

Francisco Javier Hoyuelos Álvaro
Alba Santamaría Herrera
Carlos Casado Marcos

Guía para evaluar el riesgo y la prevención en atmósferas explosivas en el sector de la madera



**UNIVERSIDAD
DE BURGOS**

**Guía para evaluar el riesgo y
la prevención en atmósferas explosivas
en el sector de la madera**

FRANCISCO JAVIER HOYUELOS ÁLVARO
ALBA SANTAMARÍA HERRERA
CARLOS CASADO MARCOS

Guía para evaluar el riesgo y la prevención en atmósferas explosivas en el sector de la madera



UNIVERSIDAD
DE BURGOS

2022

AUTORES:

Francisco Javier Hoyuelos Álvaro. Universidad de Burgos. Facultad de Ciencias. fjha@ubu.es


Alba Santamaría Herrera. Universidad de Burgos. Facultad de Ciencias. asherrera@ubu.es

Carlos Casado Marcos. Universidad de Burgos. Unidad de Prevención de Riesgos Laborales. ccasado@ubu.es

AGRADECIMIENTOS:

Juan Carlos Ibáñez Benito. Atmósferas Explosivas. carlos@atmosferasexplosivas.es



Víctor Manuel González Gil. Ibermutua, Burgos. 

Jesús Eloy Fernández Garmón. Departamento de prevención de riesgos laborales de FAE Burgos.



Asociación de Empresarios de Aserradores y Rematantes de Madera de la Provincia de Burgos (BURMADERA).



Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno de la Universidad de Burgos.

Proyecto subvencionado por la Junta de Castilla y León al amparo de la Orden de convocatoria de 21 de marzo de 2019, de la Consejería de Empleo, por la que se convocan para el año 2019, subvenciones públicas para la realización de proyectos de investigación en Prevención de Riesgos Laborales por las Universidades Públicas de Castilla y León.



**Junta de
Castilla y León**

Consejería de Empleo e Industria

© Los autores

© UNIVERSIDAD DE BURGOS

Edita: Servicio de Publicaciones e Imagen Institucional

UNIVERSIDAD DE BURGOS

Edificio de Administración y Servicios

C/ Don Juan de Austria, 1

09001 BURGOS - ESPAÑA

ISBN: 978-84-18465-22-2

DOI: <https://doi.org/10.36443/9788418465222>

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
[Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)



ÍNDICE

PRÓLOGO	9
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Estructura y composición química de la madera.....	13
1.2 Las transformaciones y usos de la madera.....	16
1.3 Los peligros del polvo de madera	20
1.4 Revisión histórica de las explosiones por polvo en la industria.....	21
2. OBJETIVOS	29
3. CONDICIONES DE EXPLOSIVIDAD	31
3.1 El mecanismo de explosión	32
3.1.1 Pirólisis	32
3.1.2 Ignición	33
3.1.3 Combustión.....	34
3.1.4 El mecanismo de explosión con muestras de polvo	35
3.1.5 Tipos de explosiones	37
3.2 ¿Qué es una atmósfera explosiva?	37
3.3 Instalaciones ATEX.....	39
3.4 Clasificación por zonas	39
3.5 Extensión de las zonas	41
4. PARÁMETROS A CONTROLAR	45
4.1 Parámetros característicos de una muestra concreta.....	45
4.1.1 El tamaño de partícula	45
4.1.2 La humedad de la muestra	45
4.1.3 La forma de las partículas.....	46
4.2 Parámetros externos.....	46
4.2.1 Las condiciones ambientales.....	46
4.2.2 La fuente de ignición.....	46
4.2.3 El tiempo de retardo y la turbulencia	47
4.2.4 La presencia de inertizantes	47
4.3 Parámetros que determinan la sensibilidad a la ignición	48
4.3.1 La Temperatura Mínima de Ignición	48
4.3.2 El Límite Inferior de Explosividad o la Concentración Mínima Explosiva de la mezcla.....	49
4.3.3 La Energía Mínima de Ignición	51

4.4	Parámetros que determinan la severidad de la explosión.....	52
4.4.1	La Concentración Límite de Oxígeno	53
4.4.2	La Presión Máxima de explosión	53
4.4.3	La constante característica o índice de deflagración	53
4.5	Parámetros relacionados con la susceptibilidad térmica	55
4.5.1	El índice de Maciejasz	55
4.5.2	La Temperatura de Emisión de Volátiles inflamables	56
4.5.3	El ensayo de Termogravimetría y la Calorimetría Diferencial de Barrido	56
4.5.4	La Energía de activación	56
5.	TOMA DE MUESTRAS	57
6.	EQUIPOS EMPLEADOS Y ENSAYOS REALIZADOS.....	59
6.1	Determinación de la humedad	59
6.2	Separación granulométrica por tamizado.....	59
6.3	Ensayos de explosividad.....	61
6.3.1	Concentración Mínima Explosiva.....	62
6.3.2	Explosividad en función de la humedad y del tamaño de partícula	64
6.3.2.1	Muestras originales sin tamizar.....	64
6.3.2.2	Muestras tamizadas	67
6.4	Temperatura mínima de ignición en nube.....	69
6.4.1	Muestras originales sin tamizar	70
6.4.2	Muestras tamizadas.....	71
6.5	Temperatura mínima de ignición en capa.....	72
6.6	Análisis termogravimétrico	73
6.7	Calorimetría Diferencial de Barrido	75
6.8	Microscopía Electrónica de Barrido	77
6.9	Espectroscopía de Infrarrojos	83
6.10	Toma de fotografías	84
6.10.1	Cámara termográfica	84
6.10.2	Cámara lenta	85
7.	APÉNDICE	87
8.	GLOSARIO DE DEFINICIONES	89
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	91

