GUÍA DE SEGURIDAD

Manipulación segura de polvos

© 2018 DEKRA Process Safety - All rights reserved.

First published in the UK in 2007 by DEKRA Process Safety Technology Ltd.,
Carrer de Charles Robert Darwin, 20, 46980 Paterna, Valencia
Tel: +34 961 36 68 14
Email: process-safety-es@dekra.com

Website: www.dekra.es/es/seguridad-de-procesos/

Acknowledgements: Dr Stephen Rowe, Dr Andy Starkie
Designed and typeset by DEKRA Process Safety

Contenidos

Introducción 4
Manipulación segura de polvos 5

¿Por dónde comenzar? 7
¿Cuáles son las condiciones para un fuego o una explosión? 7
Establecer una base de seguridad 8
¿Qué es lo que ya conocemos? 9

Evaluación de propiedades explosivas 11
Análisis de explosividad 12
¡STOP! - ¿Qué hacemos ahora? 13

Análisis de explosión de un polvo 15
Muestreo de una explosión de polvo 16
Sensibilidad a la ignición 17
Límites de inflamabilidad (nube de polvo) 18
Severidad de explosión 18
Casos especiales 18

Análisis de propagación del fuego 19

Análisis de estabilidad térmica 24
Muestreo de la estabilidad térmica 24
Detección de reacciones de descomposición 24
Detección de reacciones de oxidación 25

Recomendaciones de ensayo para equipos específicos 27

Resumen 29
Muestreo de varios polvos 30

Apéndice - Descripciones de ensayos 33
A.1 El enfoque de DEKRA para ensayos 33
A.2 Ensayo de clasificación grupo A/B - Prueba de explosividad 34
A.3 Ensayo de energía mínima de ignición (EMI) 35
A.4 Ensayo de temperatura mínima de ignición en nube (TIN) 36
A.5 Ensayo de temperatura mínima de ignición en capa (TIC) 37
A.6 Ensayo de severidad de explosión de un polvo (ensayo en esfera de 20 litros) 38
A.7 Ensayo de concentración límite de oxígeno (CLO) 39
A.8 Concentración mínima explosiva (CME) en la esfera de 20 litros 40
A.9 Calorimetría diferencial de barrido (DSC) 41
A.10 Ensayo tubo de Carius (10 g) 42
A.11 Ensayo en celda de difusión (Diffusion Cell) 43
A.12 Ensayo en celda aireada (Aerated Cell) 44
A.13 Ensayo de aire sobre capa (Air Over Layer) 45
A.14 Determinación de temperaturas seguras de almacenamiento de materiales a granel 46

La evaluación de riesgos para una manipulación segura de polvos y sólidos puede resultar mucho más compleja que la relacionada con líquidos y gases inflamables, la cual suele percibirse como relativamente sencilla. Por lo general, no siempre se comprende del todo la relación existente entre la base de seguridad de operación de una planta y las propiedades físicas relevantes para la manipulación segura de polvos y sólidos. Tradicionalmente, además, los operarios suelen estar más concienciados acerca de los riesgos de incendio o explosión derivados del manejo de líquidos o gases inflamables.

Muchas personas se sorprenden al oír por primera vez que puede derivarse un riesgo importante de incendio o explosión a raíz del procesamiento de materiales aparentemente inocuos, como azúcar glas, polvo de aluminio o incluso paracetamol. Sin embargo, desde hace mucho, los ingenieros de proceso son conscientes de los riesgos y peligros que implica el procesamiento de este tipo de materiales, así como de las medidas, los procedimientos y la formación necesarios para el funcionamiento seguro de una planta. A medida que se desarrollan nuevos materiales, los ingenieros deben proponer nuevos supuestos de seguridad y realizar evaluaciones de riesgo detalladas sobre la forma correcta de manipulación y almacenamiento de los materiales (y cualquier tipo de polvo / partículas finas que se generen durante el procesamiento o las operaciones de mezcla). Cualquier evaluación de riesgos debe basarse en el entendimiento de las propiedades físicas de los materiales manipulados.

Esta guía pretende proporcionar unos fundamentos sólidos para la evaluación de materiales sólidos y en polvo potencialmente inflamables en cualquier tipo de industria, con el objetivo de ayudar a las empresas manipuladoras a reducir al mínimo el riesgo de incendios y explosiones. A lo largo de las páginas siguientes, describiremos una estrategia para la evaluación de los riesgos de incendio, los riesgos de explosión de polvo y los riesgos relacionados con la estabilidad térmica vinculados a dichos materiales. Esta metodología es aplicable a la mayoría de los supuestos que pueden darse en una planta.

La guía comienza explicando las condiciones necesarias para que se produzca un incendio, así como aquellas que puedan darse en el lugar de trabajo y hacer que dicho proceso derive en una explosión. Continuaremos describiendo qué consideraciones deberían tenerse en cuenta para establecer un entorno de trabajo seguro, mediante la definición de una base de seguridad de operación, y a continuación, enunciaremos aquellos datos de seguridad necesarios para comprobar y confirmar los supuestos fundamentales que sustentan la base de seguridad elegida.

Es posible que algunos de los datos requeridos para comprobar la base de seguridad ya figuren en la Ficha de Datos de Seguridad del material (FDS) o en informes de ensayos disponibles en planta. En caso de que esta información no esté disponible, será necesario aplicar una estrategia adecuada para determinar las propiedades explosivas de cualquier material manipulado. En esta guía, se describe la estrategia diseñada por DEKRA a lo largo de muchos años de experiencia trabajando en industrias de procesos.

Muchos de los ensayos más comunes mencionados en la presente guía aparecen descritos de manera detallada en la sección "Apéndice: Descripción de los ensayos" que figura en el reverso del folleto.

Esta guía ha sido publicada por DEKRA y redactada por un equipo de especialistas en seguridad de procesos, cuya experiencia industrial suma más de 150.000 horas de trabajo, lo cual se refleja aquí en una serie de orientaciones precisas para la manipulación de polvos y sólidos inflamables.

Manipulación segura de polvos

Los incendios de capas de polvo, las explosiones de polvo y la descomposición de sólidos térmicamente inestables pueden tener consecuencias trágicas y catastróficas cuando se producen en entornos industriales. Si no se detectan y evalúan correctamente, controlando o previniendo el riesgo, estas situaciones peligrosas pueden provocar grandes pérdidas de contención y afectar, por consiguiente, a la actividad de la empresa fabricante. Algunos ejemplos:

- Pérdida de vidas humanas o daños personales.
- Pérdida o devaluación de activos.
- Publicidad negativa.
- Pérdida de la confianza del accionariado y devaluación de la empresa.
- Pérdida de capacidad productiva y disminución de la cuota potencial de mercado
- Multas impuestas por las autoridades reguladoras / reclamación de indemnizaciones personales.

A la hora de trabajar con cualquier proceso de fabricación, siempre es necesario identificar los riesgos vinculados a su funcionamiento. Esto resulta especialmente importante en las protecciones de máquinas, suelos resbaladizos o con obstáculos, etc., pero también cuando existen materiales inflamables o la posibilidad de que se produzca una reacción química descontrolada. Estos peligros se reconocen fácilmente cuando se utilizan líquidos inflamables de uso habitual, como metanol o etanol, o bien gases inflamables como propano, butano o hidrógeno; sin embargo, ¿qué ocurre con las nubes de polvo, como las que se forman a partir de los ingredientes alimentarios (azúcar, harina, etc.) o los productos farmacéuticos (ácido acetilsalicílico, paracetamol, etc.)? ¿Suponen estas un peligro? La respuesta es: probablemente sí, ya que más del 70 % de los sólidos manipulados en el sector industrial están reconocidos como inflamables.

A fin de resolver esta cuestión y garantizar que las empresas que utilicen o produzcan este tipo de materiales desarrollan su actividad en condiciones de seguridad, la Unión Europea ha implantado una serie de normativas que subrayan la necesidad de recopilar datos de seguridad de procesos para llevar a cabo evaluaciones de riesgo con carácter obligatorio. Entre dichas normativas, se incluyen las siguientes:

- La Directiva relativa a la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo (Directiva 1998/24/CE).
- Las Directivas sobre riesgos derivados de atmósferas explosivas, entre las que se incluyen:
  - La Directiva ATEX 137 (1999/92/CE), la cual establece los requisitos mínimos de protección de aquellos trabajadores potencialmente expuestos a atmósferas explosivas.
  - La Directiva ATEX 95 (2014/34/UE), relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre aparatos y sistemas de protección para el uso en atmósferas potencialmente explosivas.

Además, las plantas que siguen tienen un estandar PSM (Process Safety Management) deben obtener y documentar todos los riesgos relacionados con el proceso incluyendo el fuego, la explosión y la liberación de agentes tóxicos o riesgos energéticos. Los riesgos de explosión de polvos deben incluirse en la mayoría de elementos del PSM.

La guía no aborda otros temas, como la exposición ocupacional o cuestiones medioambientales (p. ej. toxicidad y ecotoxicidad) ni describe en detalle las prácticas de gestión de seguridad de procesos o la selección de equipos.

¿POR DÓNDE COMENZAR?

¿Cuáles son las condiciones para un fuego o una explosión?

La mayoría de las personas ha oído hablar del llamado "triángulo del fuego". En él se refleja la idea de que, para que tenga lugar un incendio, debe darse la presencia simultánea de tres elementos. El combustible puede ser gas (p. ej. etileno), vapor (p. ej. metanol) o polvo (p. ej. harina). El agente oxidante suele ser, en la mayoría de los casos, oxígeno en aire, aunque existen otros agentes oxidantes que pueden facilitar la combustión (p. ej. cloro u óxido nítrico). La fuente de ignición puede ser una chispa, una llama o temperatura elevada (lo que provoca el fenómeno de la "autoignición").

En un incendio, el combustible y el agente oxidante actúan por separado y debe darse una concentración adecuada de ambos (es decir, dentro de los límites de inflamabilidad); asimismo, la fuente de ignición deberá tener la energía suficiente para hacer que prenda la mezcla de combustible / agente oxidante en cuestión. Normalmente la duración de un incendio, al aire libre, viene dada por el tiempo que necesita el combustible para consumirse (es decir, para oxidarse por completo). En la combustión de materiales sólidos, como el carbón o la madera, la velocidad de combustión viene determinada por los procesos de difusión que reducen la velocidad a la que el oxígeno entra en contacto con el combustible restante. Dependiendo del tamaño del combustible, el proceso de combustión total puede alargarse durante horas.

Condiciones para un incendio

Condiciones para una explosión

Si el combustible está totalmente mezclado con el agente oxidante (p. ej. en forma de nube de gas o de nube de polvo compuesta por partículas finas), la velocidad de combustión aumentará considerablemente y el proceso de combustión tardará solo decenas de milisegundos. Este fenómeno es el que marca la diferencia entre la lenta combustión de un pedazo de carbón y la rápida combustión resultante de la ignición de una nube de polvo de carbón. Si añadimos a la ecuación el ingrediente final "confinamiento", junto con la mezcla total de combustible y agente oxidante, se darán las condiciones para que se produzca una explosión (una rápida liberación de energía almacenada). En condiciones de confinamiento, pueden generarse valores de presión elevados, normalmente superiores a 10 bar(g) (aunque algunos sólidos son capaces de alcanzar valores aún mayores).

El procesamiento y manipulación seguros de materiales inflamables (polvos, gases o vapores) puede favorecerse tanto evitando que se den los elementos necesarios para que se produzca una explosión como protegiendo la planta y al personal de los efectos de dicha explosión. El conjunto de medidas necesarias para lograr dichas condiciones de seguridad es lo que se denomina "base de seguridad".

Establecer una base de seguridad

A fin de definir una base de seguridad adecuada para cualquier proceso industrial con el potencial de generar atmósferas explosivas de polvo, es necesario evaluar la inflamabilidad del polvo, su capacidad para formar nubes de polvo, su sensibilidad a la ignición causada por cualquier tipo de fuente de ignición que pueda hallarse presente, sus límites de explosividad y la gravedad de la explosión producida. Las distintas bases de seguridad que pueden considerarse por consiguiente para evitar el riesgo de explosión de polvo incluyen:

Evitar la presencia de fuentes de ignición

> Conocer la sensibilidad a la ignición de los sólidos y asegurarse de que no exista en el proceso ninguna fuente potencial de ignición con energía suficiente como para hacer que prenda la nube de polvo.

Prevención

> Evitar la generación de atmósferas explosivas.

> Operar fuera de los límites de inflamabilidad (normalmente por debajo de la concentración mínima explosiva o CME).

> Operar en un entorno cuyo contenido de oxígeno sea inferior a la menor concentración de oxígeno necesaria para facilitar la combustión ("inertización").

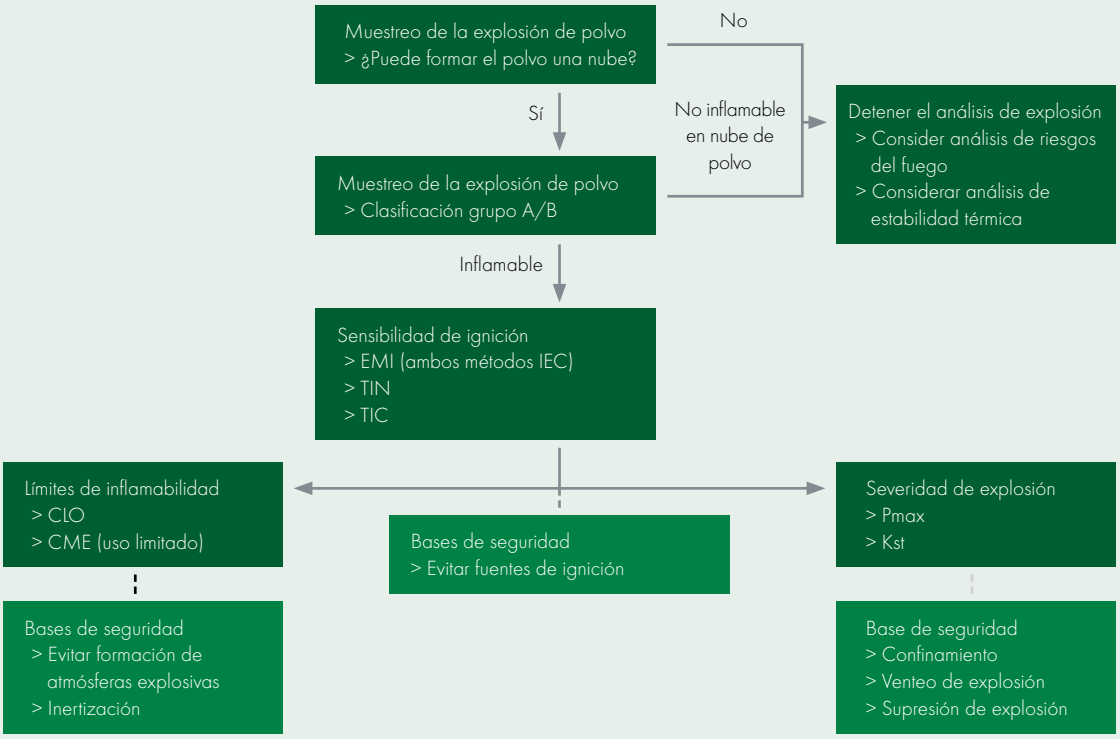
Protección

> Venteo de la explosión.

> Supresión de la explosión.

> Confinamiento de la explosión.

La Figura 1 resume la estrategia general de evaluación de riesgos de explosión de polvo de un material sólido. Cada recuadro se describe de manera más detallada a lo largo de la presente sección de la guía.



