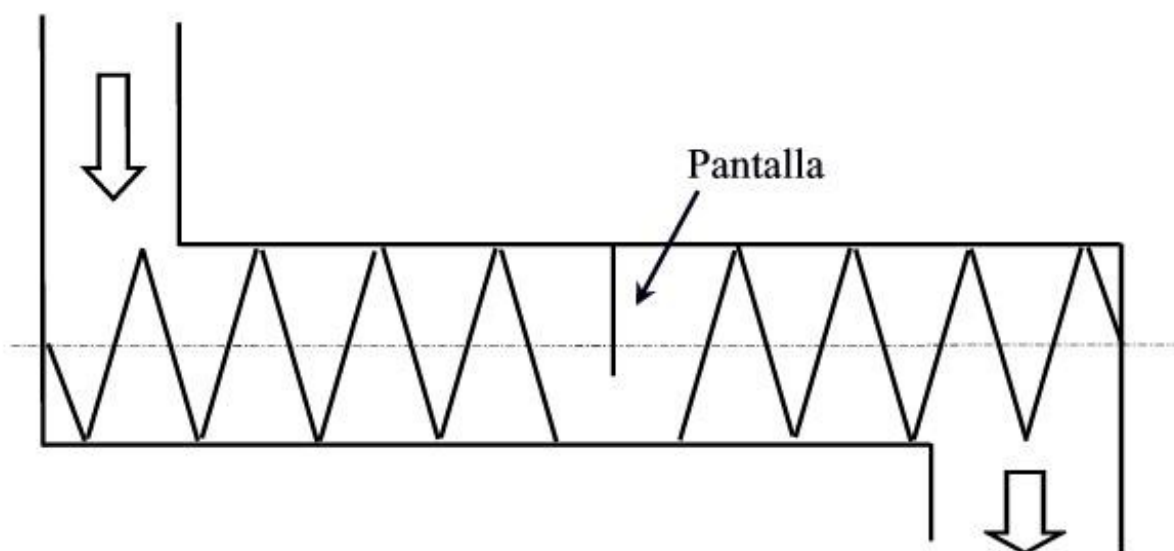
Cuando quieren aislarse dos recintos unidos por una conducción de polvo, puede instalarse una válvula aislante de alta velocidad, que actúa por medio de una señal enviada desde un detector de explosión. De este modo, si el recinto donde se realiza un proceso con riesgo de explosión ésta llega a producirse, la señal enviada por el detector cierra la comunicación con el otro recinto. El sistema permite hacer diversas combinaciones cuando son varios los recintos con riesgo de explosión que están en comunicación.