PRÓLOGO

El polvo de madera en determinadas condiciones explota. Consecuencia de ello, cada año se materializan accidentes graves y mortales por la activación de nubes de polvo de madera. A las lesiones personales con largos periodos de recuperación y secuelas permanentes para la vida se unen otro tipo de pérdidas. El efecto de la explosión y la propagación de los incendios destruyen las naves y los sueños de sus propietarios. No hay que viajar lejos de nuestra provincia para conocer estos trágicos sucesos.

La presente guía muestra el trabajo de campo realizado por el excelente equipo especializado de la UBU en las denominadas ATEX. La prueba de explosividad es determinante para sacar conclusiones y hacer más sencilla la evaluación de los riesgos. Mediante la divulgación de esta guía se informa a todas las personas interesadas del estado de la cuestión de una forma sencilla y práctica. 10 minutos sirven para dar cuenta de los contenidos y sacar conclusiones de valor pedagógico. 10 minutos que pueden salvarte la vida y las ilusiones. El cuidado de los detalles por el que se caracteriza al profesional del sector de la madera en todos sus trabajos debe extenderse a la prevención de sus propios riesgos laborales. La identificación de nubes de polvo, su frecuencia, el tamaño de las partículas y su estructura junto con la humedad es la información básica para poder tomar buenas decisiones preventivas.

Disfruta de la lectura amena de esta guía sabiendo que detrás hay muchos días de trabajo exhaustivo y bien hecho. Este pasito adelante en la promoción de la salud y la prevención de grandes accidentes en forma de explosiones es un nuevo pellizco que nos indica que todo avanza si se quiere y se sabe.

Salud.

Fernando de la Parte Alcalde
*Jefe del Área de seguridad y salud laboral
de la oficina territorial de trabajo en Burgos
de la Junta de Castilla y León.*

3 de diciembre de 2021

1. INTRODUCCIÓN

La industria de transformación primaria de la madera es un sector de gran calado económico en la comunidad de Castilla y León. Solo en la provincia de Burgos hay cerca de 40 empresas dedicadas a esta actividad. (Burmadera, 2016) Si tenemos en cuenta toda la región, según los datos proporcionados por el Directorio Central de Empresas (DIRCE) (Instituto Nacional de Estadística, 2022), en el año 2021 existían en Castilla y León 711 empresas dedicadas a la madera y el corcho. En la Figura 1 se puede observar el número de empresas cuya actividad se relaciona con las industrias de la madera y el corcho, distribuidas por comunidades autónomas, ocupando Castilla y León el quinto lugar a nivel nacional.