Se muestra una explicación completa de la figura en la página 13

Figura 1. Estrategia de ensayos de explosión de polvo.

¿Qué es lo que ya conocemos?

Para evaluar la inflamabilidad o riesgo de inestabilidad térmica de cualquier polvo potencialmente combustible, el punto de partida más apropiado es evaluar lo que ya se conoce sobre del material. Puede obtenerse información sustancial de:

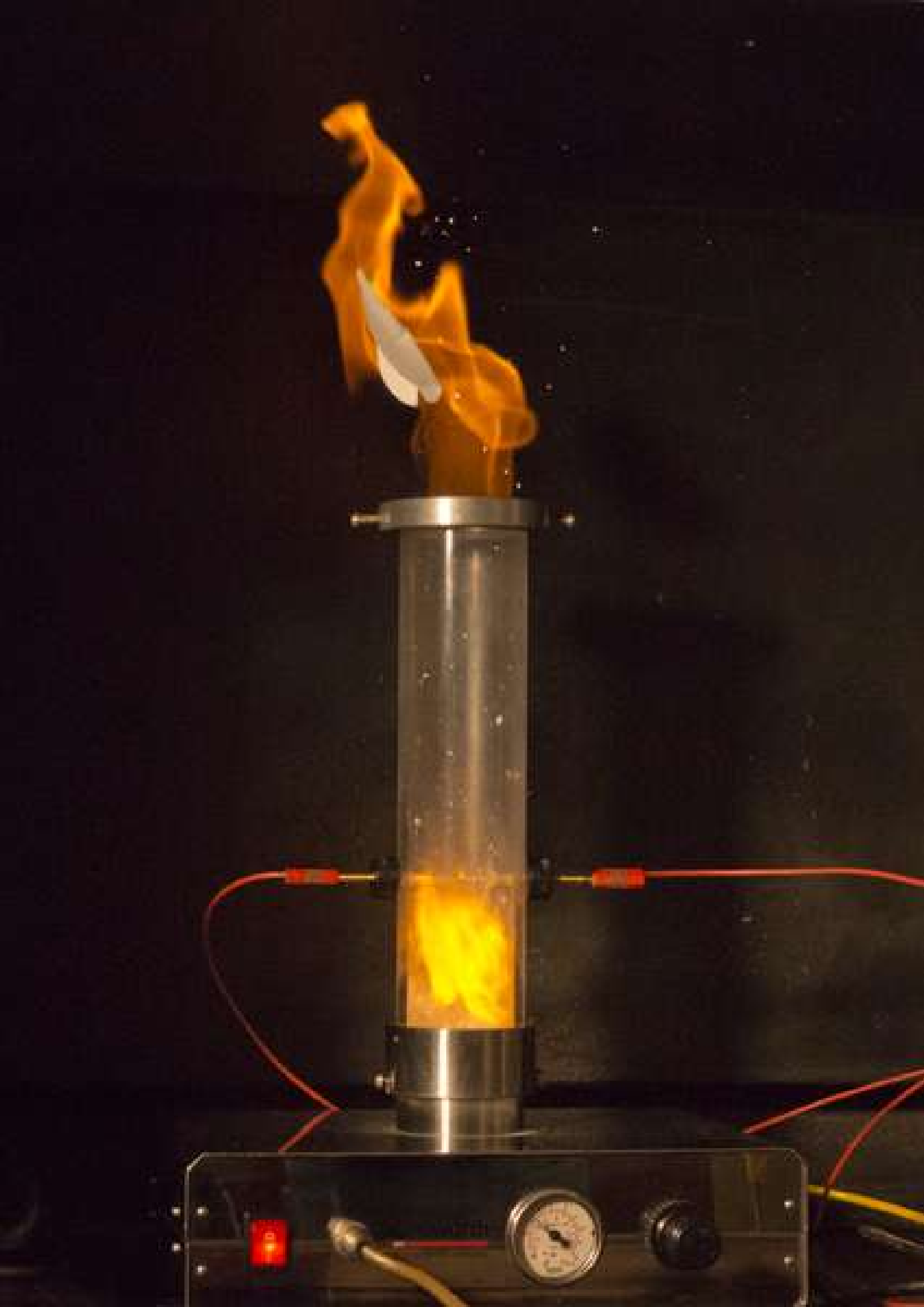
> **Ficha de datos de seguridad (FDS)**

Esta debe incluir datos sobre propiedades fisicoquímicas, como punto de fusión, punto de ebullición, comportamiento de la descomposición, presión de vapor, capacidad de oxidación, propiedades explosivas y de inflamabilidad. Mientras que los riesgos de inflamabilidad de gases y vapores son rutinariamente incluidos en el contenido de una FDS, las propiedades de polvos no están tan bien definidas. En ocasiones, de un polvo puede indicarse "No es inflamable o combustible, pero es capaz de formar una atmósfera explosiva cuando se dispersa en forma de nube". Esta afirmación a menudo es confusa, ya que los polvos pueden ser combustibles en forma de capa o de nube de polvo.

> **Evaluación de la estructura química y la fórmula**

El comportamiento explosivo generalmente está limitado a ciertos grupos funcionales energéticos (compuestos con el grupo nitro, peróxidos, etc). La presencia de cualquier grupo de este tipo es una indicación de que el material presentará inestabilidad térmica. En términos de riesgo potencial de explosión de polvo, cabe esperar que cualquier polvo orgánico (es decir, cualquier polvo que contiene una cantidad significativa de carbono e hidrógeno) será potencialmente combustible.

A lo largo de esta guía se desarrolla una estrategia para la determinación de las características de explosividad y de estabilidad térmica de polvos. El punto de partida inicial es evaluar si el polvo podría presentar características explosivas (es decir, ser capaz de provocar una detonación o una deflagración rápida por inestabilidad). Estos materiales deben ser identificados en la etapa más temprana posible de la evaluación y conllevan unas condiciones de seguridad muy rigurosas.



Antes de comenzar la producción a escala industrial de un producto se puede (y se debe) realizar una evaluación preliminar de las propiedades explosivas del mismo.

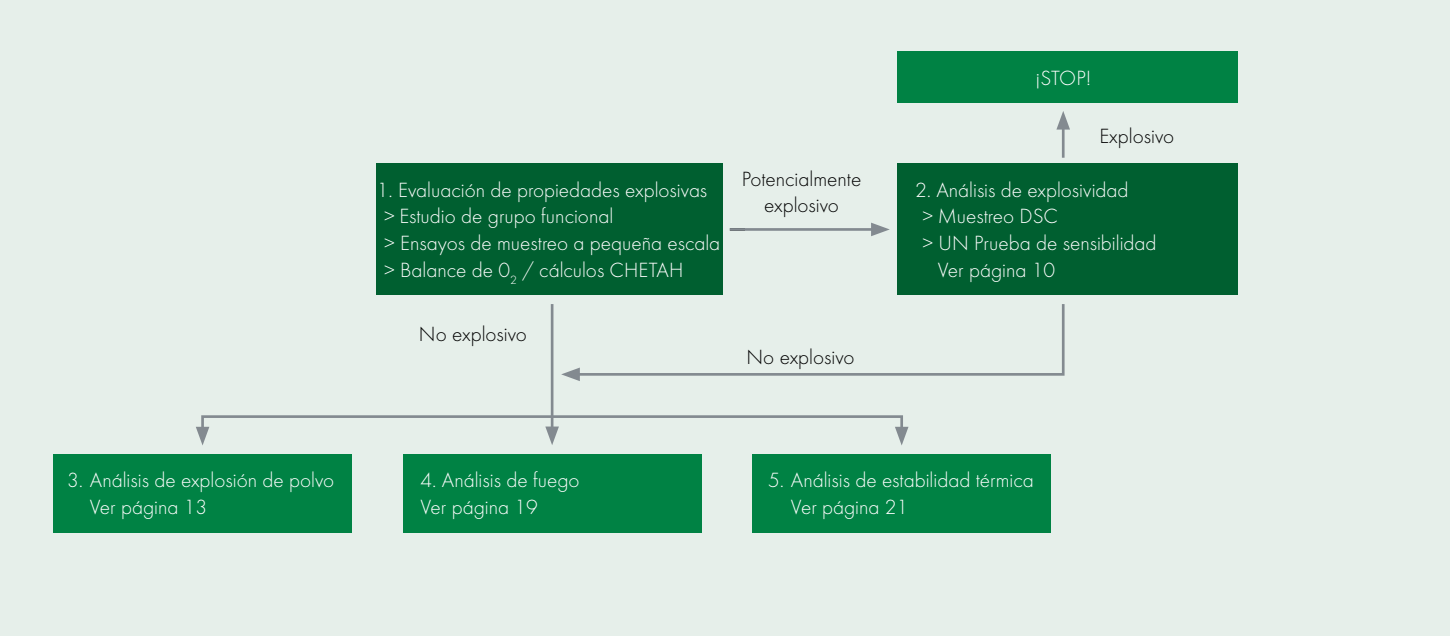


Figura 2. Estrategia de seguridad de proceso para polvos

La figura 2 muestra un diagrama de flujo para evaluar las propiedades explosivas. Los métodos iniciales de muestreo se ubican en el cuadro 1, e incluyen:

- Examen de la estructura molecular, especialmente la búsqueda de grupos funcionales conocidos por su comportamiento explosivo (ejemplo: nitro-, peróxidos, etc),
- Cálculos termodinámicos y predicciones (como balance de oxígeno, CHETAH, etc.), y/o
- Ensayos a pequeña escala del material.

Los ensayos a pequeña escala no necesitan ser exhaustivos. Generalmente es suficiente probar una pequeña cantidad de material en un tubo de ignición o en una espátula y calentarlo rápidamente para evaluar cualitativamente su potencial de descomposición. A fin de proteger al personal y el equipo de laboratorio, todas las muestras de polvo a ensayar en un laboratorio para cualquier tipo de determinación de propiedades físicas, deben someterse a este tipo de ensayos a pequeña escala.

Análisis de explosividad

Si el material es potencialmente explosivo (es decir, si cualquiera de las herramientas anteriores indican un potencial riesgo de explosividad), se requerirá de una investigación más detallada de sus propiedades explosivas (Figura 2). Esto debería empezar con un análisis más detallado de la estabilidad térmica mediante Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). Si los resultados del DSC indican una energía de descomposición > 500 J.g-1 a continuación se deberían acometer pruebas de sensibilidad de la explosión según recomendaciones de las Naciones Unidas (UN) para el transporte de mercancías peligrosas. Deberían llevarse a cabo pruebas de la Serie 3, para confirmar que el material no es demasiado sensible para ser manejado en condiciones de procesado normal.

Para fines de transporte y de clasificación puede requerirse completar los ensayos para determinar las propiedades de severidad de la explosión. Estas pruebas se realizan normalmente usando los métodos de ensayo recomendados por las Naciones Unidas para el transporte de mercancías peligrosas.

Calorimetría diferencial de barrido

¡STOP! – ¿Qué hacemos ahora?

Si un material exhibe propiedades explosivas, esto no es necesariamente el final del camino para ser manipulado o fabricado en la empresa. Pueden considerarse las siguientes opciones:

- Subcontratar la síntesis y manipulación a un tercero, especialista en las fases "peligrosas" del proceso.
- Manipular la sustancia peligrosa en forma suficientemente diluida, de tal manera que sus propiedades explosivas se reduzcan a un nivel aceptable.
- Considerar el uso de otras sustancias alternativas o rutas químicas que no incluyan compuestos explosivos.

En el supuesto de que el material no sea excesivamente sensible (o capaz de detonar), puede ser necesario realizar pruebas adicionales de seguridad, normalmente análisis de estabilidad térmica y combustibilidad del polvo.

Un material no clasificado como explosivo, todavía puede crear un riesgo potencial de incendio.

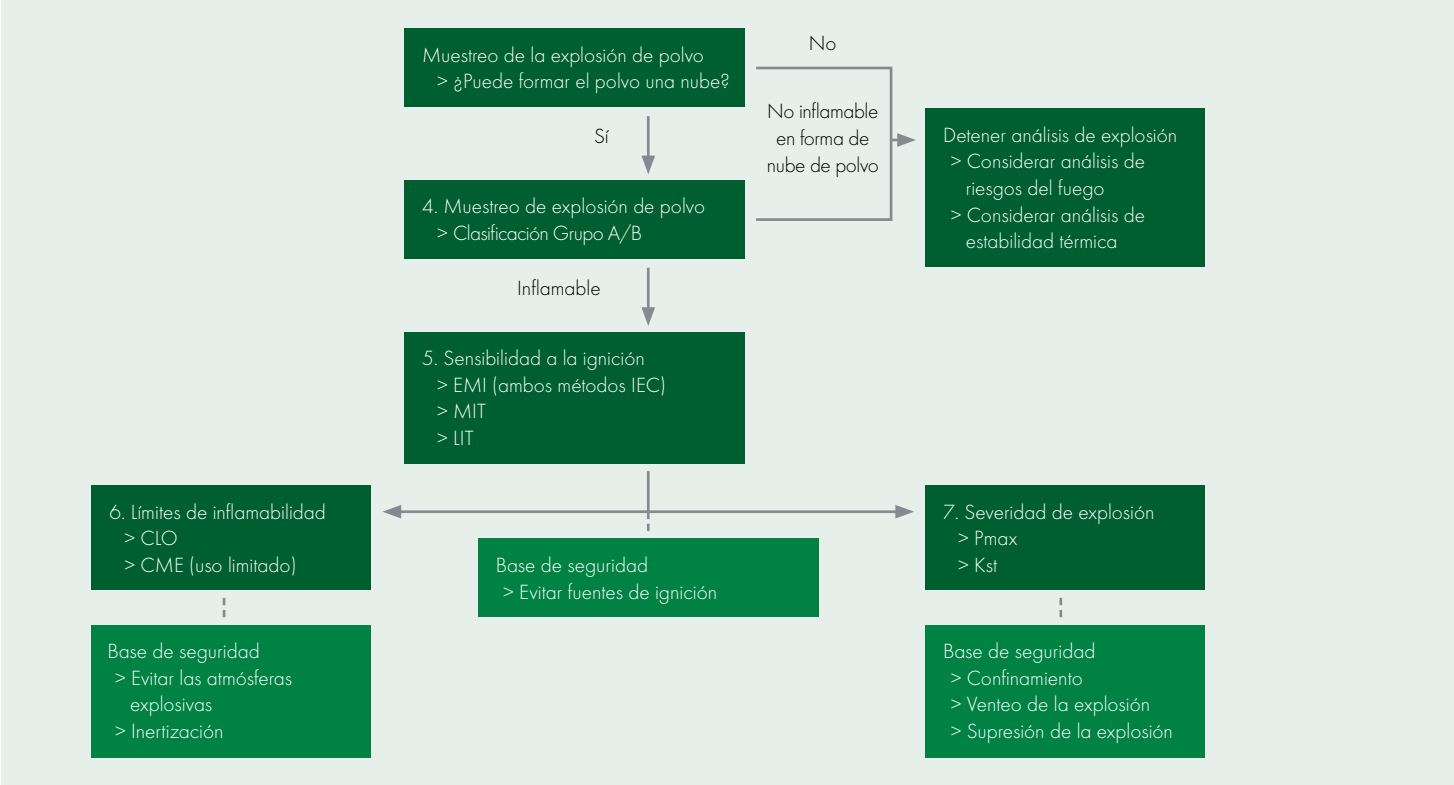


Figura 3. Estrategia de ensayos de explosión de polvo

En primera instancia (Figura 3), la cuestión fundamental que debe responderse es "¿Puede el polvo formar una nube?". Esto no debe interpretarse como "¿Forma el polvo una nube en el puesto de trabajo o en el equipo?".