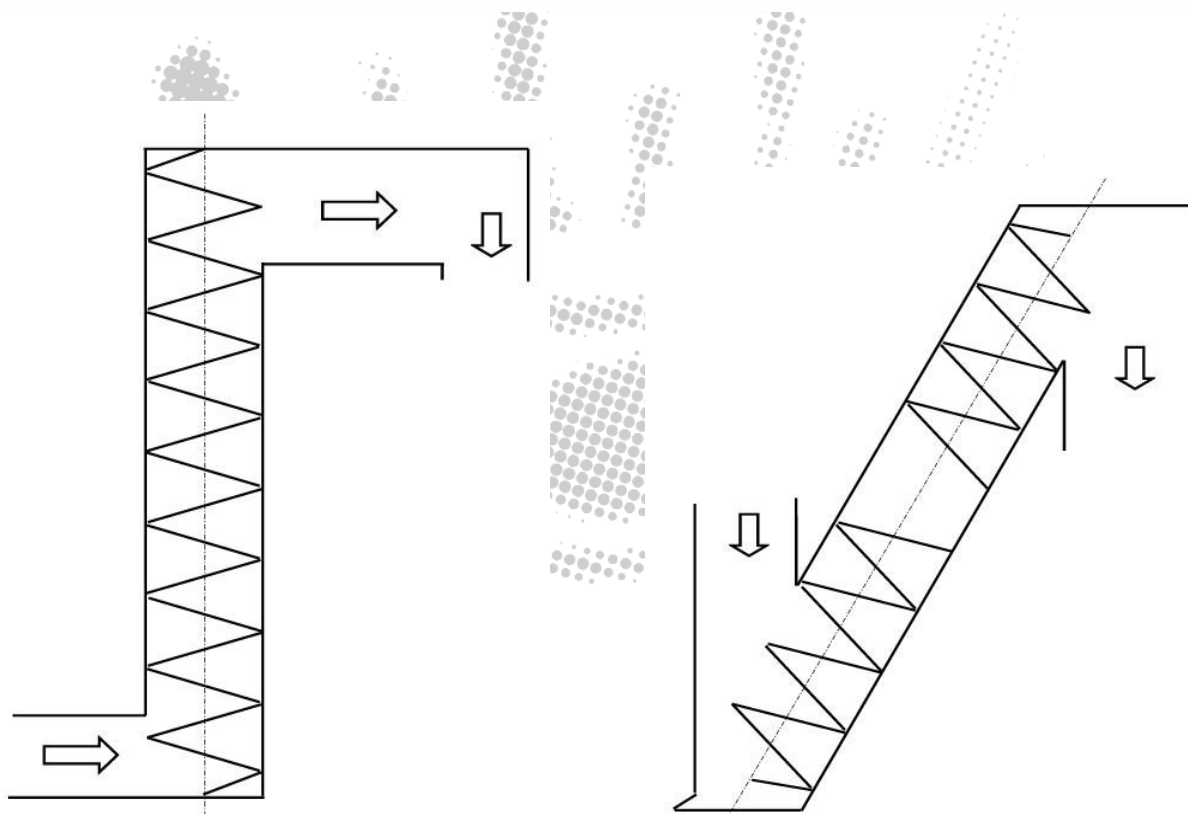


e) Transporte de Tornillo Sinfín

Los tornillos transportadores verticales son un medio muy seguro de elevar polvo por un conducto, sin peligro de que se establezca una comunicación a través del mismo. El polvo crea, por sí mismo, un tapón aislante que evita el paso de una explosión por el conducto, aislando así, dos zonas del mismo de una manera eficaz. También se puede utilizar para el transporte del polvo un tornillo sinfín inclinado, siempre que se suprima un filete de su desarrollo. De este modo, un tapón de polvo sellará el conducto del transportador ahí donde falta el filete del sinfín; el tapón permanecerá, incluso, cuando se deje de alimentar el tornillo.

Los transportadores de tornillo sinfín horizontales también pueden utilizarse para el transporte seguro de polvo a través de canalizaciones, pero en este caso, además de suprimir un filete, es preciso montar una pantalla sobre el eje del tornillo, encima del donde estaba el filete suprimido. De este modo se obtiene un sellado análogo al conseguido con tornillos para transporte vertical o inclinado.