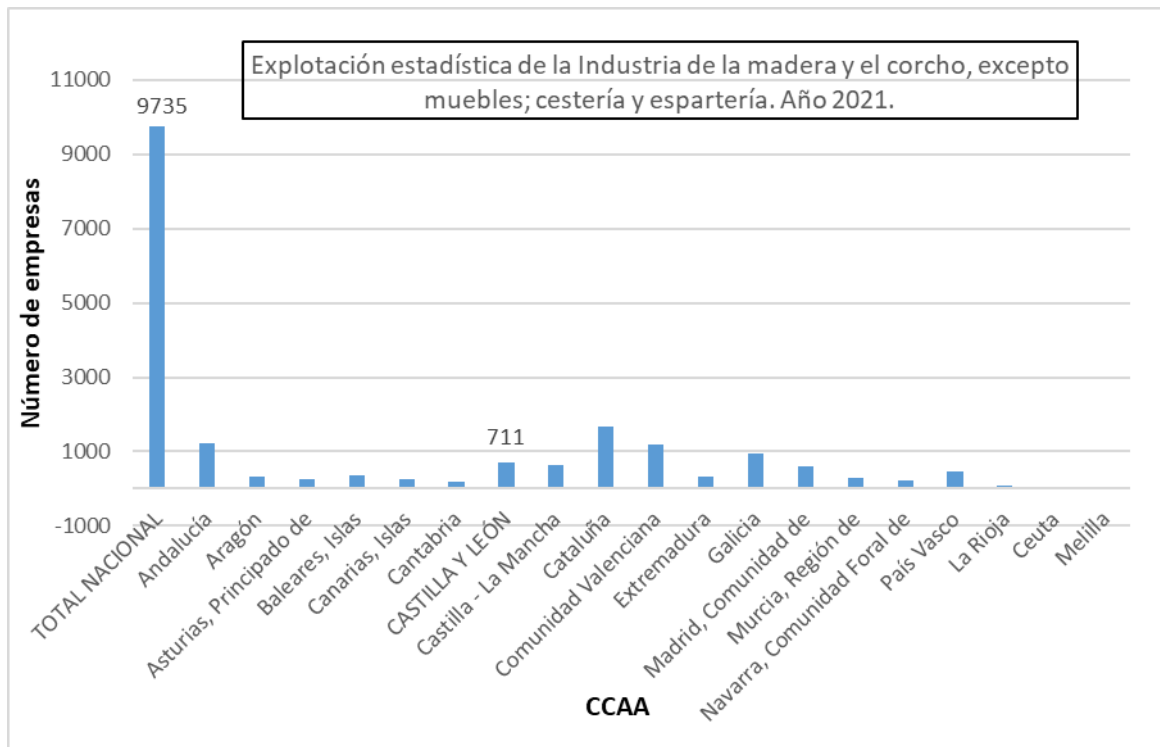


Figura 1. Relación de empresas dedicadas a la industria de la madera por Comunidad Autónoma. Fuente: (Instituto Nacional de Estadística, 2022).

De estas empresas, 168 corresponden al aserrado y cepillado de la madera (casi un 16 % del total nacional), siendo así la segunda comunidad con mayor potencial en este campo, solo por detrás de Galicia, Figura 2.

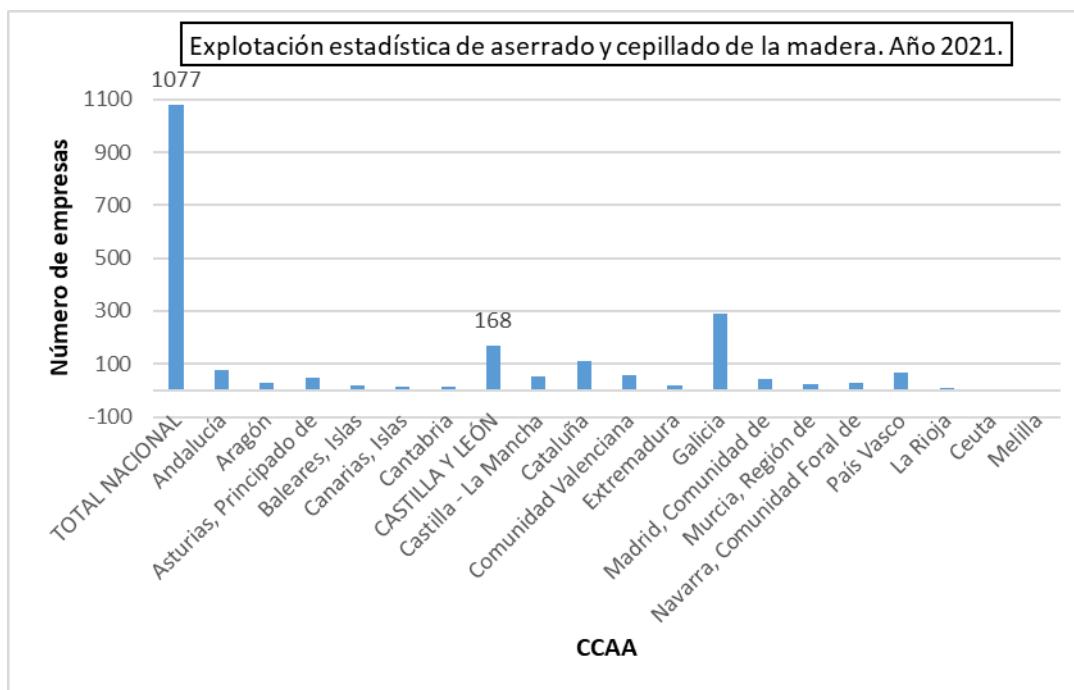


Figura 2. Relación de empresas dedicadas a la transformación primaria de la madera por CA. Fuente: (Instituto Nacional de Estadística, 2022).

Castilla y León presenta el porcentaje más alto de superficie forestal respecto al conjunto del país con el 17,19 %, tal y como se refleja en la Figura 3. Las comunidades que no aparecen especificadas se encuentran en porcentajes inferiores al 3 %. (Junta de Castilla y León, 2017)

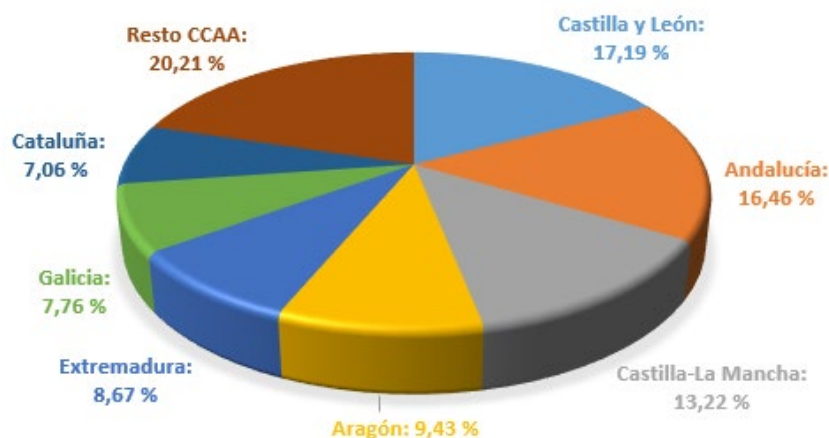


Figura 3. Relación en porcentaje (%) de la superficie forestal por CA. Fuente: (Junta de Castilla y León, 2017).