Puede que el polvo no forme una nube en funcionamiento normal. Sin embargo, sí que es posible que el polvo forme una nube explosiva. En ese caso se debe definir y aplicar una base de seguridad que reduzca el riesgo de una explosión de polvo a un nivel tan bajo como sea posible. Algunos procesos tales como el secado, la carga de polvos en reactores / tolvas / bolsas, transporte neumático, etc. inherentemente implican la formación de nubes de polvo. En otras operaciones, la nube de polvo puede existir en condiciones anormales (a pesar de que la nube de polvo no exista en funcionamiento normal). Un ejemplo podrían ser las capas de polvo acumuladas que se levantan como consecuencia de perturbaciones, formando una nube.

Si el polvo no puede formar una nube (por ejemplo, está lo suficientemente humedecido por agua o disolvente[1] para que físicamente no pueda formar una nube de polvo en ningún momento, tanto en circunstancias normales como de fallo previsibles), entonces no hay ningún riesgo de explosión de polvo. En este caso, es innecesaria cualquier evaluación adicional.

La granulometría influye de una forma decisiva en la inflamabilidad, sensibilidad y severidad de nubes de polvo. Como norma general, las partículas inferiores a 500 µm deben considerarse especialmente inflamables. A la hora de manipular gránulos o pellets, debe tenerse en cuenta la posibilidad de que se generen partículas finas como consecuencia de la fricción. Incluso si sólo hay presente un pequeño porcentaje en peso de partículas finas, ello bastará para plantear un riesgo grave de explosión de polvo. La alteración o el transporte de material a granel harán que las partículas finas queden en suspensión durante mucho tiempo después de haber sido depositadas las partículas de mayor tamaño. Es fundamental tener en cuenta este aspecto a la hora de evaluar los riesgos de inflamabilidad. Es por ello que todos los ensayos deberán llevarse a cabo sobre la muestra de "material (polvo) más fino" que pueda acumularse en condiciones de proceso en planta. Los ensayos realizados con muestras no representativas afectarán sin duda a la validez de los datos recopilados.

1 Para polvos empapados en disolvente hay que considerar las propiedades de inflamabilidad del disolvente (incluso si el polvo no puede formar nubes). Se debe especificar una base de seguridad. Los datos del polvo se requerirán para procesos en los que el polvo se seca, y puede formar una nube.

Muestreo de una explosión de polvo

Si un polvo es capaz de formar una nube explosiva, hay numerosas formas de proteger la planta y a su personal. A fin de determinar si un polvo puede explotar cuando se dispersa en forma de nube, en contraposición a una capa de polvo (véase el recuadro 4, Figura 3) es posible realizar un ensayo de clasificación de tipo A/B (ver apéndice A.2), en el cual un material se puede clasificar como Grupo A (combustible), o Grupo B (no combustible). En la UE, es más comúnmente utilizado el ensayo de explosividad en el equipo esfera de 20L según el método Kuhner, a la hora de evaluar la inflamabilidad de un polvo.

Sin embargo para la mayoría de materiales orgánicos se puede esperar con razonable seguridad que el polvo será inflamable. Es por ello que estos ensayos de muestreo se omiten habitualmente (para mezclas de materiales inflamables orgánicos y no inflamables esta presunción no es necesariamente cierta, por lo que sería conveniente llevar a cabo el ensayo).

Si se decide eludir el ensayo de muestreo Grupo A/B confirmaríamos el supuesto de inflamabilidad, mediante la realización del ensayo de energía mínima de ignición (EMI, ver Apéndice A.3). Estos datos se utilizan habitualmente como parte de la evaluación de seguridad de un proceso para la identificación de potenciales fuentes de ignición, especialmente las descargas electrostáticas y mecánicas (ver figura 4).

Si en las etapas iniciales de la determinación de la EMI el material no se inflama con la aplicación de una fuente de ignición de alta energía (descarga de chispa), entonces el procedimiento de ensayo revertirá a la prueba A/B. Si después de realizar pruebas más exhaustivas, el material demuestra que es Grupo B[1] (es decir, no combustible en forma de nube de polvo), entonces no será necesario ningún ensayo adicional de las nubes de polvo de ese material, aunque se deberá tener en cuenta el riesgo de incendio y de estabilidad térmica.

1 Se clasifica como Grupo B (no inflamable) si no se produce la ignición con una alta energía: una chispa, resistencia o superficies calientes hasta 1000°C. Sin embargo, se debe recordar que todavía habrá que evaluar los riesgos de estabilidad térmica e incendio, incluso si el material es clasificado como del grupo B en forma de nube.

EMI (mJ)	
500	Baja sensibilidad a la ignición. Conectar a tierra cuando la energía de ignición es inferior o igual a este valor.
50	Considerar la puesta a tierra del personal cuando la energía de ignición es inferior o igual a este valor.
25	La mayoría de los incidentes de ignición se producen con energías inferiores. Se debe tener en cuenta el riesgo de descargas electrostáticas en nubes de polvo.
10	Alta sensibilidad a la ignición. Tomar precauciones anteriores y considerar restricciones en el uso de materiales de alta resistividad (plásticos). Considerar los riesgos electrostáticos en polvos a granel de alta resistividad.
1	Extremadamente sensible a la ignición. Tomar precauciones similares a con gases y líquidos inflamables.

(BS5958-1 (1991)

Figura 4. Guía de precauciones electrostáticas para polvos

Ensayo de temperatura mínima de ignición en capa (TIN)

Sensibilidad a la ignición

En el caso de un resultado positivo en el ensayo del grupo A y B (es decir, grupo A combustible), se determinará la facilidad con la que se puede inflamar el polvo (véase el recuadro 5). Las posibles fuentes de ignición pueden incluir descargas electrostáticas, chispas mecánicas (rectificado / fricción) o superficies calientes.

La Energía Mínima de Ignición (EMI) es un parámetro importante al evaluar los riesgos de ignición por descargas incendiarias electrostáticas o mecánicas. Existen dos maneras para determinar la EMI - el método puramente capacitivo o mediante la adición de un inductor en el circuito (el método inductivo). El método inductivo utiliza una inductancia de 1 mH en el circuito de tierra, que da como resultado una duración más prolongada de la descarga de la chispa. Las normas IEC 61241-2-3 / EN 13821 para determinación de la EMI de mezclas de polvo y aire permiten ambas opciones, dependiendo de la aplicación de los datos.

Habitualmente el método inductivo obtiene menores valores de EMI que el método capacitivo. Las EMI's determinadas mediante el método inductivo se pueden utilizar, en combinación con la Temperatura Mínima de Inflamación en nube (ver apéndice A.4) para determinar los riesgos asociados con varios tipos de chispas generadas en procesos mecánicos. El método puramente capacitivo se debe utilizar para la evaluación de los riesgos electrostáticos. El método de determinación de la EMI utilizado debe ser acordado y especificado antes de realizar los ensayos.

La interpretación del valor de la EMI es crítica para asignar una base de seguridad adecuada. La figura 4 establece las precauciones generalmente aceptadas (respecto a las descargas electrostáticas), que deberían emplearse en función únicamente de la energía de ignición.

Cuando los polvos tienen una EMI muy alta, puede ser suficiente el uso de una estrategia de "eliminación de Fuentes de ignición" como concepto exclusivo de Base de Seguridad. Para ello será necesario obtener datos complementarios de la sustancia como: Temperatura Mínima de Inflamación en Nube (TIN) y en capa (TIC) (ver apéndice A.5) y hacer una evaluación de riesgos.

Si la EMI de un polvo es muy baja (típicamente < 25 mJ), se deberán considerar las propiedades electrostáticas del polvo. Los tres parámetros principales a investigar son:

> **Resistividad volumétrica del polvo.**

Da una indicación de cómo de conductor o aislante es el polvo. Los datos se pueden usar también para la selección de los equipos eléctricos.

> **Tiempo de relajación.**

Es una medida de cuánto tiempo necesitará una carga electrostática para bajar hasta niveles seguros. Se usa, junto con datos de resistividad y cargabilidad, para la evaluación de los problemas electrostáticos.

> **Cargabilidad.**

Identifica la facilidad con la que un polvo puede acumular carga electrostática. Proporciona datos sobre la magnitud de la carga electrostática y polaridad cuando los polvos son trasladados a lo largo de materiales estándar tales como tubos de acero y plásticos. Los datos son útiles para identificar escenarios de alta generación de carga, que pueden conducir a que la fuente de ignición esté presente durante una operación de transporte. La información también puede utilizarse para resolver problemas no relacionados con la seguridad, tales como atascos de polvo, apelmazado o mal mezclado, como resultado de la generación excesiva de carga electrostática.

Siempre se debe disponer de la información de sensibilidad a la ignición de un polvo, tanto para su manejo en las operaciones dentro de la planta de proceso, como en el lugar de trabajo. Sólo estos datos permitirán la identificación de todas las fuentes de ignición que son capaces de incendiar la nube, y en consecuencia, las medidas a adoptar. Al igual que la EMI, también se debe determinar la sensibilidad del polvo a la ignición por superficies calientes (incluyendo equipos eléctricos). Se realizan dos tipos de pruebas para evaluar la sensibilidad a la ignición de un polvo por superficies calientes: la temperatura mínima de inflamación en nube (TIN) y la temperatura mínima de inflamación en capa (TIC). En virtud de las normas europeas más recientes, ambas pruebas son necesarias para especificar la temperatura superficial máxima de las envolventes de los aparatos eléctricos y no eléctricos que pueden utilizarse en las zonas potencialmente peligrosas.

Si un material resulta ser sensible a la ignición (es decir, valores bajos de EMI, TIN o TIC), la mera prevención de las fuentes de ignición puede no ser suficiente como base de seguridad. En tales casos, hay que identificar y minimizar en la medida de lo posible las fuentes de ignición, pero habrá que adoptar alguna forma adicional de prevención y/o protección de explosión para configurar la base de seguridad.

Límites de inflamabilidad (nube de polvo)

Si la prevención de las fuentes de ignición no reduce el riesgo de explosión a un nivel suficientemente bajo o aceptable, es necesaria una base de seguridad alternativa. En primer lugar, debe buscarse un medio de prevención de la explosión (véase el recuadro 6 de la figura 2). Normalmente, esto implicará trabajar fuera de los límites de explosividad del polvo o bajo condiciones de atmósfera inerte o inertización parcial.

Con los polvos es difícil trabajar fuera de sus límites explosivos, debido a su capacidad para formar capas de polvo que podrían generar una nube de polvo, y la inherente falta de uniformidad de las concentraciones en una nube de polvo. El límite inferior de explosividad de un polvo, o Concentración Mínima de Explosión (CME) se considera, por lo tanto, de uso limitado para la mayor parte de las situaciones reales. Sin embargo, en procesos con verdadero estado pulverulento, se pueden aplicar tasas de ventilación para garantizar que las concentraciones de polvo están por debajo de la CME.

Normalmente trabajar en una atmósfera empobrecida en oxígeno es la forma más convencional de evitar la presencia o la formación de atmósferas explosivas. Una vez más, esta opción sólo es aplicable a situaciones de confinamiento (es decir, en el interior de depósitos) donde el nivel de oxígeno puede ser fácilmente controlado y supervisado. Cuando se emplea esta base de seguridad, es necesario establecer la concentración límite de oxígeno (CLO) por debajo de la cual una nube de polvo se convierte en no explosiva. Si no se dispone de este dato imprescindible, se deberían fijar, controlar y supervisar muy bajos niveles de oxígeno. Generalmente, estos datos se obtienen a través del ensayo en el aparato de esfera de 20 litros.

Severidad de explosión

Cuando las medidas preventivas por sí solas no son suficientes como base de seguridad, se requiere la adopción de alguna forma de protección contra explosiones de polvo para garantizar la seguridad de los equipos y operarios de la planta.

La protección contra explosiones puede lograrse mediante el uso de:

> **Confinamiento**

Los equipos deben ser suficientemente resistentes a la presión para evitar la ruptura del depósito en el caso de una explosión.

> **Venteo de alivio de la presión de explosión**

Instalación de paneles débiles, dimensionados adecuadamente para evitar sobrepresurización del depósito en caso de explosión.

> **Supresión de la explosión**

Un sistema de protección que detecta y apaga la explosión antes de que se alcancen presiones peligrosas.

Para cualquier método de protección elegido como base de seguridad, deben determinarse los parámetros clave de diseño utilizando los datos de severidad de explosión de la sustancia (véase el recuadro 7 de la figura 2). El ensayo en la esfera de 20 litros proporciona los datos de severidad de la explosión necesarios, incluyendo: la presión máxima de explosión (Pmax) y el ratio de incremento de presión (dP/dt) expresado como una constante de explosión de polvo (Kst). La presión máxima de explosión se utiliza para el diseño de sistemas de confinamiento de la explosión, y la constante de explosión de polvo se utiliza para la especificación de diseño sistemas de venteo y de supresión.

Cuando se emplean sistemas de protección, se requiere prevenir la propagación de la explosión (por ejemplo, mediante válvulas de aislamiento). Estos sistemas deben ser considerados en la evaluación de riesgos.

Casos especiales

Hay algunas situaciones que complican la evaluación de los riesgos de explosión de polvo. Estas incluyen (de forma no exhaustiva): el uso de disolventes para humedecer polvos y polvos que normalmente tienen un tamaño de partícula grande (por ejemplo, gránulos, pellets, tabletas, etc.). A continuación se ofrece una breve orientación sobre la estrategia de ensayos en dichos casos.

Polvos humedecidos con disolvente

La estrategia de ensayos dependerá del nivel de disolvente y la naturaleza física del polvo. Si hay suficiente disolvente para evitar que el polvo pueda formar una nube, las propiedades de los líquidos inflamables serán dominantes y el examen de las propiedades de

explosión de polvo sólo será necesario para la manipulación del polvo seco. Por lo tanto, debe evaluarse la inflamabilidad del disolvente en las condiciones de proceso y, si es necesario, caracterizarla, aplicando una base de seguridad acorde.

Nota: Aunque el polvo humedecido con disolvente puede no ser capaz de formar una nube de polvo, durante el proceso el polvo puede secarse, debido a la evaporación natural del disolvente, especialmente al trabajar a temperaturas elevadas. Por ello pueden aparecer acumulaciones de polvo seco en ciertas áreas del proceso.

Donde un polvo húmedo con disolvente sigue siendo capaz de formar una nube de polvo, se deben considerar las siguientes modificaciones en el tratamiento normal para polvos puros:

- Se debe suponer que la EMI es la del componente más sensible, por lo general el disolvente – si posteriormente se seca el polvo, debe determinarse la EMI del polvo, y se este dato se usará para el manejo del polvo en etapas donde existe material "seco".
- Se deberán determinar la TIN y la TIC del polvo seco y los resultados se compararán con la temperatura mínima de ignición (TMI) del disolvente - el valor límite a la hora de definir la temperatura máxima superficial de las envolventes eléctricas será la temperatura más baja en qué la ignición es posible.
- La CLO y la severidad de la explosión (Pmax y Kst) deben ser determinadas para el sólido húmedo y comparadas con las del polvo seco.

Materiales de gran tamaño departícula y mezclas

Muchos materiales, ya se trate de materias primas, productos intermedios o terminados a menudo se procesan como gránulos o pellets en lugar de polvo fino. En tales casos la pregunta "¿puede el polvo formar una nube?" resulta especialmente importante. La propensión a formar una nube de polvo debe basarse en la consideración de:

- La friabilidad del polvo, es decir, cómo de fácilmente el material forma polvo por desgaste.
- La concentración de polvo fino en el material. Sólo hace falta un pequeño porcentaje de finos para formar una nube de polvo considerable. Además son los finos los que permanecerán en suspensión en el aire si el polvo resulta perturbado.
- Si se puede producir una acumulación de polvo fino durante todas o parte de las operaciones de proceso.
- El potencial de generar polvo fino en las operaciones de proceso.