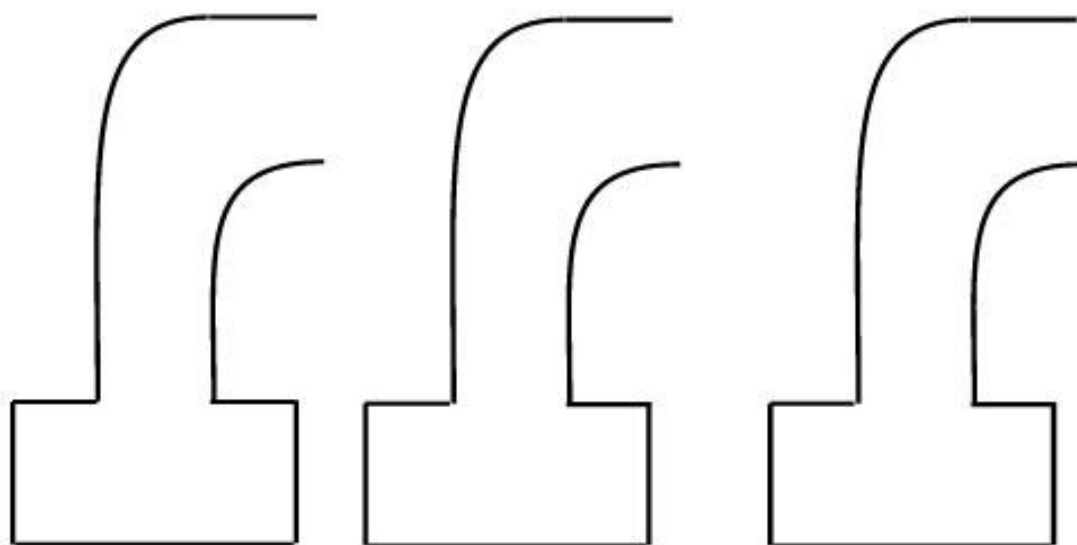




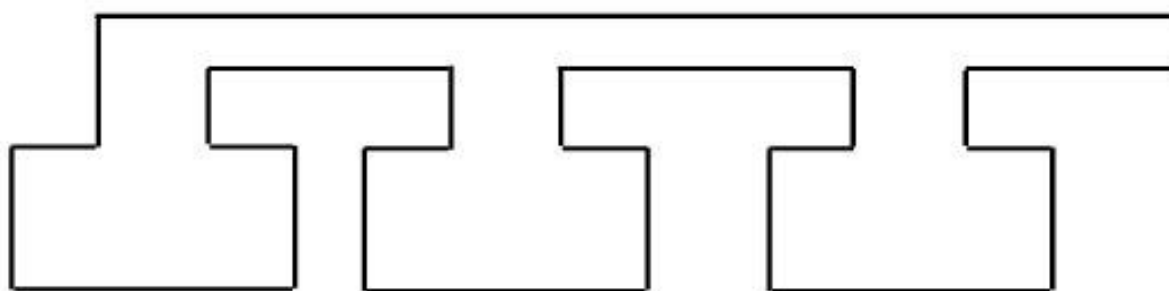
f) Conducciones Separadas

Aunque no constituye propiamente un dispositivo separador, las conducciones separadas representan una disposición que facilita el aislamiento de recintos con riesgo de explosión.

Cuando las conducciones de extracción de polvo se diseñan al proyectar la planta, debe evitarse que sean comunes a los distintos espacios o recintos componentes de la misma. En otro caso, una explosión podría propagarse, a través de las conducciones, a otras zonas de proceso o almacenamiento, incluso muy alejadas del origen de la explosión. Las conducciones separadas aseguran el aislamiento de un sistema de extracción de polvo con relación al resto.



Correcto

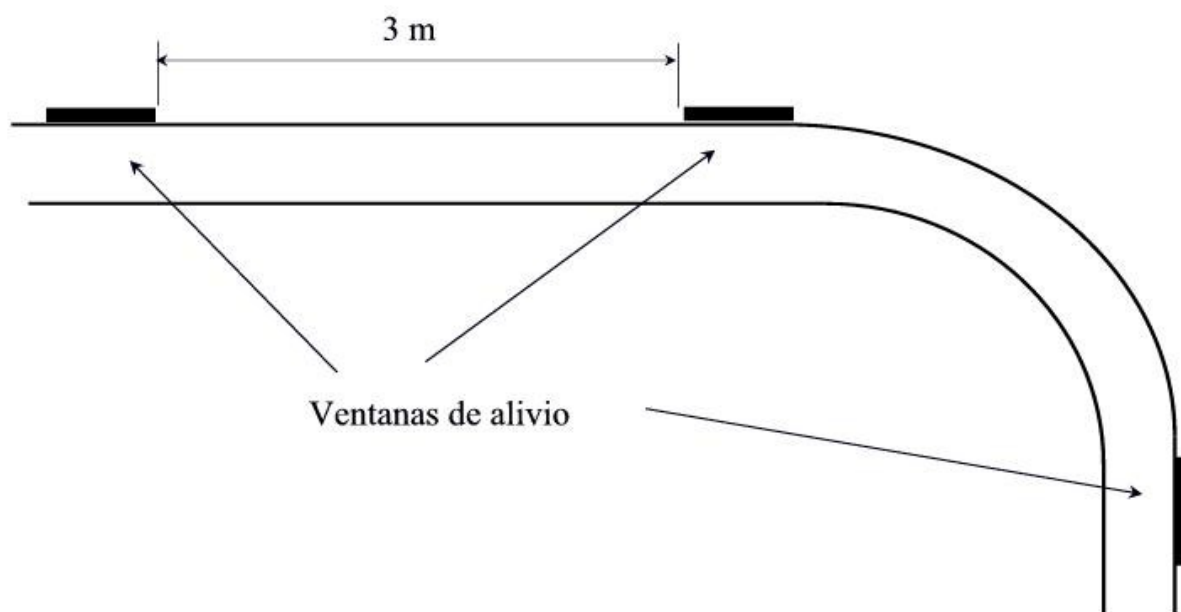


Incorrecto

Se deben evitar las conducciones muy largas. Si la conducción tiene más de 3 metros de longitud debe ir provista de un dispositivo de alivio de la explosión.

La velocidad del aire en la conducción debe ser suficiente para evitar la sedimentación de polvo en la conducción.