La riqueza forestal de Castilla y León es la más grande de España y una de las más extensas de Europa, es entendible que la explotación de este recurso se trate, por tanto, de una actividad de gran relevancia para la economía de la comunidad, siendo la principal fuente de riqueza para muchos municipios de la región.

La importancia de estos recursos no es solo económica, sino que juega un papel fundamental en el desarrollo social de los municipios, permitiendo un incremento de la población de las zonas rurales que de otra forma estarían destinadas al abandono. (FICA-UGT, 2017)

La distribución de la superficie forestal por provincias en el año 2016 aparece recogida en la Tabla 1 expresada en hectáreas (ha).

Tabla 1. Superficie forestal en hectáreas por provincias de Castilla y León. Fuente: (Junta de Castilla y León, 2017)

2016	Terreno Forestal (ha)	Monte Maderable (ha)	Monte Abierto (ha)	Monte Leñoso (ha)	TOTAL SUPERFICIE CyL (ha)	%
Ávila	240.333	85.038	59.694	95.601	804.992	29,86
Burgos	383.517	251.978	131.345	194	1.429.103	26,84
León	765.814	231.069	226.724	308.021	1.558.181	49,15
Palencia	135.390	56.475	49.731	29.184	805.251	16,81
Salamanca	461.658	51.415	397.120	13.123	1.234.995	37,38
Segovia	184.820	117.802	35.769	31.249	692.275	26,70
Soria	440.555	404.959	3.464	32.132	1.030.717	42,74
Valladolid	113.142	77.876	15.436	19.830	811.049	13,95
Zamora	195.129	70.969	15.873	108.287	1.056.126	18,48
CASTILLA Y LEÓN	2.920.358	1.347.581	935.156	637.621	9.422.689	30,99

Siendo Burgos, provincia en la que se desarrolla el presente estudio, la cuarta en cuanto a terreno forestal en la Comunidad, con cerca de 400.000 hectáreas.

1.1 Estructura y composición química de la madera

La madera es un material de tipo anisotrópico, es decir, sus propiedades varían en función de la dirección en la que se examine, esto se debe, principalmente a la estructura de las células de la madera. Cuando se analizan a nivel microscópico es posible observar las sólidas paredes vegetales que hacen de la madera un material muy importante a nivel estructural.

Se trata de una sustancia compuesta por fibras y conformada por muchos tipos de células diferentes que se organizan formando tejidos que llevan a cabo las

distintas funciones básicas que el árbol necesita para sobrevivir. Entre estas funciones se encuentra la conducción de la savia, la cual es transportada por unos conductos en forma de canales o tubos que proporcionan a la madera una estructura resistente.

Además de estas células alargadas en forma de tubos dispuestas de manera paralela al eje del árbol y que pueden variar en longitud, forma, espesor de las paredes y dimensiones interiores, también existen otro tipo de células colocadas perpendicularmente a las anteriores y en el sentido radial del tronco, formando los llamados radios leñosos. Esta estructura se observa con facilidad cuando se toman imágenes con un microscopio electrónico como en la Figura 4.

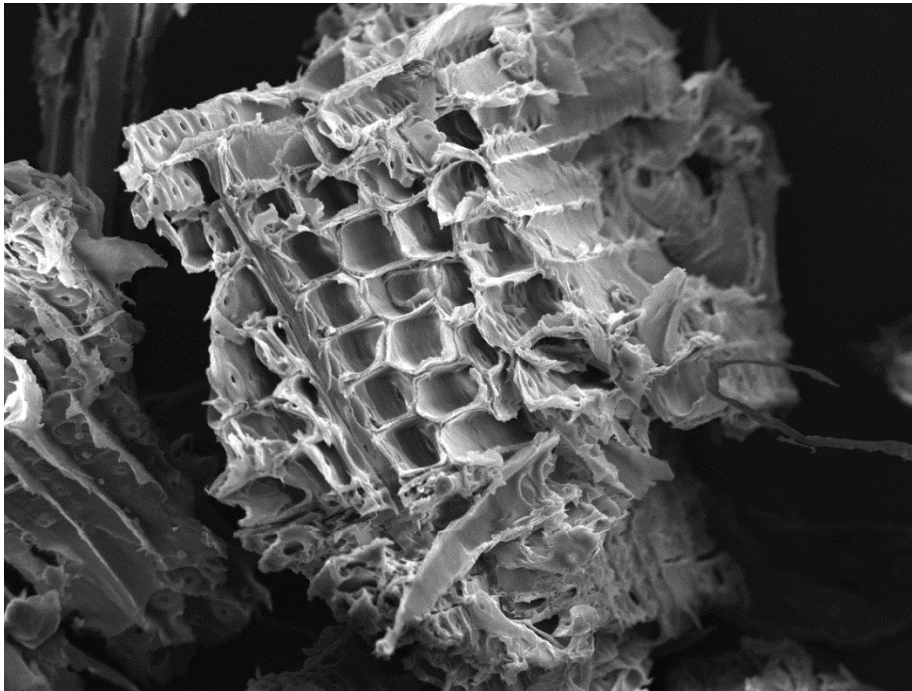


Figura 4. Fotografía tomada por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de una muestra de pino Soria (x200 ampliaciones).