Si el polvo fino existe o puede formarse fácilmente, se debe seguir la ruta habitual de evaluación de riesgos de explosión de polvo. Si no puede acumularse polvo fino "en las condiciones de proceso previstas" no es necesaria ninguna evaluación de riesgos de explosión de polvo adicional (siempre que se haya descartado que el material granulado sea explosivo).

Todas las normas sobre ensayos de explosión de nubes de polvo determinan el tamaño de partícula máximo de material que debe ensayarse. Por ejemplo, el método EN para determinación de la EMI recomienda que el ensayo se realice en polvo con un diámetro de partículas de menos de 63 µm. En muchos casos, esto requiere algún tipo de preparación de la muestra (reducción de tamaño de partícula) antes del ensayo. Esto puede implicar moler mecánicamente la muestra, y luego tamizarla para obtener el tamaño de partícula correcto. Aunque esto es relativamente sencillo para polvos con un único componente, tales procedimientos, cuando se aplican a las mezclas, pueden conducir a la segregación de los diversos componentes. Esto podría conducir a realizar el ensayo con una muestra no representativa. Por este motivo, la viabilidad de la reducción del tamaño de partícula para polvos compuestos requiere de una cuidadosa evaluación previa.

Carga de polvos en atmósferas explosivas

Cuando se cargan/descargan polvos en ambientes inflamables (por ejemplo, vaciar material de sacos, GRG o "Big Bags" en un reactor lleno de disolvente), generalmente predomina la sensibilidad de ignición del disolvente. Incluso si el disolvente se encuentra por debajo de su punto de inflamación o por debajo del Límite Inferior de Explosividad (LIE), las propiedades de ignición de la nube de polvo pueden verse afectadas. Cuando un polvo está fuera de la influencia de los vapores de disolventes se usarán los valores de sensibilidad a la ignición de la nube de polvo (EMI, TIN y TIC) para evaluar el riesgo de ignición. Cuando pueden estar presentes disolventes en el polvo, tendrá que evaluarse la influencia del disolvente en estos parámetros.

Incluso cuando un depósito está pre-inertizado, la concentración de oxígeno puede aumentar rápidamente durante la carga manual de polvo. Por eso, trabajar por debajo de la CLO no se considera una base aceptable de seguridad, a menos que se establezcan procedimientos especiales para la carga del polvo, que garanticen que la atmósfera en el depósito permanece inerte. Dichas medidas podrán incluir la utilización de válvulas dobles, donde el polvo se pre-inertiza antes de su carga en el depósito. Para obtener más información sobre los riesgos de carga de polvos, consulte el documento de DEKRA "Guía hacia la seguridad de procesos".

Tabla 1. Tabla de clase de combustibilidad - "*Burning Number*" (BZ)
1 - Sin ignición
2 - Ignición y rápida extinción
3 - Combustión localizada sin apenas propagación
4 - Propagación lenta de la combustión
5 - Propagación de fuego abierto
6 - Inflamación

La capacidad de un polvo para propagar una deflagración o un frente de llama requiere de una evaluación para definir el potencial de propagación de una ignición localizada a lo largo de la masa del material. Las propiedades de propagación de fuego de un material se evalúan generalmente en condiciones de laboratorio mediante cualquiera de los ensayos siguientes:

> Ensayo de combustibilidad de sustancias sólidas "*Verein Deutscher Ingenieure (VDI)*"

El ensayo de combustibilidad de sustancias sólidas se realiza a temperatura ambiente y a alta temperatura (100°C) y proporciona una indicación (por medio de una clasificación, clase 1 a 6) de en qué medida se propagará un punto caliente localizado. Ésta es la prueba más adecuada para aplicaciones de seguridad de procesos.

> Ensayo EC y UN Inflamabilidad de sólidos (velocidad de combustión)

Este ensayo proporciona la información requerida por motivos reglamentarios, como la clasificación de "Altamente inflamable" según la estrategia de ensayos EC para el transporte de mercancías peligrosas como Clase 4, división 4.1 Sólido altamente inflamable bajo la metodología de ensayo UN. Estos datos también se pueden utilizar para aplicaciones de seguridad de procesos, pero no proporcionan la información en detalle suficiente como el ensayo VDI de comportamiento de la combustión. Ambos ensayos se realizan a temperatura ambiente.

Estos ensayos pueden formar parte fundamental de una evaluación de riesgos, y los resultados pueden ayudar a la definición de los sistemas de extinción de incendios para mitigar los riesgos planteados por un material con alto riesgo de incendio.

Inflamabilidad de sólidos (velocidad de la combustión)
Montaje de ensayo

En las secciones anteriores de este documento, se han considerado las características de explosividad de las nubes de polvo. Sin embargo, en el caso de que los productos sean procesados a temperaturas elevadas, deberán evaluarse las implicaciones para la seguridad que puede conllevar el almacenamiento a granel o el secado de sólidos. Los datos relativos a la estabilidad térmica de los sólidos se utilizan para definir las temperaturas de funcionamiento en condiciones de seguridad aplicables a los procesos de secado o en situaciones en las que dichos sólidos estén sometidos a temperaturas elevadas. La necesaria evaluación de riesgos deberá incluir datos recopilados de forma experimental con el objetivo de confirmar una propuesta de base de seguridad para su aplicación en procesos de secado o almacenamiento.

No es infrecuente que el polvo se procese a temperaturas elevadas y, a continuación, se almacene en cantidades muy grandes por períodos prolongados de tiempo. Por ello, es fundamental conocer las características de estabilidad térmica de los materiales que se procesan y almacenan, junto con las condiciones de procesamiento de las mismas; de lo contrario, es posible que se inicie un proceso exotérmico peligroso, debido a un autocalentamiento o autorreacción del producto sólido.

Los eventos exotérmicos no deseados durante el manejo de polvo a granel y su almacenamiento normalmente se producen debido a:

> **Descomposición molecular:**

En este tipo de reacción, el material se descompone a un nivel molecular, generalmente liberando calor y productos de descomposición volátiles y/o no condensables. Esta autorreacción no requiere ningún elemento adicional para producirse, y suele ser relativamente independiente de cualquier condición ambiental que no sea la temperatura.

> **Oxidación con autocalentamiento:**

En este tipo de reacción el material reacciona de forma exotérmica con su entorno. No es una autorreacción, ya que requiere de un oxidante para que suceda la reacción. Este tipo de proceso depende en gran medida de las condiciones ambientales tales como la granulometría, la geometría del recipiente de proceso y la disponibilidad de aire. En última instancia, esta reacción suele conducir a la generación de partículas incandescentes, o a la combustión (con llama) del polvo. Los polvos son particularmente susceptibles a este tipo de reacción debido a su pequeña granulometría y a su elevada ratio de superficie por volumen.

Nota: No debe confundirse ninguna de estas dos modalidades de autocalentamiento con el proceso de degradación biológica que se produce, por ejemplo, en un montón de compost.

A la hora de evaluar los riesgos relacionados con la estabilidad térmica, deberán examinarse también las operaciones específicas de procesamiento, con el fin de detectar si existe o no la posibilidad de que se dé alguno de estos mecanismos de reacción o ambos. Esta información servirá de ayuda para seleccionar los métodos de ensayo adecuados y así obtener los datos necesarios correctos.

Muestreo de la estabilidad térmica

Para asegurar que se está seleccionando el análisis correcto, hay dos cuestiones que deben plantearse para decidir si deben examinarse las propiedades de descomposición, de oxidación o ambas: ¿el material tiene un bajo punto de fusión (por lo general < 200°C)? ¿el material se está procesando a temperaturas elevadas en ambiente inerte?. Si la respuesta es "sí" a cualquiera de estas dos preguntas, entonces sólo requieren evaluación las propiedades de descomposición del producto.

Sin embargo, si el material tiene un alto punto de fusión y se procesa en presencia de aire o podría estar expuesto a un oxidante, especialmente en el caso de una fallo de proceso, deben investigarse las propiedades de oxidación. Cabe destacar que, durante los métodos de ensayo de oxidación, se determinará también si se presenta descomposición. La afirmación recíproca no es cierta - es decir, eventos de oxidación no serán identificados en pruebas específicas de descomposición debido a la limitada disponibilidad de aire.

La estrategia general para evaluar la estabilidad térmica de polvo está representada en la figura 5. Esta estrategia se examina con más detalle en las secciones siguientes.

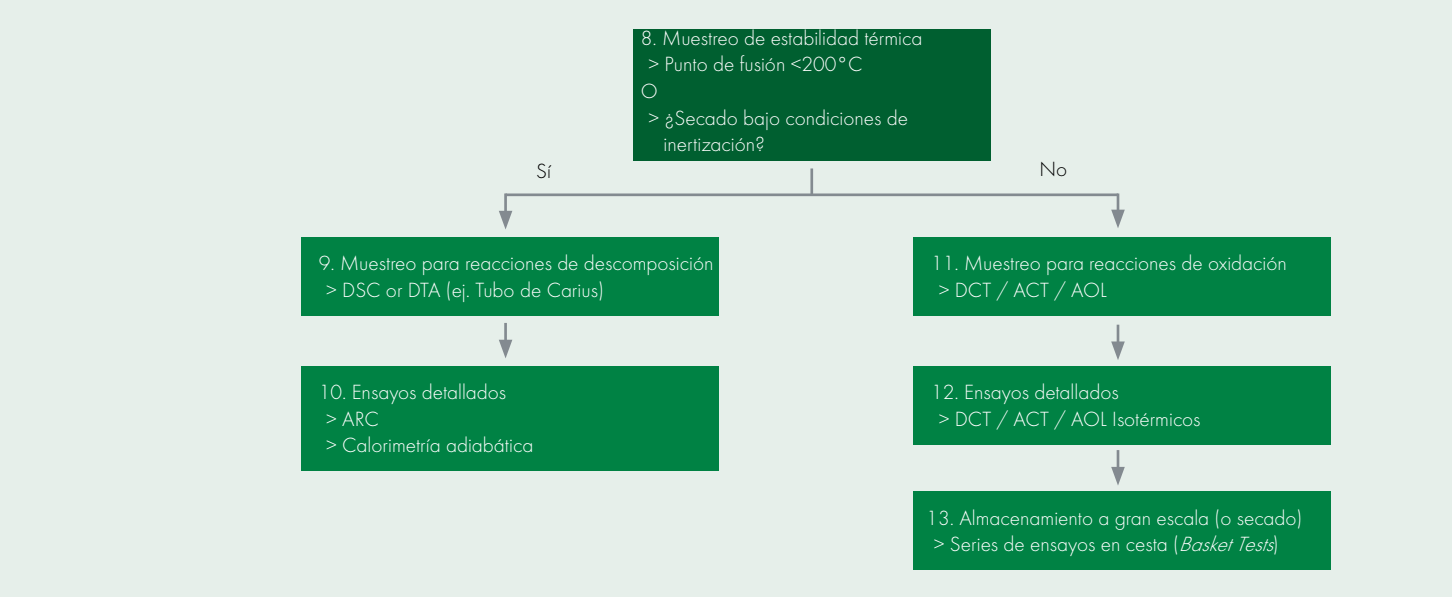


Figura 5. Estrategia de evaluación de estabilidad térmica de polvos

Detección de reacciones de descomposición

Detección

Los métodos convencionales de calorimetría diferencial de barrido (DSC) o análisis térmico diferencial (DTA) pueden utilizarse para identificar eventos de descomposición para líquidos, sólidos o mezclas (véase el cuadro 9 de la figura 4). Estos ensayos se realizan a una escala muy pequeña, con disponibilidad limitada de aire y sólo son aptos para el examen de reacciones de descomposición puras, o auto-reacciones. Los ensayos de muestreo requieren la adopción de márgenes de seguridad considerables para la utilización de los resultados obtenidos por ejemplo, 50°C para el ensayo del tubo de Carius (DTA) y hasta a 100°C para el ensayo DSC. Además presentan las siguientes limitaciones:

- El DSC, aunque proporciona la temperatura "onset" (T0) o de inicio del evento exotérmico y el calor de reacción (ΔHdec), no da ninguna información sobre la generación de gas.
- Los métodos DTA generalmente proporcionan información sobre la generación de gas, así como de la temperatura "onset" (T0), pero no cuantifican completamente la magnitud de un evento exotérmico. Únicamente se distingue una actividad exotérmica mayor o menor.

Si la temperatura "onset" de un evento exotérmico o de generación de gas determinada en cualquiera de estos ensayos, corregida mediante el margen de seguridad adecuado, está por debajo de la temperatura máxima de procesamiento o exposición posible del material (Tmáx), se requieren ensayos adicionales. Se pueden

terminar los ensayos en este punto si la temperatura "onset" (T0) está, con un margen de seguridad adecuado, por encima de Tmáx.

Ensayos detallados

Si se requieren análisis más sensibles se utilizan habitualmente calorimetrías adiabáticas (véase el cuadro 10 de la figura 4). Se pueden usar una amplia gama de calorímetros comerciales para el análisis detallado de la estabilidad térmica. Los métodos de ensayo más comunes incluyen ARC (caloría de tasa acelerante) y la calorimetría adiabática Dewar. Los márgenes de seguridad necesarios para dicha gama de métodos va de 10°C (de los métodos más sensibles) a 30°C (para pruebas de ARC). El método UN para determinar la temperatura de descomposición autoacelerada (SADT) de un material también puede utilizarse. Este enfoque no requiere ningún margen de seguridad, ya que los ensayos están destinados a simular directamente las condiciones de pérdida de calor de recipientes a escala comercial.

Detección de reacciones de oxidación

Detección

Cuando un material está expuesto a temperaturas elevadas en presencia de aire, se requieren métodos de ensayo especiales para evaluar el potencial de oxidación (ver cuadros de 11 y 12 de la figura 4). Los ensayos de descomposición (descritos en el apartado anterior) no están diseñados para examinar las propiedades de oxidación y pueden proporcionar datos engañosos y no seguros, si se usan con este propósito.

Uno o más de los siguientes ensayos se emplean generlamente cuando se consideran reacciones de oxidación:

> **Polvo a granel - celda de difusión (Difusion Cell Test, DCT)**

Este ensayo se utiliza cuando los polvos son procesados o almacenados a granel, y los datos obtenidos son directamente aplicables hasta volúmenes de $1m^3$. En esta prueba, la muestra se calienta mediante una rampa de temperaturas conocida, permitiendo al aire difundirse libremente a través del polvo. El ensayo simula, por ejemplo, la disponibilidad de aire a la que estará expuesto el polvo a granel en un silo de almacenamiento, o en el fondo "sucio" de un secadero.

> **Ensayo en celda aireada (Aerated Cell Test, ACT)**

Este ensayo se utiliza específicamente para aplicaciones de secado de polvos, donde el aire precalentado es forzado a través del material. Un secadero de lecho fluido, o un secadero rotativo son buenos ejemplos en los que se podría aplicar el ACT. El efecto de la variabilidad en la disponibilidad de aire puede alterar el valor de la temperatura de inicio de oxidación térmica en un intervalo de +/-50°C. Un margen que puede afectar significativamente a la seguridad de una operación de secado si se emplea un método de ensayo inadecuado.