Se deben instalar ventanas de alivio cerca de los codos y de las bifurcaciones.





Ventana de venteo en el extremo superior del elevador

6.5.3) Alivio de la Presión de Explosión

La limitación de los efectos de las explosiones y la reducción de los daños producidos se puede relacionar muy directamente con la limitación de las presiones máximas y las velocidades de crecimiento de la presión que pueden alcanzarse. Los daños serán irrelevantes si las presiones alcanzadas en las explosiones son también insignificantes.

Este procedimiento de reducir o evitar los efectos de las explosiones es, generalmente, el menos costoso y debe considerarse siempre entre los posibles, cuando se proyecta una nueva planta.

El alivio de la presión de explosión implica crear aberturas en la planta, el recinto o los edificios en que dichas explosiones pueden producirse, de modo que cuando la presión empieza a crecer, su crecimiento está limitado hasta un valor predeterminado, en cuyo momento se produce la eliminación de presión a través de aquellas aberturas.

El alivio de la presión no impide la propagación de la llama a través de la nube de polvo explosivo, pero si el sistema de ventilación de los gases de la explosión está correctamente diseñado, permite que se produzca la explosión sin grave daño para la estructura del edificio y equipo de la planta o almacén. Después de que ha sido evacuada la presión de la explosión, puede haber fugas residuales, contra los cuales no protege el alivio de la explosión.

La máxima presión predeterminada para la que se diseña el sistema de alivio por ventilación de gases está relacionada directamente con la resistencia del recinto o edificio a proteger.

En general, a menos que el edificio o recinto haya sido reforzado, la máxima presión de seguridad para el cálculo será de $0,15 \text{ kg/cm}^2$ y, como máximo, de $0,20 \text{ kg/cm}^2$.

Según el espacio donde debe producirse el alivio de la presión de explosión (conductos o pequeños recintos, locales de proceso, o naves de edificios) se utilizarán unos u otros procedimientos y dispositivos de venteo de la presión.

a) Ventanas

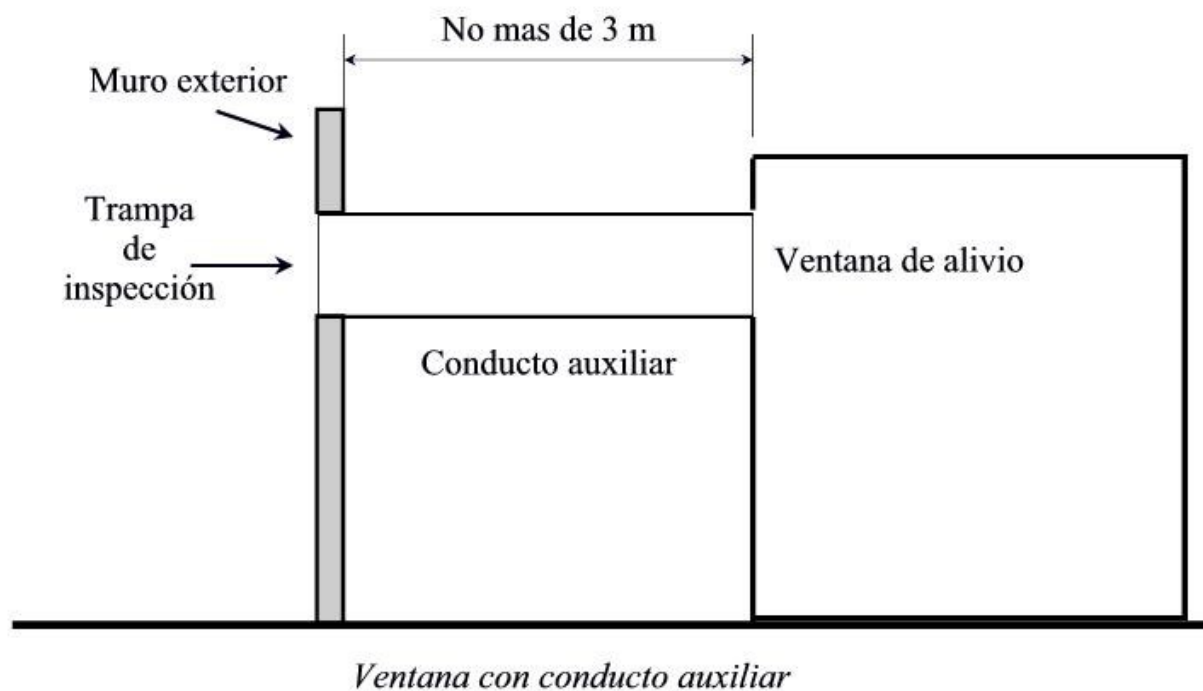
Las ventanas constituyen el medio más empleado cuando se trata de aliviar la presión en canalizaciones, tanques, pequeños recintos, etc.