Como ya hemos mencionado, las características de la madera dependen de la dirección de observación, de modo que en un corte longitudinal de la misma estos tubos o canales podrían distinguirse, pero aparecerían destruidos como en la Figura 5.

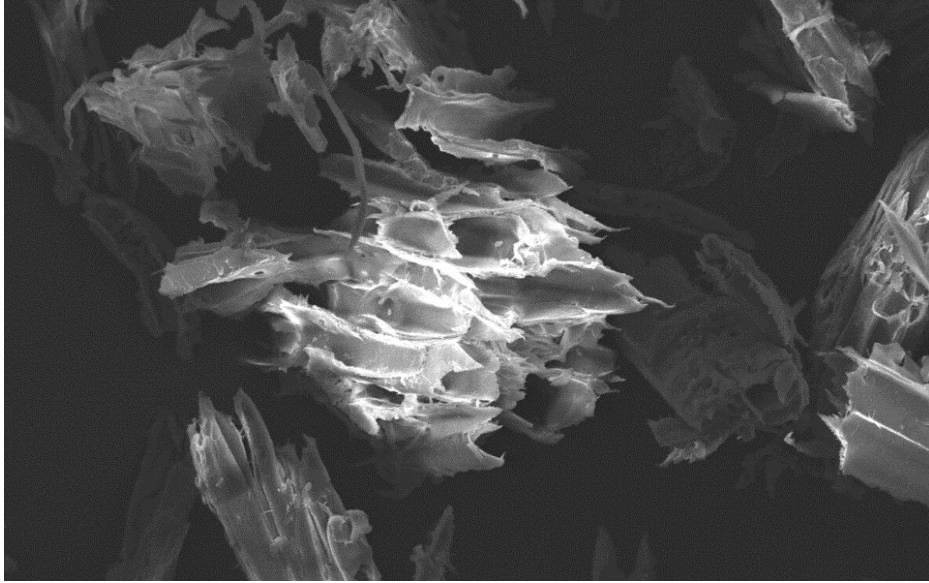


Figura 5. Fotografía tomada por MEB de una muestra de pino insigne (x200 ampliaciones).

Además, cabe destacar, que cuánto más destruida esté la madera, entendiendo por destruida el haber sido sometida a más cortes o tratamientos de cualquier tipo, su estructura será cada vez menos regular, dando lugar a partículas cada vez más pequeñas, que se van redondeando y que pierden la forma tubular característica. Esto se puede observar en la Figura 6, que corresponde a una muestra de MDF (Medium Density Fiberboard) o paneles de fibras de media densidad. Este material se obtiene después de un tratamiento de desfibrilado de la madera, por lo que la estructura de la muestra cambia casi por completo, siendo difícil apreciar la presencia de tubos o canales.

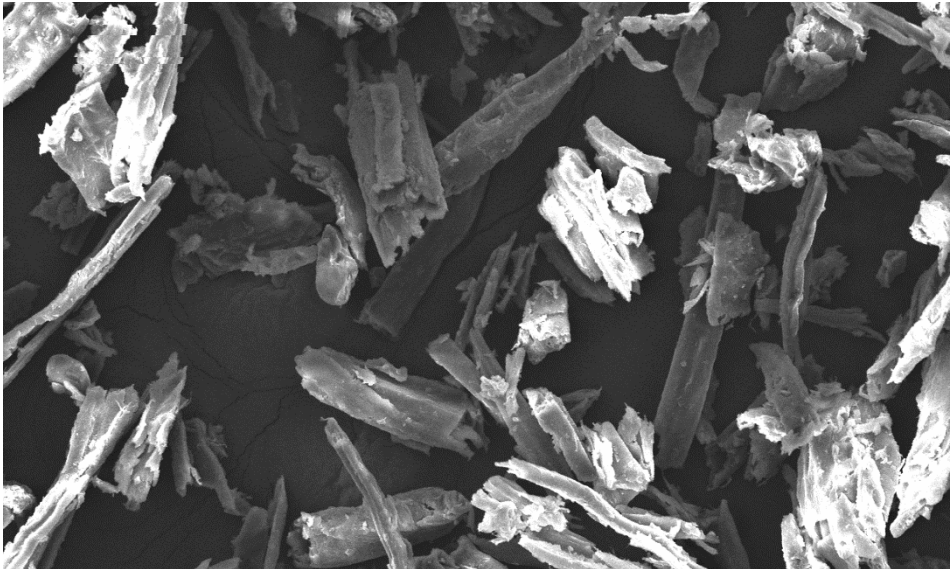


Figura 6. Fotografía tomada por MEB de una muestra de MDF (x200 ampliaciones).

Este cambio estructural puede suponer un factor a tener en cuenta en el comportamiento de la madera ante una posible fuente de ignición y, por tanto, determinar su menor o mayor peligrosidad.

En cuanto a la composición química, la madera está compuesta por los cuatro elementos orgánicos más significativos, principalmente por carbono y oxígeno, con hidrógeno y nitrógeno en menor medida. Estos elementos se encuentran unidos entre sí formando tres compuestos principales, celulosa, lignina y hemicelulosa.