> **Ensayo aire sobre capa (Air Over Layer, AOL)**

Esta prueba consiste en examinar la estabilidad térmica de finas capas de polvo donde el aire está fácilmente disponible. Los datos se pueden utilizar al evaluar situaciones como secaderos "spray", o acumulación de capas de polvo en conductos y otras partes de las plantas de proceso.

Se recomienda realizar muestreos iniciales para todos los métodos de ensayo anteriores, elevando la muestra de la temperatura ambiente a 400°C a un ritmo constante de aumento de la temperatura. Si la temperatura de inicio de oxidación estimada está cerca de la temperatura de secado, es decir, a menos de 50°C, o es inferior a 200°C, pueden ser necesarios más ensayos. En primera instancia, esto consiste en una serie de exámenes isotérmicos (la muestra se mantiene a una temperatura constante) para determinar, con mayor precisión, la temperatura mínima a la que ocurre un autocalentamiento significativo. La duración de los ensayos debe igualar o superar la duración de la exposición prevista del proceso a gran escala.

Incluso con ensayos isotérmicos, los resultados están sujetos a restricciones de volumen (sólo válido hasta 1m3) y requieren aplicar un margen de seguridad adecuado de entre 20 y 50°C.

Secado o almacenamiento a gran escala

En determinadas circunstancias, por ejemplo cuando se procesan o almacenan grandes cantidades a granel, será necesario determinar las temperaturas de operación y la duración de almacenamiento aceptables. Estos valores se determinan mediante el ensayo isotérmico "de cestas" (cuadro 13). Para esta serie de ensayos se emplean tres cestas de malla de alambre de volumen diferente. La temperatura mínima de inicio del proceso exotérmico (onset) y la temperatura máxima donde no se observa ninguna reacción se determinan con una tolerancia muy pequeña (normalmente 3°C). Los datos para los 3 tamaños de cesta, se representan gráficamente y pueden extrapolarse, teniendo en cuenta la masa y geometría del recipiente de almacenamiento, a escala industrial. Las temperaturas y los tiempos de duración máxima de trabajo (almacenamiento) seguro pueden obtenerse extrapolando para cualquier tamaño de depósito de almacenamiento.

Las secciones anteriores identifican cómo se pueden aplicar los datos de ensayos de polvo en una evaluación del riesgo para las operaciones más generales de fabricación y proceso. Un enfoque alternativo es identificar los tipos de datos que generalmente se requieren para las operaciones de la planta. La tabla 2 da una visión general de los procesos más habituales que se desarrollan en el entorno industrial donde podrían existir nubes de polvo, y el nivel mínimo de datos necesarios para definir la base de seguridad

Tabla 2. Datos de ensayos de explosión de un polvo - Requisitos para unidades de operaciones específicas

Descripción del proceso	Datos de ensayos necesarios					
	EMI	TIN	TIC	20 litros	CLO	Térmicos
Cargo de recipiente	Sí	Sí	Sí			
Descargo de recipiente	Sí	Sí	Sí			
Mezcla	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	
Desaglomeración	Sí	Sí		Sí	Sí	
Molienda	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	
Compactado	Sí					
Compresión	Sí					
Encapsulado	Sí					
Granulado	Sí			Sí	Sí	
Secado en bandeja	Sí			Sí	Sí	Sí
Secado por microondas	Sí			Sí	Sí	Sí
Secado en lecho fluido	Sí			Sí	Sí	Sí
Secado «*flash*» o en anillo	Sí				Sí	Sí
Secado «*spray*«	Sí	Sí		Sí	Sí	Sí
Recubrimiento por spray	Sí			Sí	Sí	
Pneumatic conveying	Sí					
Filtros	Sí	Sí		Sí	Sí	Sí
Almacenamiento (silo etc.)	Sí			Sí	Sí	Sí

Debe considerarse que, incluso para un proceso específico, son posibles diferentes métodos de operación, por lo que se requiere aplicar una base de seguridad diferente. Esto puede resultar en un protocolo de ensayo diferente a los expuestos anteriormente.

Como se ha dicho anteriormente, el tipo de ensayo de estabilidad térmica necesario dependerá mucho del tipo de secador empleado y las condiciones ambientales. La tabla 3 muestra el tipo de ensayo de estabilidad térmica que puede ser necesario para distintos tipos de secadero.

Tabla 3. Datos de ensayos de estabilidad térmica específicos para operaciones de secado

Tipos de secado	Aire sobre capa (ACT)	Celda aireada (CAT)	Celda de difusión (CDT)	DSC
Spray	Sí		Sí	Sí
Lecho fluido		Sí	Sí	Sí
Vacío			Sí	Sí
Bandeja	Sí		Sí	Sí
Flash	Sí		Sí	Sí

Nota: La tabla anterior muestra los tipos de ensayos que pueden ser necesarios. Sin embargo, dependiendo de las condiciones de funcionamiento de los equipos, no será necesario llevar a cabo ciertos ensayos. Por ejemplo, en un secadero de bandejas pequeño, donde el espesor del polvo es <15mm y no se han identificado propiedades explosivas, sólo se seleccionaría el ensayo AOL. Sin embargo, para capas mayores de polvo se seleccionaría el "*Difusión Cell Test*" en lugar del AOL.

Este documento ha proporcionado un enfoque metódico para ensayos de polvo, y puede utilizarse como una guía a las empresas para evaluar el potencial explosivo de las sustancias sólidas así como los riesgos de explosión de las nubes de polvo y de estabilidad térmica en cualquier operación industrial. La estrategia general se representa en la figura 6.

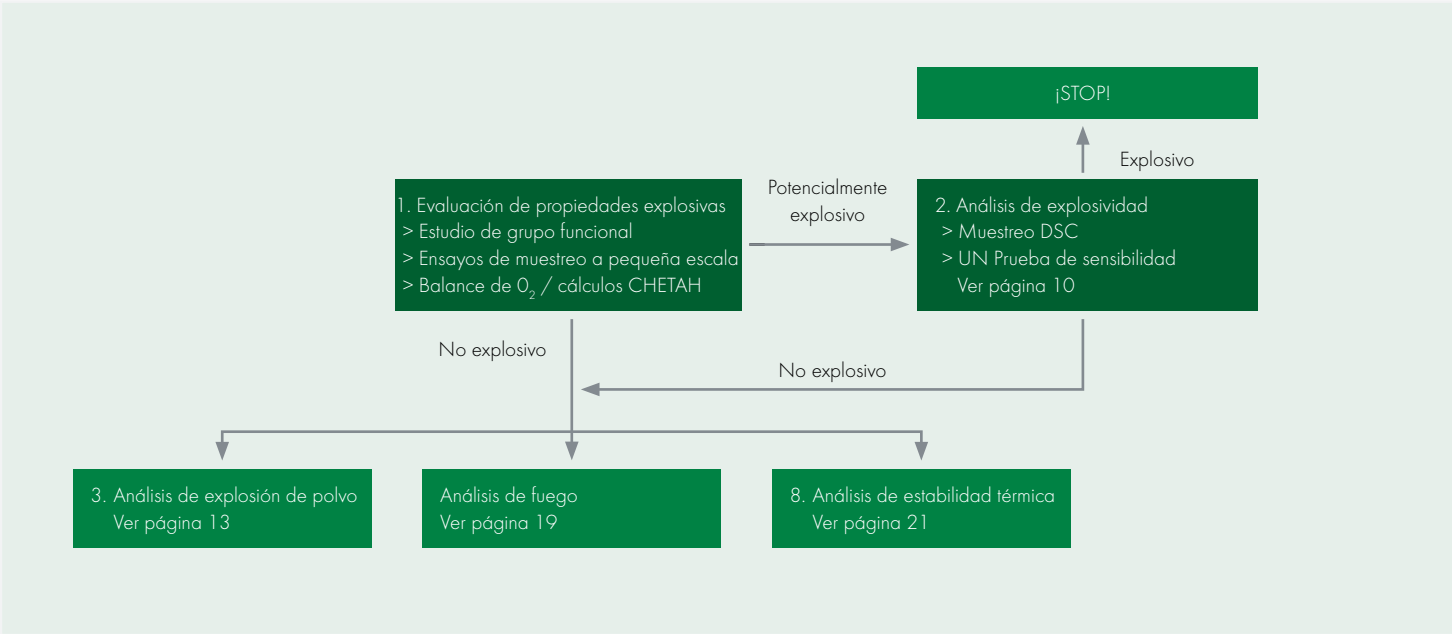


Figura 6. Estrategia de ensayos de seguridad de procesos para polvos

En resumen, se recomienda el siguiente enfoque cuando se considere la realización de ensayos de polvo:

- Empezar con la valoración de las posibles propiedades explosivas del material. Esta evaluación debe ser completada antes de llevar a cabo cualquier proceso a gran escala (o ensayos).
- Se debe desarrollar, documentar y mantener una base de seguridad para todas las operaciones. Con el fin de confirmar esta base de seguridad, será necesario obtener datos de combustibilidad / estabilidad térmica para cada material utilizado o almacenado en la planta.
- Cualquier material nuevo introducido en un proceso de fabricación también deberá evaluarse para confirmar la adecuación de la base existente de seguridad para el nuevo material.
- Los ensayos deben reproducir lo más fielmente posible las condiciones de la planta. Mientras que muchos parámetros pueden obtenerse de ensayos estándar, otros pueden requerir soluciones innovadoras y ensayos a medida. DEKRA desarrolla habitualmente soluciones de ensayo únicas para situaciones específicas.

Muestreo de varios polvos

Los procedimientos de ensayo estándar, como se detalla en este documento, sirven como guía a fin de proporcionar una estrategia de ensayos para un polvo, ya sea en forma de nube, en capa, o a granel. Sin embargo, en las instalaciones multiproducto (por ejemplo, laboratorios farmacéuticos, empresas químicas), estas pruebas detalladas pueden no ser económicamente viables. En estos casos, puede ser más conveniente llevar a cabo un ejercicio de detección más rápida y rentable para una amplia variedad de propiedades. Este enfoque de detección puede utilizarse para confirmar que un nuevo producto encaja dentro de los criterios de diseño de la planta para una gama de propiedades de inflamabilidad / estabilidad térmica, sin tener que realizar un análisis detallado de cada propiedad.

> DustScreen™

Este producto totalmente personalizado identifica los parámetros de seguridad clave que deben ser conocidos para apoyar una base específica de seguridad. Cada material es ensayado inicialmente en un nivel preseleccionado para cada parámetro clave. Por ejemplo, los equipos eléctricos tienen una temperatura superficial máxima específica y, por lo tanto, se llevan a cabo las pruebas de TIC, TIN a dicha temperatura para determinar si un polvo se puede utilizar con este equipo. Se pueden continuar las pruebas con aquellos productos que no superen la primera fase, ensayándolos a un segundo nivel y, si se requiere, a un tercer nivel, para determinar el caso peor. Dustscreen™ ha sido desarrollado específicamente para empresas que usan una gran variedad de polvos en una misma planta.

En DEKRA, ofrecemos un servicio integral para la seguridad de procesos. Entendemos la importancia de la satisfacción del cliente para su fidelización y el crecimiento de nuestro negocio. Nuestro equipo de especialistas de seguridad de procesos está disponible para apoyar al cliente en la aplicación de los datos de ensayos a sus situaciones operativas únicas. Podemos ayudarle en la definición de una base de seguridad para cualquier proceso y en el desarrollo de programas de ensayos adaptados para proporcionar los datos que necesita de una manera económicamente viable.

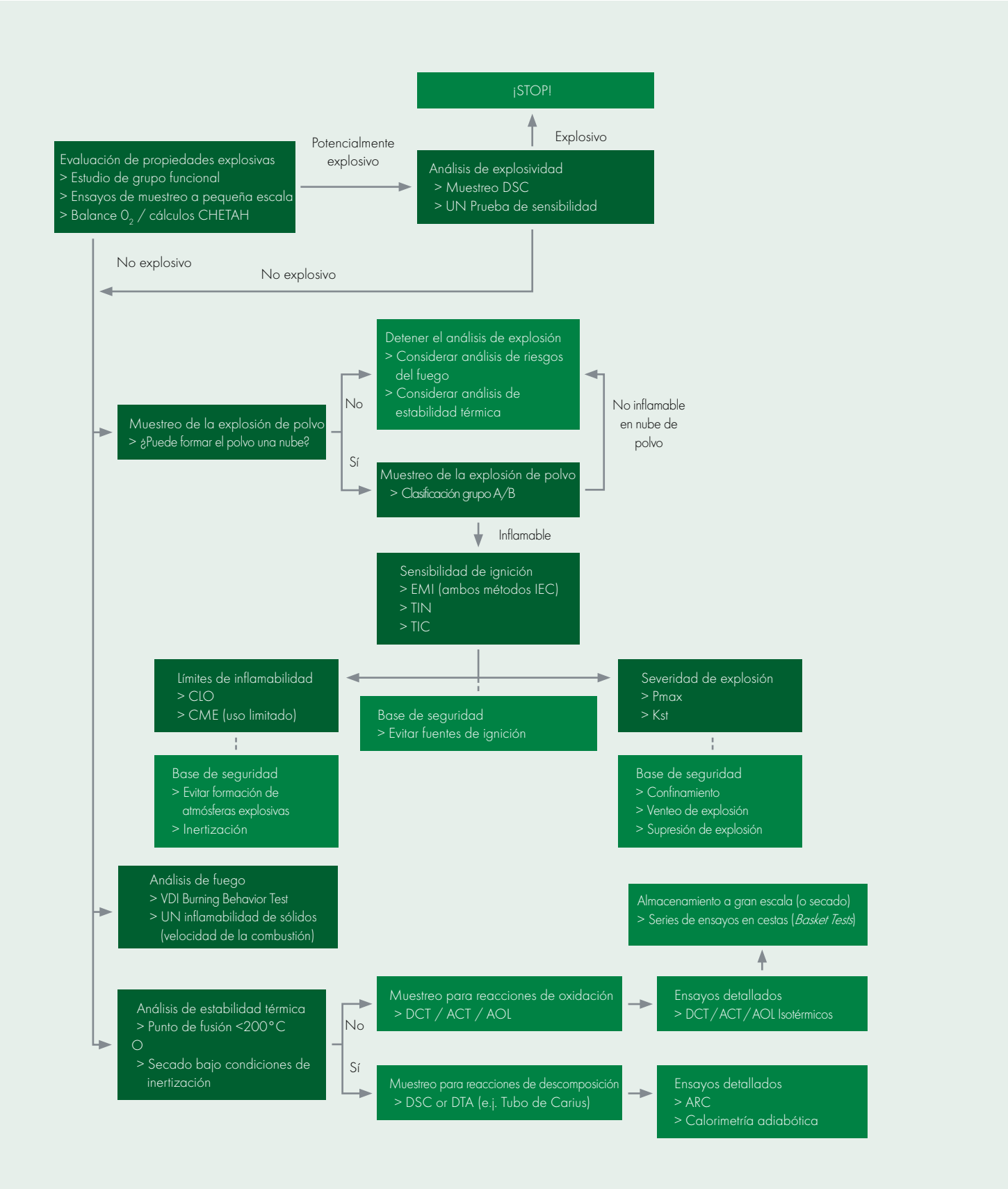


Figura 7. Estrategia para ensayos de explosión de polvo

Chilworth
Air Pressure

A1. El enfoque de DEKRA para ensayos

DEKRA puede realizar una gran variedad de ensayos de seguridad de procesos, examinando los riesgos de explosión de polvos, vapores y gases, las características de estabilidad térmica de polvos, líquidos y mezclas, así como calorimetrías de reacción para garantizar un funcionamiento seguro de los reactores.