La apertura de la ventana tiene lugar cuando se alcanza una presión predeterminada (valor nominal de su presión de trabajo), que debe elegirse suficientemente por debajo de la que puede producir daños o deformaciones en las estructuras o elementos afectados.

El área de ventilación de la ventana debe estar relacionada con el volumen del recinto o canalización donde se instala. Dependiendo de la resistencia de los elementos delimitadores y del tamaño del espacio a proteger, la tasa de ventilación oscilará entre 1 m² por cada 10 m³ de volumen (por ejemplo, en caso de polvos de aluminio o magnesio) a 1 m² por cada 20 m³ de volumen (por ejemplo, para polvos carbonosos).

Las ventanas deben situarse tan cerca como sea posible de los puntos en que pueda producirse una ignición, y la salida de su descarga se hará, preferiblemente, al aire libre. En todo caso, la salida de gases de alivio de presión no descargará productos ardiendo, ni gases calientes, en recintos de trabajo o en lugares donde puedan producirse lesiones a personas o exista riesgo de explosión secundaria.

Cualquier conducto auxiliar de descarga de la ventilación no debe tener más de 3 metros y, si los hay, deberán tener una ventana o trampa para la inspección y mantenimiento del cierre de la ventana de alivio.



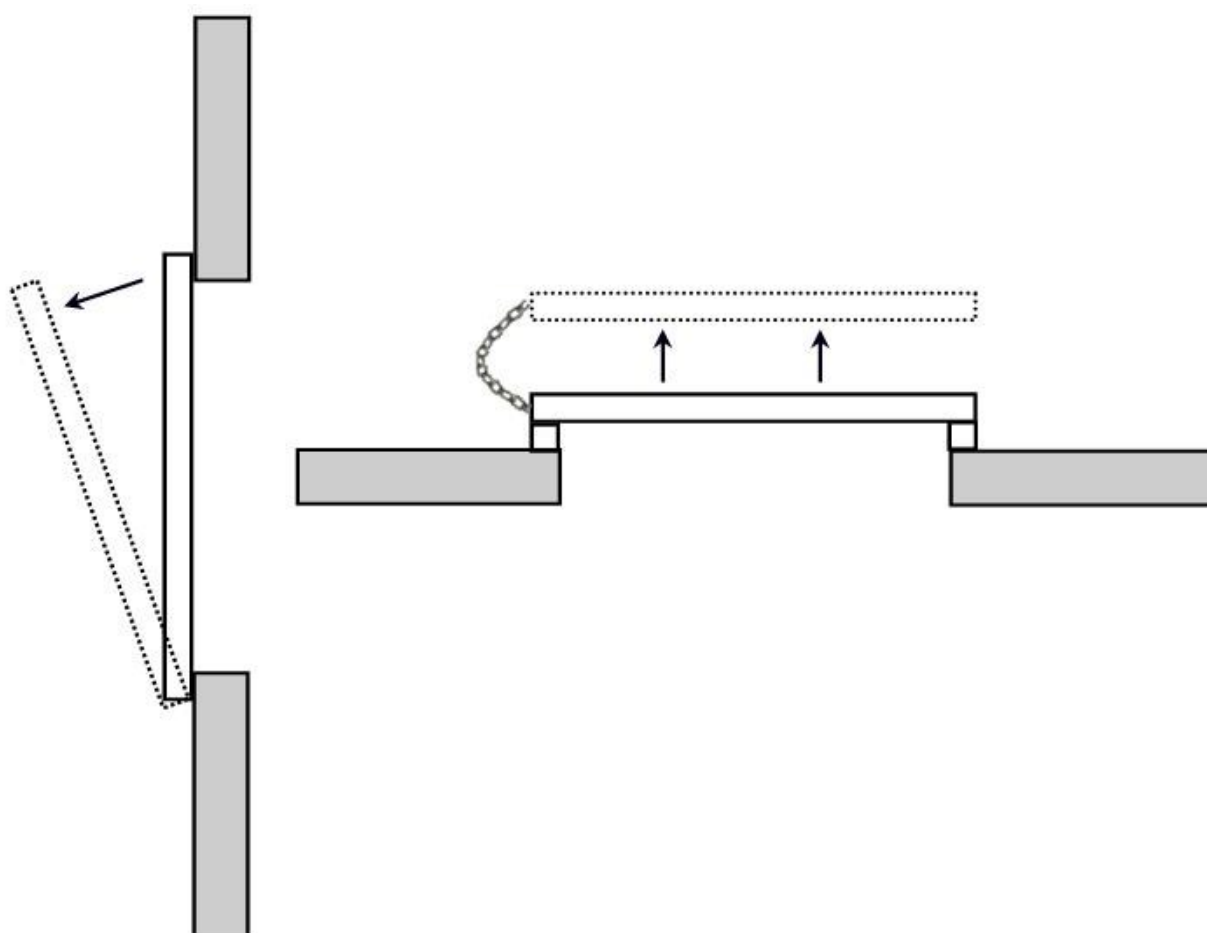
b) Cierres con Paneles

Para el alivio de presión en recintos o locales de proceso o almacenamiento donde exista riesgo de explosión pueden instalarse cierres formados por paneles que se desplazan, deforman o destruyen, en caso de que la presión interior del local alcance un valor predeterminado.

Los paneles desplazables pueden ser abatibles y resultan muy adecuados cuando la velocidad de incremento de presión no es muy alta. Deben proyectarse para permanecer abiertos después de la explosión, con el fin de evitar presiones negativas en el interior del recinto (succiones), que resultan muy destructivas.

Otros tipos de paneles desplazables están formados por placas o láminas rígidas que mantienen cerrado el hueco de alivio de presión por medio de imanes, muelles o, incluso, su propio peso. De este modo, una presión relativamente baja puede desplazarlos dejando abierto el hueco de alivio. Los paneles deben ser tan ligeros como sea posible. Como pueden convertirse en proyectiles lanzados durante la explosión, deben estar sujetos con cadenas o cables a elementos fijos de la estructura.

Finalmente, los huecos de alivio de presión pueden cerrarse con paneles quebradizos, cuya rotura produce la apertura del área de salida de gases. Estos paneles suelen ser láminas o películas de material frágil, capaces de soportar las presiones normales del área de proceso o almacenamiento donde se sitúan, pero que se deforman y quiebran con facilidad ante un incremento de presión. Su efectividad puede mejorarse con perfeccionamientos tales como líneas de pre-fractura, cortadores o cuchillas que aceleran su ruptura, etc.