- Celulosa: es el principal componente de la estructura de la madera procedente de la glucosa, pudiendo suponer hasta un 50 % del total de la composición de la madera. Se trata de un polímero lineal cuya fórmula es $(C_6H_{10}O_5)_n$ con un valor de n de 200 monómeros. Se encarga de servir de armazón y aguante a la estructura, siendo resistente a los agentes químicos e insoluble a la mayoría de los disolventes.
- Lignina: es un polisacárido que supone alrededor del 25 % de la composición de la madera, su función es impermeabilizar y endurecer las estructuras fibrilares. Su fórmula lineal varía según la especie de madera, para el pino es $C_9H_{7,92}O_{2,40}(OCH_3)_{0,92}$.
- Hemicelulosa: se trata de un polímero con menor grado de polimerización que la celulosa y que parte de los monómeros $(C_5H_8O_4)_n$ y $(C_6H_8O_4)_n$. Supone cerca del 20 % del total de la estructura y su función es mantener aglomeradas las microfibrillas, evitando fisuras en la madera. (Paz, 2008)

Además, en una proporción mucho menor también se pueden encontrar resinas, taninos, grasa, etc.

1.2 Las transformaciones y usos de la madera

La madera es una materia prima esencial ya que puede emplearse como elemento decorativo, como elemento estructural y también como fuente energética dado que el proceso de combustión es capaz de generar una gran cantidad de calor y energía de una forma relativamente limpia y sostenible. Hablamos de un recurso renovable en la producción energética cuya demanda está en crecimiento y, en consecuencia, la tecnología que rodea a esta actividad debe evolucionar para hacer frente en años futuros a dicho desafío. (Guindeo, 1994)

La madera resulta importante en más de un sector, dentro del sector primario se incluyen las empresas que desarrollan su actividad a través de la obtención de recursos naturales, es decir, el aprovechamiento directo de los bosques. Pero esta no sería la única actividad económica en la que la industria maderera está involucrada, en el sector secundario se da la transformación de materia prima en producto elaborado, en este caso, el paso del tronco cortado a la fabricación de muebles o su deriva a la industria papelera.

La industria maderera es el sector industrial que se ocupa del procesamiento de la madera, que se inicia con la plantación y termina con su transformación final dando lugar a los objetos de uso cotidiano de los distintos ámbitos referidos previamente, tales como muebles, pellets o derivados de la madera como la obtención de celulosa para la fabricación de papel.

Dada la gran variedad de procesos por los que atraviesa la madera en su transformación es necesario conocer cada uno de ellos para ser conscientes de los posibles peligros que puedan suponer.

La primera transformación es aquella que involucra las actividades necesarias para convertir los troncos cortados o la madera en rollo en otro producto con valor comercial que se puede emplear para diversas actividades posteriores, pero que no es directamente un consumible, sino que requeriría una segunda transformación para la obtención del producto final.

En esta fase se incluyen algunos procesos que pueden dar lugar a la generación de distintos tipos de residuos, entre ellos polvo, los principales aparecen indicados en la Tabla 2.

Tabla 2. Principales procesos de la primera transformación de la madera.

Proceso	Tipo de residuos generados
Descortezado	Piezas grandes y virutas
Aserrado (cortes con diferentes sierras)	Virutas y polvo de diverso tamaño de grano
Protección contra el azulado	Productos químicos
Secado	-

El descortezado es el paso inicial, en el que la peladora de cuchillas elimina la corteza de los troncos junto con otras impurezas que podrían provocar averías en las máquinas que se emplean a continuación. Este proceso genera residuos de gran tamaño y que, en principio, no presentan una peligrosidad tan elevada como las partículas de tamaño más fino.

El aserrado es el inicio de la transformación y es un proceso muy amplio, en el que los troncos o madera en rollo son convertidos en piezas de madera que pueden ser rectangulares o cuadradas, dando lugar a tablas o tablones. Para ello se emplean todo tipo de elementos cortantes como sierras manuales, de cinta, de disco, de cadena o sierras múltiples como la que se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Fotografía de una sierra de corte múltiple.

Tras los distintos procesos de corte se somete a las piezas a un proceso de protección contra el azulado, para evitar la colonización de la madera verde por parte de hongos y otros microorganismos. (Morales, 2019)

Por último, dentro de los procesos de transformación primaria, tiene lugar el secado de las piezas, operación en la que se reduce o elimina el agua contenido en la madera húmeda o verde sin que se alteren las propiedades de las piezas cortadas. Este secado se producirá al natural o bien en el interior de una cámara con aplicación de temperatura para acelerar el proceso. (Lanchas, 2018)

La transformación secundaria es el proceso por el que se obtienen piezas con unas características determinadas de espesor y dimensiones necesarias que permitirán la obtención del producto final. Esta fase de tratamiento de la madera incluye procesos, que como en el caso de la primera transformación, también dan lugar a la generación de polvo, con la diferencia de que el trabajo ahora se realiza con madera con una humedad mucho menor, por lo que este polvo está mucho más seco y, por tanto, es más peligroso para generar una atmósfera explosiva. En la Tabla 3 se indican algunos de los principales procesos.