- Muchos clientes no están seguros del ensayo adecuado, o los datos necesarios para resolver un problema específico de un proceso. Los laboratorios y el equipo consultor de DEKRA están disponibles para prestar asistencia en la elección de los ensayos más adecuados y de la forma más económica. Esta consultoría previa (así como las aclaraciones de los resultados post-ensayo) se proporciona sin ningún coste. DEKRA se enorgullece del alto nivel de asistencia que proporciona al cliente.
- Cada ensayo (excepto los ensayos diseñados a medida del cliente) se llevan a cabo según normas internacionales y de las Normas de Procedimiento Operativo (SOP) internas.
- Todos los ensayos se realizan en base a los principios BPL (Buenas Prácticas de Laboratorio). Esta rigurosa norma de calidad está concebida para garantizar que la trazabilidad, mantenimiento de registros, capacitación del personal, la calibración y el mantenimiento de los equipos se realizan al más alto nivel. DEKRA es único en prestar servicios de ensayo para Seguridad de Procesos con acreditación BPL.
- Los productos a ensayar deben ser, en la medida en que sea razonablemente posible, los mismos que están presentes en la planta. Esto evita ensayar sustancias con características y/o impurezas diferentes a las efectivamente utilizadas en la planta.
- Para los ensayos de explosión de polvo, las normas indican que los materiales deben ser "los más finos y secos" disponibles en la planta. Por coherencia con esto, y para ser algo conservadores, los ensayos se realizan en materiales con < 5% de humedad y, donde las normas lo indican, un tamaño de partícula específica (normalmente < 75µm). Las mezclas de polvos se procesan con precaución para evitar la separación de materiales (ej. por tamizado) que podría dar lugar a materiales no representativos. Al tomar muestras para ensayos se debe ser muy cuidadoso, para garantizar que todas son verdaderamente representativas de las características de los materiales a granel.
- Existen versiones reducidas de muchos de los ensayos. En DEKRA, salvo que se indique específicamente lo contrario, los ensayos se llevarán a cabo de conformidad con el método normalizado (por ejemplo. EN, IEC, ASTM, etc.). En algunos casos, se pueden llevar a cabo ensayos reducidos para generar datos específicos. Las limitaciones de estos métodos de ensayo deben ser aceptadas previamente a la aceptación de sus resultados. Cuando se comparan los ensayos y resultados con datos externos, se debe confirmar el grado de cumplimiento de dichos datos externos con el método estándar.
- Todos los datos de ensayos generados por DEKRA se recopilan en un informe. Esto incluye información básica sobre el material (granulometría, contenido de humedad y análisis térmico preliminar), completa interpretación de los resultados y asistencia para la aplicación de los resultados derivados del ensayo.
- DERKA participa en muchos estudios internacionales de calibración, para contrastar la consistencia de los resultados con otros laboratorios de ensayos. A demanda, podemos proporcionar los resultados de tales estudios donde participa. Reconocemos la importancia fundamental de proporcionar a nuestros clientes datos que respondan a sus necesidades específicas y, cuando no existe una prueba estándar, desarrollamos soluciones a medida.

A2. Ensayo de clasificación grupo A/B Prueba de explosividad

Apéndice A2i. Ensayo de clasificación A/B

Norma internacional	No existe una norma internacional, pero el ensayo es considerado una "Buena práctica" (en Reino Unido e Irlanda).
Cantidad de muestra	100 g
Ensayo alternativo	Ensayo esfera 20L, ensayo tubo Hartman modificado.
Propósito	Evaluar si un polvo, dispersado en el aire puede manifestar un riesgo de explosión tanto en condiciones ambientales como a elevada temperatura.
Método	El ensayo de clasificación A/B se realiza utilizando un equipo conocido como el aparato de tubo vertical. Consiste en un tubo acrílico montado verticalmente, de un volumen aproximado de 1 litro. El tubo está equipado con aire comprimido, un sistema de dispersión de polvo y con electrodos de latón conectados a un transformador de alta tensión. El transformador se utiliza para crear un arco continuo de alta energía entre los dos electrodos. El procedimiento de ensayo refleja el objetivo del ensayo, se adoptan todas las medidas razonables para intentar inflamar la muestra de polvo disperso en el aire en condiciones ambientales de presión y temperatura. La secuencia de pruebas es como sigue: 1. El polvo es ensayado inicialmente en las condiciones 'según se recibió' en una amplia gama de concentraciones. 2. Si no hay ignición, a continuación se tamiza la muestra, y se ensayan de nuevo las fracciones más finas como en (1) 3. Si todavía no se observa ignición el polvo se seca en el horno a 105°C durante 1 hora y el polvo original y las fracciones finas se vuelven a ensayar cuando el polvo se ha enfriado. 4. Si no se observa ignición, se reemplazan los electrodos por una resistencia caliente a aproximadamente 1000°C y se ensaya la muestra tamizada y seca. En algunas circunstancias el material puede ser procesado a temperaturas elevadas (por encima de 110°C). En este caso, si no se ha producido la ignición del material después de completar los 4 pasos anteriores, se somete la muestra tamizada y seca a una prueba más. El producto, en forma de una nube de polvo, se hace pasar a través de un horno vertical con una temperatura superficial de 1000°C. Si alguna de las pruebas anteriores produce la propagación de una llama a través del polvo disperso, lejos de la fuente de ignición, el polvo se clasifica como grupo A (explosivo/combustible).
Resultados e interpretación	Si se determina que el material es combustible en forma de nube de polvo, se clasifica como grupo A y serán necesarios ensayos adicionales para garantizar las condiciones de funcionamiento seguras. Si se constató que pertenece al Grupo B (no combustible), no serán necesarias más pruebas con la nube de polvo, pero se debe tener en cuenta que aún deberán evaluarse las características de estabilidad térmica y de incendio.
Versiones reducidas	No existe una versión reducida de este ensayo
Limitaciones	La prueba no es adecuada para la clasificación de líquidos y gases. Las fuentes de ignición utilizadas en la prueba tienen una energía moderada. Es raro (pero no imposible) que se pueda producir la ignición de materiales clasificados como Grupo B en este ensayo cuando se usan fuentes de ignición de mayor energía. Si en una planta o proceso pueden existir fuentes de ignición de muy alta energía (se habrá identificado en una adecuada evaluación de riesgos), se debería realizar el ensayo de la esfera de 20 litros que utiliza una fuente de ignición de energía más alta 10kJ.

Apéndice A2ii. Test de Explosividad

Norma internacional	Manual de operación Kuhner
Cantidad de muestra	200 g
Ensayo alternativo	Clasificación grupo A/B
Propósito	Examinar si un polvo en suspensión puede presentar un riesgo de explosión bajo condiciones ambientales
Método	El ensayo comienza utilizando una concentración baja de polvo y continua aumentando el rango de concentraciones de polvo. La fuente de ignición la proporcionan 2x1kJ iniciadores químicos. El registro de tiempo/presión de cada explosión se guarda a través de 2 transductores piezoeléctricos de presión conectados a un sistema de adquisición de datos de un ordenadores. La fuente de ignición se activa de forma automática a los 0.06 s después de la dispersión del polvo en la cámara esférica de ensayo, a fin de mantener un nivel de turbulencia del polvo constante y confiable.
Resultados e interpretación	Un polvo al que no se le puede inducir una explosión en un amplia rango de concentraciones con una energía de 2x1kJ (iniciadores químicos) se clasifica como no explosivo. Esto significac que muy probablemente el polvo no podrá explotar, excepto si se aplican fuentes de ignición de energía superior (EI > 2kJ).
Versiones reducidas	No existe una versión reducida de este ensayo.
Limitaciones	El ensayo es para muestras sólidos y no es aplicable a gases y vapores.

A3. Ensayo de energía mínima de ignición (EMI)

Apéndice A3. Ensayo de energía mínima de ignición (EMI)	
Norma internacional	EN 13821 o IEC 61241-2-3.
Cantidad de muestra	250 g
Ensayo alternativo	VDI Fortschritt - Berichte Reihe 3: Verfahrenstechnik Nr 134.
Propósito	Determinar la energía mínima de una chispa electrostática o mecánica capaz de inflamar un polvo disperso en el aire en condiciones ambientales.
Método	La energía mínima de ignición (EMI) se mide utilizando el equipo conocido como tubo vertical. Consiste en un tubo acrílico montado verticalmente, de un volumen aproximado de 1 litro. El tubo está equipado con aire comprimido, un sistema de dispersión de polvo y electrodos entre los que se generan chispas de una energía conocida. La medición de la EMI implica dispersar repetidamente concentraciones diferentes de polvo a través de chispas de energía conocida. Las concentraciones de polvo para estas pruebas son mayores que para la concentración mínima explosiva (CME). Si se observa una ignición, se reduce la energía de la chispa hasta que no se producen más igniciones del polvo; en este momento se ha alcanzado la energía mínima de ignición del polvo. Las chispas aplicadas pueden ser puramente capacitivas, y los datos se utilizan para examinar los riesgos electrostáticos y / o generadas a través de un inductor adicional, montado en el circuito de tierra, en cuyo caso los datos se pueden utilizar en la evaluación de chispas mecánicas. Es habitual que las chispas inductivas sean más incendiarias (es decir, proporcionan una EMI inferior) en comparación con chispas puramente capacitivas. El uso que se va a dar a los datos obtenidos debe ser conocido para poder seleccionar la metodología de ensayo más adecuada.
Resultados e interpretación	La energía mínima de ignición se considera la energía más baja a la que se produce la ignición de un polvo en dispersión (en su concentración más sensible). Siempre se da como un rango de valores entre la energía más alta donde no se observó ignición, y la menor energía donde si la hubo (p.ej 10 - 25 mJ).
Versiones reducidas	Existen algunas variantes del ensayo: 1. Determinación completa del la EMI con un margen del +/- 20% de la energía de ignición más baja. 2. Estudio del rango de seguridad (examen de la EMI sólo a 500, 100, 25 y 5 mJ).
Limitaciones	La prueba es sólo adecuada para muestras sólidas y no se puede utilizar (directamente) para gases y vapores (aunque existe una prueba similar para estos materiales). El resultado se determina a temperatura ambiente. La EMI puede reducirse drásticamente a temperatura elevada (se pueden utilizar extrapolaciones para estimar la EMI a temperatura elevada). Los sólidos que contienen volátiles o disolventes inflamables pueden dar un resultado poco fiable en esta prueba. En tales casos, debe utilizarse la EMI del vapor (si es inflamable a temperatura ambiente) ya que es probable que sea el peor de los casos y el valor más realista.

A4. Ensayo de temperatura mínima de ignición en nube (TIN)

Apéndice A4. Ensayo de temperatura mínima de ignición en nueb (TIN)	
Norma internacional	EN 50281-2-1 o IEC 61241-2-1.
Cantidad de muestra	200 g
Ensayo alternativo	Horno BAM
Propósito	Determinar la mínima temperatura de una superficie caliente capaz de provocar la ignición de una nube de polvo.
Método	El ensayo de la TIN se lleva a cabo en el horno de Godbert Greenwald. El horno consiste en un tubo de vitreosil vertical que está abierto en la base. Una cámara de observación de cristal está montada en la parte superior del tubo y también conecta con el portamuestras, colocado horizontalmente. El polvo se dispersa en el horno con aire comprimido de un calderín al portamuestras, la cámara de observación y el tubo vertical. El horno está montado sobre un soporte, lo que permite la observación de la base o salida del horno, para identificar cualquier signo de ignición (llama) en ese punto. Se coloca un espejo debajo del tubo para posibilitar la visión del interior del horno. El horno es calentado eléctricamente a una temperatura predeterminada, de la ambiente a 1000°C. Se colocan dos termopares centrados en la pared de horno para controlar la temperatura de ensayo. Los termopares son capaces de tomar mediciones de temperatura por encima de 500°C ± 1% y por debajo de 300°C ± 3%. El aparato está montado en una envolvente de la que se pueden extraer los humos y el polvo. La muestra puede requerir una preparación según norma (normalmente humedad < 10% y < 63µm) y se modifican las concentraciones de polvo para asegurar que se tiene en cuenta la concentración más sensible. La prueba comienza a 500°C y, si se observa ignición, la temperatura se reduce en pasos de 20°C hasta 300°C. Si se sigue produciendo la ignición, a continuación, la temperatura de ensayo se reduce en pasos de 10°C hasta que se produzca una situación de "no ignición".
Resultados e interpretación	Temperatura mínima del ignición de una nube de polvo se considera como la temperatura más baja del horno a la que se obtiene la ignición, menos 20°C para temperaturas de horno por encima de 300°C, y menos 10°C para temperaturas de horno por debajo de los 300°C. La información de la TIN se usa principalmente para garantizar que las temperaturas superficiales de elementos de la planta no puedan causar autoinflamación del polvo en dispersión. Para compensar las incertidumbres derivadas de la pequeña escala de los ensayos, se utiliza un margen de seguridad para los datos de la TIN (por lo general se consideran 2/3 de la TIN como la máxima temperatura superficial admisible de las envolventes de aparatos eléctricos). La TIN es un parámetro usado como criterio para la selección del material eléctrico adecuado que operará en ambientes pulverulentos. El segundo parámetro también relevante para esta aplicación es el valor de TIC de una capa de polvo (que normalmente se supone de 5 mm como máximo).
Limitaciones	La prueba es válida sólo para muestras sólidas y no es aplicable para gases y vapores (existe un ensayo de la temperatura de autoinflamación de gases y vapores).

A5. Ensayo de temperatura mínima de ignición en capa (TIC)

Apéndice A5. Ensayo de temperatura mínima de ignición en capa (TIC)	
Norma internacional	ASTM E2021, EN50821-2-1 o IEC 61241-2-1.
Cantidad de muestra	500 g
Ensayo alternativo	N/A
Propósito	Determinar la temperatura mínima de una superficie caliente capaz de provocar la ignición de una capa de polvo (de 5 mm de espesor).
Método	La densidad de la capa de polvo se calcula con el volumen del anillo de contención de la muestra, y pesando el anillo de polvo antes y después de haber sido rellenado con la capa de polvo. El aparato (una placa calefactada de temperatura controlada) está instalado en una posición libre de corrientes de aire, pero con posibilidad de extraer el humo. Se registra la temperatura ambiente y, a continuación, se sitúa el anillo metálico en el centro de la placa caliente, y se coloca un termopar de medición de la temperatura de la muestra. La capa de polvo de 5 mm se genera colocando la muestra en el anillo con una espátula y distribuyéndola con un movimiento lateral de la espátula, hasta que el anillo está ligeramente sobrellenado. La capa se nivela enrasando por la parte superior del anillo, y se retira cualquier exceso de material de la superficie de la placa caliente. Inicialmente se efectúa una prueba de muestreo elevando la temperatura de la placa calefactora en aproximadamente 5 K.min-1 hasta una temperatura máxima de 400°C. Toda la información se recopila mediante un sistema de registro de datos conectado a un ordenador. La gráfica resultante es analizada para determinar un punto de inicio estimado para las pruebas isotérmicas. Las pruebas isotérmicas continúan, poniendo la placa caliente a la temperatura de inicio predeterminada. La prueba continúa hasta que se ha comprobado que se ha desencadenado uno de los dos fenómenos siguientes; la capa arde (llama visible) o se autocalienta sin arder (incandescencia). Si, después de treinta minutos, no se ha producido ignición o autocalentamiento, la prueba se termina y se repite a una temperatura superior. Si se produce ignición o autocalentamiento, la prueba se repite a temperaturas más bajas, si es necesario se prolongará la prueba más allá de treinta minutos. La prueba estará completa únicamente cuando se han identificado las temperaturas, con una diferencia de 10°C, que dan lugar / no dan lugar a la ignición. Si no hay ignición a 400°C, se repiten las pruebas a 200 y 300°C para confirmar el resultado de "no ignición".
Resultados e interpretación	La TIC se define como la temperatura más baja de una superficie caliente capaz de producir la ignición de una capa de polvo de 5 mm. Se entiende por ignición: > Se observan partículas incandescentes o llamas, o > Se mide una temperatura de 450°C o > Se registra un incremento de temperatura de 250°C sobre la temperatura de la placa caliente. Se aplicará un margen de seguridad de 75°C al valor experimental de la TIN cuando este dato se utilice para definir la máxima temperatura superficial de los equipos eléctricos.
Versiones reducidas	Existen varias versiones reducidas de este ensayo: 1. Muestreo de polvo a una temperatura constante acordada. 2. Para clasificación de la temperatura de equipos eléctricos (temperaturas equivalentes de equipos a 450, 300, 200, 135°C). 3. Como parte de un paquete CHARP (sólo a 400°C y a 275°C).
Limitaciones	El ensayo estándar solo analiza capas de 5 mm (las capas de mayor espesor pueden dar resultados más bajos).