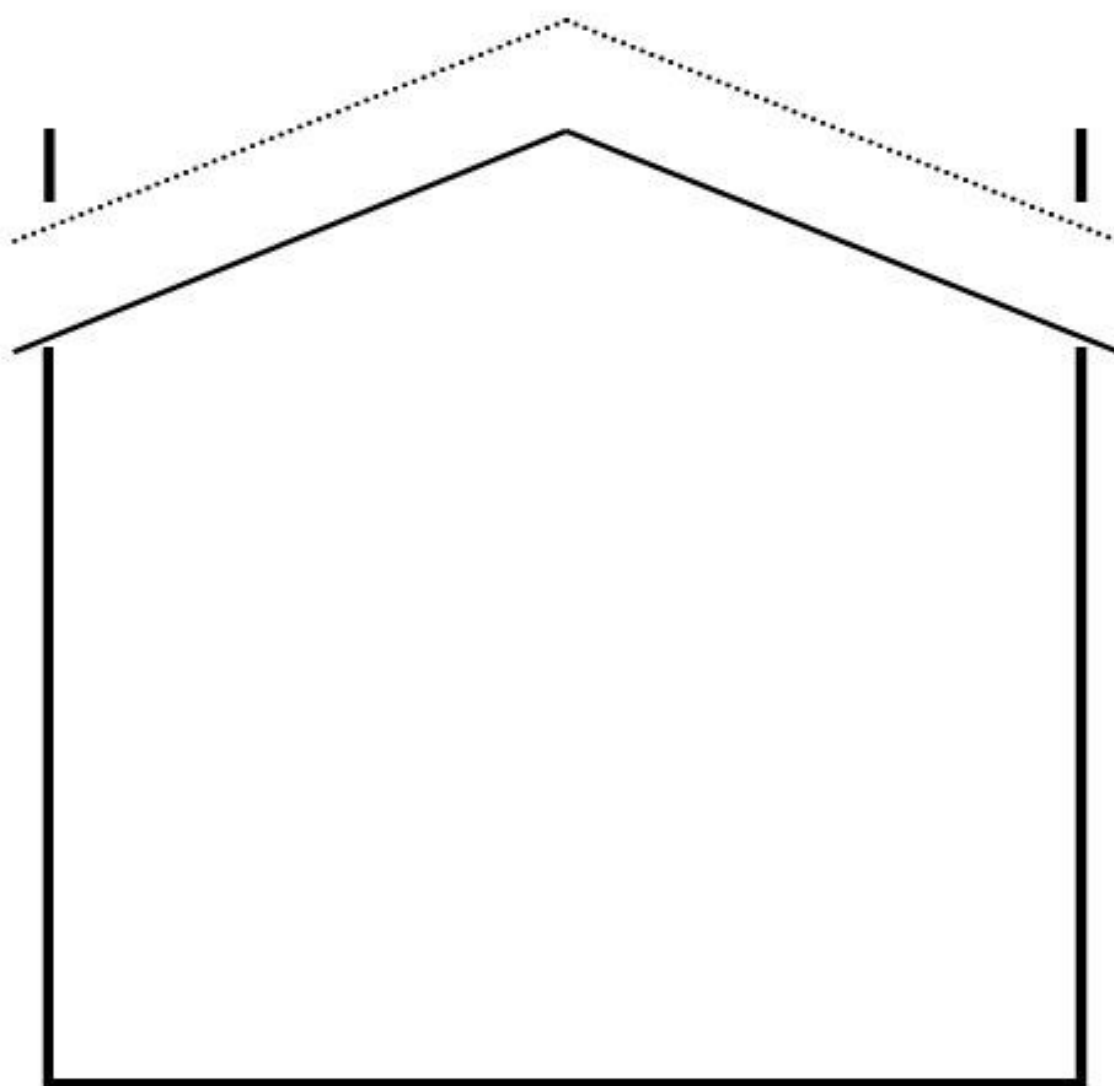


c) Cierres con Elementos Constructivos

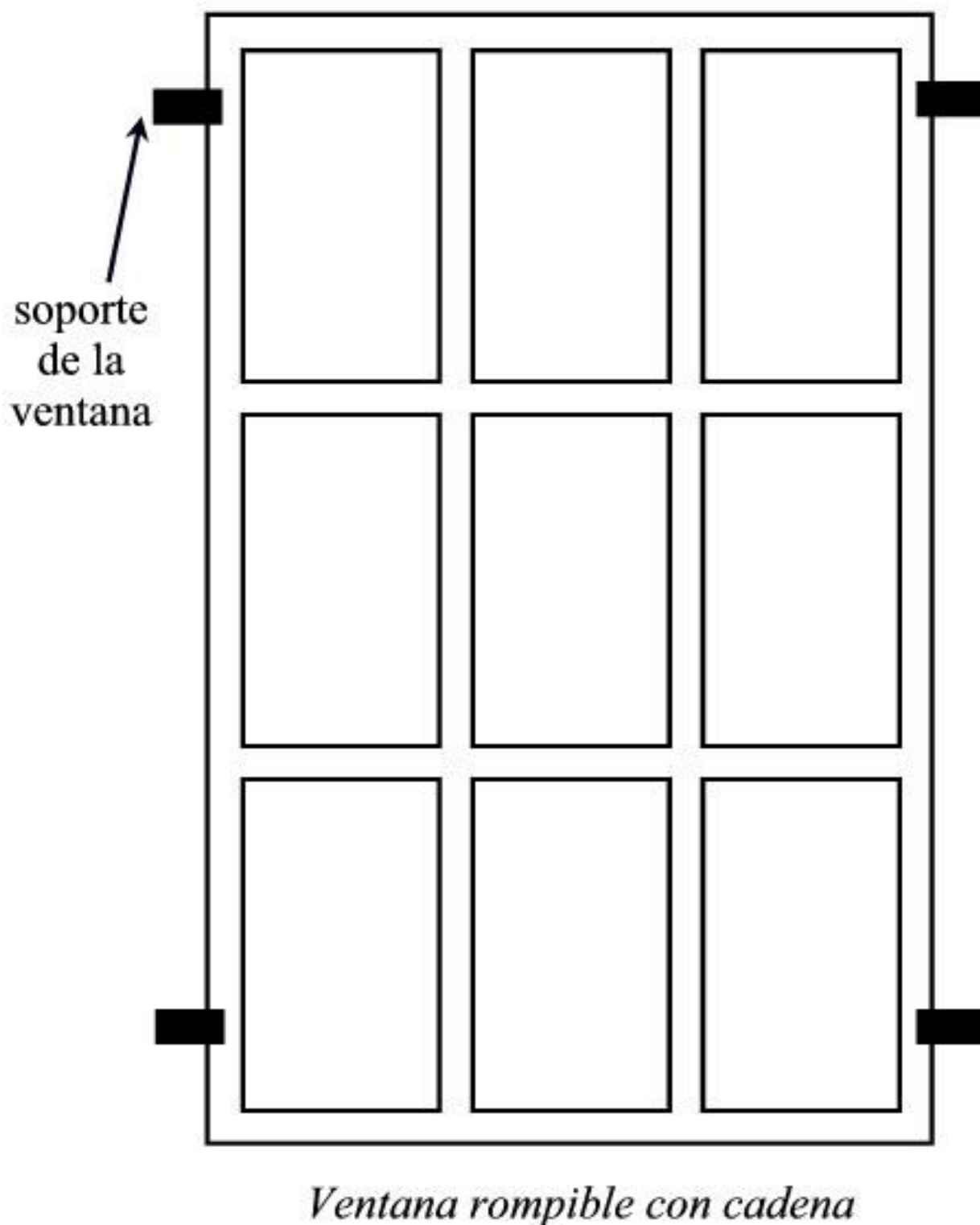
Cuando se manipulan polvos explosivos en el interior de naves, grandes espacios o edificios, pueden utilizarse huecos para alivio de la presión que están cerrados por elementos de la propia construcción.