Tabla 3. Procesos de segunda transformación de la madera.

Proceso	Tipos de residuos generados
Lijado	Polvo fino
Cepillado	Virutas y polvo de diverso tamaño de grano
Moldurado	Polvo de diverso tamaño de grano
Espigado	Virutas de diverso tamaño de grano
Torneado	Virutas y polvo de diverso tamaño de grano
Taladrado	Virutas y polvo de diverso tamaño de grano

La finalidad del proceso de lijado es eliminar imperfecciones o salientes, obteniendo superficies planas permitiendo mejorar el acabado y facilitar la aplicación de tratamientos posteriores como el barnizado o la pintura.

La operación de cepillado, al igual que el lijado, permite mejorar el acabado de las piezas empleando maquinaria como la cepilladora o regruesadora que se puede observar en la Figura 8.



Figura 8. Fotografía de una cepilladora de madera.

Otra operación que se lleva a cabo en la transformación de la madera es el moldurado, que consiste en suavizar o redondear los cantos o bordes de las piezas con un objetivo tanto de seguridad como estético. En la Figura 9 se identifica la maquinaria empleada en este proceso.

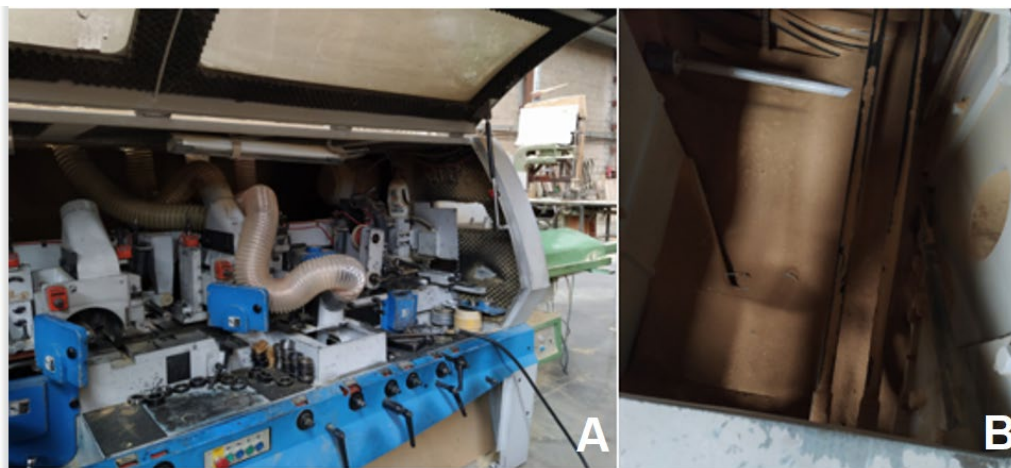


Figura 9. A – Moldurera. B – Tipo de polvo generado en el moldurado.

Existen otra serie de procesos que permiten la transformación de la madera, como los realizados por las espigadoras, que constan de herramientas de fresado y uno o varios discos de corte. (Castelló et al., 2009)

El torneado es una forma de labrado de las piezas mediante el movimiento de rotación de una pieza cortante, generando en el proceso polvo o virutas, y el taladrado es la operación en la que se realizan diferentes incisiones o agujeros en la madera que son fundamentales para el montaje final o acabado de las piezas elaboradas.

En todos los procesos que se han descrito se genera, en mayor o menor medida, partículas de polvo de madera que han de ser tenidas en cuenta a la hora de adoptar distintas medidas de protección y prevención. (Santiago et al., 2013)

Existen diferentes tipos de empresas involucradas en la transformación de la madera. Se suele afirmar que existen cuatro subsectores principales dentro del aprovechamiento de la madera: la industria del mueble, la de derivados de la madera, la silvicultura y la industria papelera. En Castilla y León, el subsector chapa y tableros es el principal demandante de madera, suponiendo las empresas productoras de tablero el 23 % de la producción española.

El resto de empresas de transformación no resultan de tal importancia en el sector forestal de esta Comunidad. No hay abundancia de empresas productoras de pasta de papel, y otras, como las de producción de corcho presentan muy poca importancia en la región. Dentro de la segunda transformación, que incrementa el valor del producto producido se concentran empresas muy variadas. Entre ellas destacan las que se dedican al uso de la madera como material de construcción o estructural, como puede ser el caso de las carpinterías. Sin embargo, en estas últimas, se emplean una gran variedad de productos adicionales como son disolventes, resinas o colas que pueden suponer un riesgo mucho mayor a nivel de explosividad que la propia madera, por lo que, en principio este estudio se va a centrar en la transformación primaria y en la peligrosidad del polvo de madera. (Díaz y Acuña, 2000)

1.3 Los peligros del polvo de madera

En la revisión de las diferentes guías existentes acerca de los riesgos derivados del tratamiento industrial de la madera, se ha encontrado documentación muy diversa como la *Guía de buenas prácticas de lucha contra el ruido en la industria de la madera* (Junta de Andalucía, 2013), el *Manual Básico de Prevención de Riesgos Laborales de la familia profesional: Madera, mueble y corcho* (Región de Murcia, 2010) o el *Manual de buenas prácticas en prevención de riesgos laborales en el sector de la madera* (UGT La Rioja, 2008), por nombrar alguno de los muchos ejemplos. Estos manuales o guías presentan un factor común, el tratamiento escaso o nulo en muchos casos de la generación de atmósferas explosivas en el área de trabajo por la presencia de polvo de madera.