A6. Ensayo de severidad de explosión de un polvo (ensayo en esfera de 20 litros)

Apéndice A6. Ensayo de severidad de explosión de un polvo (ensayo en esfera de 20 litros)	
Norma internacional	EN 14034 y manual de operación de Kuhner.
Cantidad de muestra	750 g
Ensayo alternativo	Ensayo en esfera de 1 m^3.
Propósito	Medir la severidad de una explosión de polvo, definida por lo siguiente: > Pmax Máxima presión de explosión en bar(g) > (dP/dt) max Máximo ratio de incremento de presión (en bar.s-1) > Kst Valor relacionado con el máximo ratio de incremento de presión en un recipiente de 1 m3 (en bar.m.s-1) > St Class Clase de severidad explosión (sin unidad)
Método	Pmax y (dP/dt) max, se miden mediante una prueba de explosión en un recipiente esférico de 20 litros de volumen resistente a la presión (volumen mínimo en el que los resultados de explosión pueden ser escalados). A continuación se calcula el valor de Kst y se define la clase St. El ensayo comienza usando una concentración de polvo baja, y continúa con una gama de concentraciones diferentes de polvo. La fuente de ignición es generada por dos detonadores químicos de 5kJ. El registro de la presión / tiempo de la explosión se registra con 2 transductores piezoeléctricos de presión, conectados a un sistema de registro de datos en un ordenador. La fuente de ignición se activa automáticamente después de 0,06 s tras la dispersión del polvo en la cámara esférica de ensayo, con el fin de que exista un nivel de turbulencia de polvo constante y fiable. Una primera serie de pruebas normalmente cubre 7 concentraciones de polvo y, después, se continúa con dos series más que estudian las concentraciones de polvo óptimas que han sido determinadas de la primera serie de pruebas.
Resultados e interpretación	Durante las pruebas por triplicado de polvos en la esfera de 20 litros, se ensayan un mínimo de siete concentraciones de polvo diferentes en la primera serie, y las concentraciones de polvo que producen los valores más altos para Pmax y dP/dt max se repiten dos veces más, proporcionando tres tablas de resultados. Se genera una cuarta tabla para representar los valores promedio para cada una de las concentraciones probadas. Los valores definitivos de Pmax, dP/dtmax y Kst se calculan a partir de la media de los valores máximos durante las series 1, 2 y 3. No se toman los valores máximos, ya que, cualquier variación en la turbulencia o química de la fuente de ignición puede afectar los resultados ligeramente. Por ello, los datos son promediados entre las tres series de pruebas. El nivel de turbulencia es seleccionado para asemejarse a datos procedentes de recipientes de escala industrial.
Versiones reducidas	Existen varias versiones reducidas de este ensayo: 1. Muestreo de polvos para identificar el peor caso de un grupo de productos. 2. Determinación serie simple (solo 7 dispersiones) - no recomendado para diseño. 3. Como parte de un paquete CHARP (serie simple, sólo 7 dispersiones).
Limitaciones	El ensayo es sólo para muestras sólidas y no se puede utilizar (directamente) para gases y vapores (aunque existe una prueba similar para estos). La prueba considera solamente condiciones ambientales de temperatura y presión. En la esfera de 20 litros se pueden ensayar mezclas híbridas (polvos mezclados con gases inflamables) modificando ligeramente el procedimiento.

A7. Ensayo de concentración límite de oxígeno (CLO)

Apéndice A7. Ensayo de concentración límite de oxígeno (CLO)	
Norma internacional	EN 14034-4 y manual de operación de Kuhner.
Cantidad de muestra	500 g (o 1000 g si también se mide la severidad de explosión).
Ensayo alternativo	Ensayo en esfera de 1 $m^{3.}$
Propósito	Determinar la máxima concentración de oxígeno a la cual la ignición de una nube de polvo en dispersión no es posible.
Método	La Concentración límite de Oxígeno (CLO), por debajo de la cual la ignición de polvo en suspensión no es posible, se determina en una cámara de explosión esférica de 20 litros de volumen. Este aparato está aceptado internacionalmente para la determinación de la presión máxima explosión y el valor de Kst de polvo. Proporciona un control de la presión y de la ignición máxima, y permite perfectamente la limitación de la concentración de oxígeno. El procedimiento de ensayo consiste en pre-mezclar aire y nitrógeno en la relación correcta, permitiendo conocer el tipo de atmósfera pobre en oxígeno. El sistema deberá calibrarse mediante un analizador de oxígeno. A continuación, se realizan ensayos de explosión con diversos niveles de oxígeno (conocidos). Cabe señalar que la fuente de ignición utilizada en estas pruebas son 2 x 1 kJ detonantes químicos, frente a los 2 x 5 KJ (10 kJ) empleados para la medición de la severidad de la explosión. Los datos de presión/tiempo para cada prueba se registran utilizando 2 transductores piezoeléctricos de presión, conectados a un sistema de registro de datos de un ordenador. La prueba se inicia con la determinación de la severidad de de la explosión, con una sola serie de pruebas en condiciones ambientales (21% de oxígeno), para determinar la mayor severidad (concentración de polvo óptima). Se mantendrá la relación entre la concentración de polvo y el porcentaje de oxígeno, puesto que el nivel de oxígeno se reduce para determinar la CLO. En el punto de mayor concentración de oxígeno en el que no se observe ignición, se repetirán las pruebas utilizando una gama de concentraciones diferentes de polvo. Si se observa ignición en esta etapa del procedimiento, se reduce el nivel de oxígeno y se repiten las pruebas las pruebas igual que antes.
Resultados e interpretación	Una explosión de presión > 0.5 bar(g) define una ignición. El valor de la CLO no se usa normalmente de forma directa para establecer los niveles de inertización, ya que hay que aplicar factores de seguridad que compensen la sensibilidad, precisión y fiabilidad de los sistemas de control de la planta.
Versiones reducidas	Ensayos por muestreo a niveles pre definidos (ejemplo: 10, 12, 14 y 16% de oxígeno).
Limitaciones	El ensayo sólo sirve para muestras sólidas y no se puede utilizar (directamente) para gases y vapores (aunque existe un ensayo similar para estos). El ensayo sólo considera condiciones ambientales de temperatura y presión.

A8. Concentración mínima explosiva (CME) en la esfera de 20 litros

Apéndice A8. Concentración mínima explosiva (CME) en la esfera de 20 litros.	
Norma internacional	EN 14034-3 (2005) y manual de operación de Kuhner.
Cantidad de muestra	150 g
Ensayo alternativo	Ensayo en esfera de 1 m^3.
Propósito	Determinar la concentración mínima de polvo a la cual es posible la ignición.
Método	La Concentración Mínima Explosiva (CME) se determina utilizando el aparato de la esfera de 20 litros. La prueba comienza con pruebas a una concentración de polvo relativamente alta (p.ej. 250 g.m-3). Si a esta concentración de polvo se produce ignición, con una fuente de ignición de 2 x 1 kJ, la concentración de polvo se reduce en escalones hasta que no se manifiesta ignición. Esta situación debe repetirse para tres pruebas consecutivas a la concentración dada. Si durante las pruebas de repetición se observa una ignición, se reduce la concentración de polvo aún más, y las pruebas se repiten hasta que se produzca una situación de no ignición para las 3 repeticiones a una concentración dada. El registro de tiempo / presión de cada explosión es registrado por transductores de presión piezoeléctricos conectados a un sistema de registro de datos informatizado. La fuente de ignición se activa automáticamente en 0,06 s después de la dispersión, para obtener el nivel de turbulencia de polvo conforme a la norma. Es esencial para el ensayo mantener el aparato escrupulosamente limpio para evitar falsas lecturas positivas.
Resultados e interpretación	La ignición queda de manifiesto ante un pico de presión > 0.5 barg. La concentración mínima de explosión (CME) se utiliza a veces para el diseño del equipo con corriente de aire suficiente para mantener los niveles de polvo por debajo del límite de explosividad. Sin embargo este enfoque debe utilizarse con prudencia, ya que, en la práctica las nubes de polvo son raramente uniformes y pueden surgir fácilmente circunstancias imprevistas que den lugar a concentraciones explosivas localizadas, aunque la concentración media de la nube de polvo pueda estar por debajo de la concentración mínima de explosión (CME).
Versiones reducidas	Ensayos por muestreo a niveles pre definidos (ejemplo. 125, 75, 50, 25 g.m-3)
Limitaciones	El ensayo es sólo para muestras sólidas y no se puede utilizar (directamente) para gases y vapores (aunque existe una prueba similar para estos). El ensayo considera sólo condiciones ambientales de temperatura y presión.

A9. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Apéndice A9. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	
Norma internacional	Existen diversas normas ASTM para la aplicación del DSC.
Cantidad de muestra	50 mg
Ensayo alternativo	-
Propósito	Determinar la energía asociada a la descomposición de un material o mezcla, dato que puede utilizarse para la determinación de las propiedades explosivas de un material. También puede determinarse la temperatura de inicio (onset) de un evento exotérmico o endotérmico. Pueden realizarse análisis cinéticos de la reacción de descomposición para su extrapolación a una escala mayor. Debido al pequeño tamaño de la muestra, no se recomienda el uso de esta técnica en el estudio de las mezclas de reacción o muestras heterogéneas debido a la poca representatividad de la muestra (el tubo de Carius es una técnica más apropiada en tales casos).
Método	Se carga una pequeña cantidad de muestra (normalmente 5 - 20 mg) en la celda de ensayo (cuyo material puede ser acero inoxidable, aluminio u oro). Para estudios de seguridad son más adecuadas las celdas selladas que resisten altas presiones (para evitar las pérdidas por evaporación). A continuación, se calienta la muestra en paralelo con una muestra patrón de referencia idéntica. La velocidad de calentamiento es normalmente de entre 1 y 20 K.min-1, teniendo en cuenta que cuanto más rápido se realice la aportación de calor a la muestra, menos exactos serán los resultados obtenidos de la temperatura de inicio (onset). Se registra cualquier actividad exotérmica o endotérmica a través de la medición de flujo de calor entre la muestra y el patrón. La cantidad de energía liberada o absorbida por la muestra puede integrarse para obtener la energía global de la reacción. Los ensayos pueden llevarse a cabo de forma isoterma para el estudio de las reacciones autocatalíticas, o con diferentes rampas para la extracción de datos cinéticos.
Resultados e interpretación	Normalmente, se obtiene un gráfico potencia / tiempo. La interpretación es llevada a cabo por el sistema de control, que proporcionará datos (en el gráfico del ensayo) relativos a la temperatura inicio (onset) y a la energía de la reacción (usualmente en J.g-1). La temperatura de inicio obtenida no es absoluta (debido al alto factor phi y las pérdidas de calor de esta técnica de ensayo) y es imprescindible aplicar al resultado obtenido un factor de seguridad. Normalmente, para tasas de calentamiento altas (> 5 K.min-1), debe emplearse un factor de seguridad de 100 K. La energía de descomposición no requiere tal corrección, y se puede usar directamente. Se pueden llevar a cabo los ensayos en atmósfera inerte con nitrógeno y con aire y los resultados obtenidos pueden compararse para determinar si un evento es debido a una oxidación o a una descomposición. Cualquier energía de descomposición > 800 J.g-1 indica potenciales propiedades explosivas en el material.
Versiones reducidas	No existen versiones reducidas de este ensayo.
Limitaciones	Los resultados no son directamente escalables (es decir, hay que aplicar un margen de seguridad). Para los polvos la falta de disponibilidad de aire puede impedir la detección de reacciones de oxidación. Este método no detecta incrementos de presión (por ejemplo, generación de gas). Las mezclas son difíciles de estudiar, ya que es muy complicado obtener una muestra representativa de este tamaño tan pequeño.

A10. Ensayo tubo de Carius (10g)

Apéndice A10. Ensayo de muestreo tubo Carius (10g)	
Norma internacional	No hay una norma formal, aunque el método se describe en las publicaciones de ABPI e IChemE sobre evaluación de riesgos de reacciones químicas y es considerado una buena práctica.
Cantidad de muestra	110 g por ensayo (aunque mejor 30 g para duplicar el ensayo).
Ensayo alternativo	Existen varios métodos alternativos de muestreo para análisis térmico.
Propósito	El ensayo está diseñado para ofrecer una indicación preliminar del comportamiento térmico de un material. Se determinan eventos exotérmicos, endotérmicos y de generación de gas de manera semi cuantitativa. El ensayo puede llevarse a cabo de un líquido, sólido o mezcla.
Método	Se coloca una pequeña cantidad de material (10 - 15 cm3) en el tubo de Carius, el cual se sitúa en el centro de un horno, conectado a un transductor de presión y se aplica una rampa de calentamiento (a una velocidad constante típica de 0,5 K.min-1) desde la temperatura ambiente hasta 400°C o hasta que se alcanza una presión en el tubo de 55 barg (lo que ocurra primero). Los eventos energéticos son indicados por desviaciones positivas (exotérmico) o negativas (endotérmico) con respecto al diferencial de temperatura entre la muestra y el horno. Este ensayo permite dosificar componentes y agitar la mezcla de reacción.
Resultados e interpretación	Se obtienen tres gráficos. En el gráfico (a) se representa la temperatura y presión versus tiempo. En el gráfico (b) se representa la temperatura versus la diferencia entre la temperatura del horno y la de la muestra. El gráfico (c) es una gráfica del ln (presión) versus la inversa de la temperatura absoluta. La aparición de un evento se registra como el punto en el que justo se observa una desviación en el diferencial de temperatura (hacia arriba = exotérmico, abajo = endotérmico). Habitualmente se considera un factor de seguridad de 50 K para tener en cuenta las pérdidas de calor de los equipos de ensayo. La dimensión en altura (y anchura) del pico de temperatura es una medida de la magnitud del evento (únicamente de forma cualitativa). Un pico amplio es indicativo de una reacción controlada por la transferencia de masa. En la gráfica de Antoine (c), una desviación de la linealidad de indica el comienzo de la generación de gases no condensables. Una vez terminado el ensayo, a presión residual en el tubo después de la refrigeración da una medida cuantitativa de los gases generados (se puede aplicar espectrometría de masas para evaluar la naturaleza del gas).
Versiones reducidas	No hay versiones reducidas del ensayo.
Limitaciones	Los resultados no son directamente escalables (es decir, se requiere un margen de seguridad). La falta de disponibilidad de aire puede obstaculizar la detección de eventos de oxidación en los polvos.