En general, el alivio de la presión se efectúa a través de ventanas, paneles de muros o cubiertas ligeras.

El diseño debe hacerse de modo que los materiales sólidos, llamas y productos de la combustión ardientes que puedan proyectarse hacia el exterior no representen riesgo para personas o bienes próximos a la construcción protegida. Para evitar el lanzamiento del elemento constructivo desprendido o fracturado por la explosión deben disponerse de elementos de retención (cables o cadenas).



Cubierta ascendente



6.5.4) Supresión de Explosiones

Desde que se produce la ignición del polvo hasta que la presión alcanza el valor capaz de generar daños, transcurre un breve intervalo de tiempo, suficientemente

importante como para actuar durante él, para suprimir la explosión. Recordemos que las explosiones de polvo son siempre el resultado de deflagraciones que se desarrollan a velocidad subsónica y que se producen en un ambiente confinado.

El dispositivo para suprimir la explosión consta de un detector de presión de acción rápida que da una respuesta, casi inmediata, al incremento inicial de presión, que es lento, comparativamente.

El detector acciona un interruptor de apertura instantánea (del orden de 4 a 5 milisegundos) que libera un producto químico que inhibe el desarrollo de la explosión.

Esta técnica está limitada a espacios de un volumen de hasta 75 m³, en algunos casos puede emplearse en espacios de 100 m³ como máximo.

El procedimiento operativo consiste en explosionar una semiesfera que contiene el agente supresor (halón, frecuentemente). De este modo, el interruptor provoca la explosión (en este caso detonación) de una pequeña cantidad de explosivo iniciador-detonador que al tiempo que rompe el recipiente que contiene el agente inhibidor, lo distribuye muy rápidamente dentro del recinto donde está desarrollándose la deflagración. Se aprovecha la diferencia de velocidad entre la detonación (supersónica) del explosivo que descarga el supresor, y la velocidad de deflagración (subsónica) de la mezcla polvo-aire.

Otro procedimiento consiste en accionar la apertura de botellas, con descarga muy rápida, que contienen gran cantidad de gas inerte o que no reaccione con los productos de la deflagración.

Estas técnicas pueden utilizarse también para inertizar cualquier local que tenga comunicación con aquel en que ha tenido lugar (o se está iniciando) la explosión, de modo que se evite su extensión y propagación, si no ha realizado un correcto aislamiento de volúmenes con riesgo de explosión.

Referencias Bibliográficas Generales

- Manual NFPA de Protección Contra Incendios – Editorial MAPFRE NFPA - Cuarta Edición en castellano – 1993.
- “Explosiones” del Ing. Eduardo D. Álvarez, SFPE - Director Región Cono Sur - International Fire Safety Consulting del Cono Sur S.A. - EDAR Ingeniería [edaringe@edaringe.com.ar].