A11. Ensayo en celda en difusión (*Diffusion Cell*)

Apéndice A11. Ensayo en celda en difusión (*Diffusion Cell*)	
Norma internacional	Este ensayo satisface las especificaciones del libro "Prevention of Fire & Explosions in Dryers" 1990 IChemE, páginas 21 - 23, y es considerado una Buena práctica.
Cantidad de muestra	150 g
Ensayo alternativo	Ensayos en cestas (Basket Tests).
Propósito	Simular las condiciones de silos o bolsas así como en la parte inferior de secaderos, donde se puede acumular material a granel con difusión natural de aire. Si el calor desarrollado por una reacción de la sustancia con el oxígeno, o por una descomposición exotérmica no se evacúa al entorno con la suficiente rapidez, se produce un auto-calentamiento que puede conducir a la auto-ignición. La auto-ignición se produce por tanto cuando el ratio de producción de calor excede el de la pérdida del mismo. El ensayo es útil para realizar estudios preliminares en sustancias pulverulentas.
Método	El ensayo se realiza a temperatura programada en un horno de 30 litros de volumen equipado con paneles de explosión y circulación de aire asistida con ventilador. Se coloca en el centro del horno un cilindro de vidrio de aproximadamente 100 mm de altura y 50 mm de diámetro, cerrado en la base con un material de vidrio poroso sinterizado y la parte superior abierta, para permitir la difusión de aire. La temperatura del horno está continuamente supervisada por termopares estratégicamente colocados. Cuatro termopares se utilizan para detectar cualquier actividad exotérmica en la muestra, y proporcionar la temperatura de inicio (la temperatura a la cual aumenta la temperatura de la muestra independientemente de la temperatura del horno). La temperatura del horno y de la muestra se registra continuamente mientras se incrementa la temperatura del horno hasta alcanzar 400°C, o hasta el punto de fusión del sólido, si es inferior a una velocidad de 0,5 K.min-1. El ensayo también puede llevarse a cabo isotérmicamente, en cuyo caso la temperatura del horno permanece constante a la temperatura definida.
Resultados e interpretación	La mayor parte de las veces la reacción exotérmica y la ignición de la capa de polvo suceden por un proceso de autocalentamiento debido a la oxidación atmosférica. Cuando la temperatura de una capa de polvo alcanza un nivel suficiente, se pueden dar las condiciones en las cuales el calor generado por la reacción exotérmica es mayor que las pérdidas de calor al entorno, y se desarrolla un fenómeno de aumento de temperatura. Los polvos a granel, o las capas gruesas de polvo, se inflaman a una temperatura menor que las capas finas del mismo material, debido a que la superficie por unidad de masa y, por lo tanto, la tasa de pérdida de calor por unidad de masa se reduce. Puesto que la ignición empieza dentro de la masa de polvo a granel, puede transcurrir un tiempo considerable hasta que la misma sea visible en la superficie. El ensayo de la celda de difusión simula las condiciones en tolvas, silos, sacos o secaderos de polvo a granel (es decir, cualquier situación donde puede ocurrir difusión natural de aire a través de un polvo). El ensayo también se puede aplicar a situaciones donde el producto puede acumularse en un proceso de secado, resultando en acumulaciones de materias a granel o de capas gruesas durante un largo período de tiempo. Como el ensayo tiene pérdidas de calor altas, normalmente se aplica un margen de seguridad de 50°C a la temperatura de inicio exotérmico que se haya determinado en los ensayos isotermos.
Versiones reducidas	No hay versiones reducidas del ensayo.
Limitaciones	Los resultados no son directamente escalables y requieren un margen de seguridad (por lo general 50°C). Debido a la naturaleza porosa de la base de la celda de prueba, no puede estudiarse ninguna muestra más allá de su punto de fusión. En tales casos deberían considerarse pruebas alternativas para líquidos.

A12. Ensayo en celda aireada (*Aerated Cell*)

Apéndice A12. Ensayo en celda aireada (*Aereted Cell*)	
Norma internacional	Este ensayo satisface las especificaciones del libro "Prevention of Fire & Explosions in Dryers" 1990 IChemE, páginas 16 - 18, y es considerado una Buena práctica.
Cantidad de muestra	150 g
Ensayo alternativo	No existe.
Propósito	Simular las condiciones en secaderos (o situaciones similares) en los que una corriente de aire pasa a través del material a granel (p.ej. lecho fluido o secaderos rotativos de tambor). Si el calor generado por la reacción de oxidación o de descomposición del producto no se transmite a los alrededores a una tasa suficientemente elevada, se pueden producir autocalentamientos que deriven en una auto-ignición. La auto-ignición se produce cuando la tasa de producción de calor supera la tasa de pérdida de calor. El ensayo es útil para realizar estudios preliminares en sustancias pulverulentas.
Método	El ensayo se realiza a temperatura programada en un horno de 30 litros de volumen equipado con paneles de explosión y circulación de aire asistida con ventilador. Se coloca en el centro del horno un cilindro de vidrio de aproximadamente 100 mm de altura y 50 mm de diámetro, cerrado en la base con un material de vidrio poroso sinterizado y la parte superior abierta, para permitir la difusión de aire. Se fuerza el paso de un caudal de 0,6 l.min-1 de aire precalentado a través de la muestra. Cuatro termopares permiten detectar cualquier actividad exotérmica en la muestra, y proporcionar la temperatura de inicio (la temperatura a la que aumenta la temperatura de la muestra independientemente de la temperatura del horno). La temperatura del horno, del flujo de aire y de la muestra se registra continuamente mientras se incrementa la temperatura del horno hasta alcanzar 400°C, o hasta el punto de fusión del sólido, si es inferior, a una velocidad de 0,5 K.min-1. El ensayo también puede llevarse a cabo isotérmicamente, en cuyo caso la temperatura del horno permanece constante a la temperatura definida.
Resultados e interpretaciones	El polvo a granel, o las capas gruesas, se inflaman a una temperatura menor que el mismo material en capas finas, debido que la superficie por unidad de masa y, por lo tanto, la tasa de pérdida de calor por unidad de masa se reduce. Puesto que la ignición empieza dentro de la masa de polvo a granel, puede transcurrir un tiempo considerable hasta que la misma es visible en la superficie. Una mayor disponibilidad de aire a través del material puede afectar a la temperatura de inicio y a la severidad de la descomposición exotérmica. La celda de ensayo aireada simula unas condiciones de proceso donde el aire pasa a través del polvo, y proporciona una temperatura de inicio y una indicación de la gravedad de la descomposición exotérmica más representativa de estas situaciones. Se debe aplicar un margen de seguridad, normalmente de 30°C, a la temperatura de inicio de la reacción basada en los ensayos de ignición isotérmicos (para entornos aireados). Para entornos de polvo estático es más apropiado el ensayo anterior. En cualquier caso, se recomienda considerar ambos ensayos para cubrir las condiciones de funcionamiento normales y anormales en estos tipos de secaderos. Se han encontrado diferencias de hasta 50 °C para un mismo material en los dos tipos de ensayos.
Versión reducida	No hay versiones reducidas del ensayo.
Limitaciones	Los resultados no son directamente escalables y requieren un margen de seguridad (por lo general 30°C). Debido a la naturaleza porosa de la base de la celda de prueba, no puede estudiarse ninguna muestra más allá de su punto de fusión. En tales casos deberían considerarse pruebas alternativas para líquidos.

A13. Ensayo de aire sobre capa (*Air Over Layer*)

Apéndice A13. Ensayo de aire sobre capa (*Air Over Layer*)	
Norma internacional	Este ensayo satisface las especificaciones del libro "Prevention of Fire & Explosions in Dryers" 1990 IChemE, páginas 18-20, y es considerado una Buena práctica.
Cantidad de muestra	50 g
Ensayo alternativo	No existe.
Propósito	Simular las condiciones en secaderos tipo "spray", flujo cruzado y bandeja, en los que el aire caliente pasa sobre una fina capa de material. La prueba también puede utilizarse para simular las condiciones de depósitos de material en las superficies internas de cualquier tipo de equipos que operen a una temperatura elevada. Si el calor desarrollado por una reacción de la sustancia con el oxígeno, o por una descomposición exotérmica no se evacúa al entorno con la suficiente rapidez, se produce un auto-calentamiento que puede conducir a la auto-ignición.
Método	El ensayo se realiza a temperatura programada, en un horno horizontal de 300 mm de longitud y 70 mm de diámetro. La muestra se coloca en una bandeja de metal (75 mm x 40 mm x 15 mm de profundidad) y la bandeja se introduce en el horno. Se hace pasar aire caliente sobre la muestra y alrededor de la misma con una velocidad de 4,5 m.min-1. La profundidad de la capa puede equipararse a una aplicación industrial hasta una profundidad máxima de 25 mm. Se usan termopares para supervisar y registrar la temperatura dentro de la muestra, el horno y el flujo de aire, mientras se incrementa la temperatura del horno hasta alcanzar 400°C, o hasta el punto de fusión del sólido, si es inferior, a una velocidad de 0,5 K.min-1. El ensayo también puede llevarse a cabo isotérmicamente, en cuyo caso la temperatura del horno permanece constante a la temperatura definida.
Resultados e interpretación	La temperatura mínima de autoinflamación de una capa depende de diversos parámetros, incluyendo la naturaleza de la capa, su profundidad y el tiempo de exposición al calor. Si estos son predecibles, puede realizarse una evaluación fiable del riesgo mediante pruebas de laboratorio a pequeña escala. El ensayo de "aire sobre capa" nunca se utiliza para proporcionar por si solo las temperaturas máximas de funcionamiento seguras para secaderos. Sin embargo, utilizando la información obtenida en la prueba, se pueden realizar una serie de ensayos isotérmicos, donde la muestra se mantiene a una temperatura y por un periodo superior a la temperatura y tiempo de secado requeridos. Si es necesario, los ensayos isotérmicos se llevan a cabo a temperaturas progresivamente más bajas hasta que no se produce el autocalentamiento. Se aplica un margen de seguridad, normalmente de 20°C, a la temperatura de inicio de la reacción que se haya determinado en los ensayos isotérmicos (para capas de polvo). Para situaciones con capas de polvo gruesas y estáticas, es más apropiado el ensayo de la celda de difusión, mientras que, para escenarios con el aire pasando a través del polvo, es más adecuado el ensayo de celda airea.
Versiones reducidas	No hay versiones reducidas del ensayo.
Limitaciones	Los resultados no son escalables directamente, y requieren la aplicación de un margen de seguridad (típicamente 20°C). La bandeja portamuestras no es totalmente estanca y, por ello, no se puede estudiar un material por encima de su punto de fusión. En tales casos se deberían considerar ensayos alternativos para líquidos. El espesor de las capas es un parámetro crítico en este ensayo, y las capas estudiadas tienen que ser representativas de la situación industrial.

A14. Determinación de temperaturas seguras de almacenamiento de materiales a granel

Apéndice A14. Determinación de temperaturas seguras de almacenamiento de materiales a granel	
Norma internacional	BS EN 15188
Cantidad de muestra	8 kg
Ensayo alternativo	No existe.
Propósito	Determinar la temperatura de almacenamiento seguro del polvo a granel en un contenedor especificado de cualquier volumen y geometría. La prueba permite la difusión natural de aire a través de la muestra y, por tanto, simula las condiciones de almacenamiento a gran escala (ej. en silos). Los resultados del ensayo pueden utilizarse para definir la clasificación de transporte para sólidos que potencialmente presenten autocalentamiento (ej. UN clase 4, división 4.2).
Método	Se utilizan unos recipientes cúbicos hechos de malla de acero inoxidable (cestas). Normalmente se utilizan tres tamaños de cestas de 25, 50 y 100 milímetros de lado respectivamente. A veces los materiales no se comportan linealmente utilizando la cesta de 25 mm y en estos casos se seleccionan los tamaños de 50, 75, 100, o incluso de 150 mm lado. Inicialmente se usa la cesta de 50 mm, ya que ofrece una buena indicación de la temperatura de inicio usando poca cantidad de muestra. Se llena la cesta de material, se mide la densidad, y la cesta se suspende en el centro de un horno dotado de un ventilador, mantenido en condiciones isotérmicas durante un periodo determinado de tiempo (mínimo 24 horas). Se colocan termopares en el centro de la muestra y entre la cesta que contiene la muestra y la pared del horno. Se observa si se produce una ignición, manifestada por un incremento en la tasa de aumento de la temperatura por encima de la de la temperatura del horno, o si no se produce ninguna situación de ignición, donde la temperatura puede aumentar ligeramente por encima de la temperatura del horno antes de bajar hasta la temperatura del horno. La temperatura más alta de "no ignición" (Tni) y la temperatura más baja de "ignición" (TI) medidas tienen que ser determinadas en un intervalo estrecho (típicamente 3°C), ya que diferencias mayores dan errores importantes al extrapolar los resultados.
Resultados e interpretación	Con los resultados obtenidos en las pruebas con los tres tamaños de cesta, se traza un gráfico de V/SR, donde V es el volumen de los recipientes y SR es la superficie del recipiente frente 1000/T, donde T es Tni y TI en K. Esto debe generar 2 líneas rectas. A continuación, se traza una tercera línea (valor medio) entre las de Tni y de TI, y esta línea se extrapola en el gráfico para obtener las temperaturas de almacenamiento seguro para contenedores de cualquier forma o tamaño (suponiendo que el volumen y la superficie son conocidos o se pueden calcular). Deben estudiarse los gráficos de TI de los tres tamaños de cesta para calcular el tiempo antes del comienzo de la exotermia (t). Se traza un gráfico del ln (t) en segundos frente a (V/SR). Esto producirá una línea recta que puede extrapolarse a proporcionar un tiempo estimado de inducción para un contenedor de cualquier forma o tamaño.
Versiones reducidas	Existen muchas opciones. Esto incluye el uso de cestas más pequeñas, menos tamaños de cestas (ejemplo: 2 en vez de 3) y márgenes mayores entre las situaciones de "ignición" "no ignición" (ej. 5 K en vez de 3 K). Todas estas variables reducirán la precisión de la medida, y generarán más errores a la hora de extrapolar.
Limitaciones	El ensayo no se puede aplicar a líquidos o sólidos con bajo punto de fusión. Las muestras que se descomponen (en vez de oxidarse) se pueden estudiar de forma más económica usando métodos alternativos.

La columna vertebral de la seguridad de procesos en DERKA

El antiguo Grupo Chilworth ahora forma la columna vertebral de los servicios de seguridad de procesos en el Grupo DEKRA. Integrados en la unidad de negocio de DEKRA, ofrece un amplio abanico de servicios en seguridad de procesos para la mayoría de las principales compañías de los sectores químico, agroquímico, energías, oil & gas, farmacéutico, procesado de alimentos y EPC. Nuestro porfolio de servicios incluye:

- Ensayos de laboratorio: inflamabilidad de polvos y gases, estabilidad térmica, reacciones químicas runaway, ensayos reglamentarios (REACH, CLP, ADR, etc.)
- Consultoría y formación en todas las áreas de la seguridad de procesos: gestión, cultura, auditorías, análisis de riesgos (HAZOP, etc), investigaación de accidentes, riesgos graves, seguridad funcional, sistemas de allivio de emergencia, cumplimiento de las principales normativas de seguridad de procesos (SEVESO, ATEX, OSHA) y más allá.

Hoy nuestra presencia mundial representa que podemos proporcionar nuestro conocimiento y experiencia de forma local a nuestros clientes globales, donde quiea que estén, y ofrecer los mejores servicios de DEKRA en ensayos, inspección y certificación.

Para más información: www.dekra.es

DEKRA Process Safety

process-safety-es@dekra.com
www.dekra.es/es/seguridad-de-procesos/