Es sabido que en algunos de los procesos de tratamiento de la madera se genera polvo que puede mantenerse en suspensión, hecho que podría resultar muy peligroso. Este polvo que se encuentra en el aire puede ser inhalado por los

trabajadores produciendo enfermedades de distinto alcance, como son la neumoconiosis, que está reconocida como enfermedad profesional en el sector, el asma, la bronquitis crónica y hasta el cáncer nasal. Este tipo de repercusión para la salud aparece ampliamente recogida en la documentación encontrada.

Sin embargo, otro de los grandes peligros de la presencia de polvo de madera en suspensión en el lugar de trabajo es su poder como combustible, algo sobre lo que, en general, se tiene una conciencia mucho menor que respecto a los peligros para la salud. El polvo de madera es un potente agente combustible que, en un ambiente con presencia de un comburente, como es el oxígeno presente en el aire y si se cuenta con una fuente de ignición, como puede ser una chispa procedente de cualquier equipo o aparato eléctrico, o bien, si dicho polvo se pone en contacto con una pequeña llama o una superficie suficientemente caliente se puede producir una explosión. (Centro Tecnológico del Mármol y la Piedra, 2010)

La definición de polvo varía dependiendo de la fuente que se consulte, aunque se puede considerar como polvo aquellas partículas sólidas capaces de atravesar un tamiz de 500 μm . Este hecho se traduce en la práctica a considerar como polvo a las partículas sólidas que se depositan bajo el efecto de su peso, pero que pueden permanecer en suspensión algún tiempo. (García-Torrent, 2003)

Los procesos de corte o aserrado son operaciones comunes en la transformación primaria de la madera. En la mayoría de los casos, las instalaciones donde se realizan estas operaciones son plantas de pequeño tamaño que, a pesar de trabajar con el producto en verde, generan grandes cantidades de polvo de madera, las cuales pueden resultar peligrosas generando atmósferas explosivas. Si se dan las condiciones necesarias podrían llegar a producirse explosiones, que consisten en una combustión rápida y que se propaga sin control, pudiendo tener lugar en cualquier instalación en la que se maneje o almacene polvo. (Larrad, 2016)

1.4 Revisión histórica de las explosiones por polvo en la industria

Se considera que entre 1785 y 2012 tuvieron lugar en todo el mundo más de 2.000 explosiones debidas al polvo.

Este tipo de accidentes tiene lugar sobre todo en Estados Unidos, Europa, Japón, China y Canadá, siendo, con mucha diferencia, Estados Unidos el país con una mayor incidencia debido a las 1.611 explosiones por polvo registradas. A continuación, se encuentra el continente europeo, encabezado por Alemania y el Reino Unido, con 426 y 411 explosiones respectivamente, aunque también se han dado este tipo de accidentes en otros países de Europa, como Noruega, Suecia, Francia, Italia o España, Figura 10. (Yuan, et al., 2015)

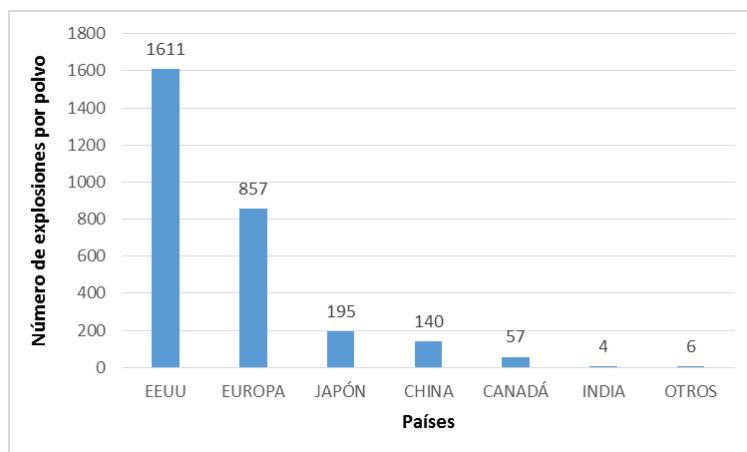


Figura 10. Explosiones por polvo en diferentes países entre 1785 y 2012. Fuente: (Yuan et al., 2015).

Es inevitable asociar el número de accidentes al desarrollo industrial, es decir, el registro de explosiones es mucho mayor en los países con una cantidad más elevada de industrias. Sin embargo, igualmente, este crecimiento ha influido de manera positiva en la adopción de medidas para prevenir o evitar estos incidentes.

Con el tiempo se ha ido reconociendo la peligrosidad de las explosiones por polvo, estimulando la búsqueda de mecanismos de protección, lo que ha hecho que el número de accidentes de este tipo haya disminuido notablemente, en especial en los últimos veinte años. A pesar de este incremento en la seguridad, en algunos países, como China, el número de accidentes ha crecido debido al enorme desarrollo de la industria que ha tenido lugar, Figura 11.

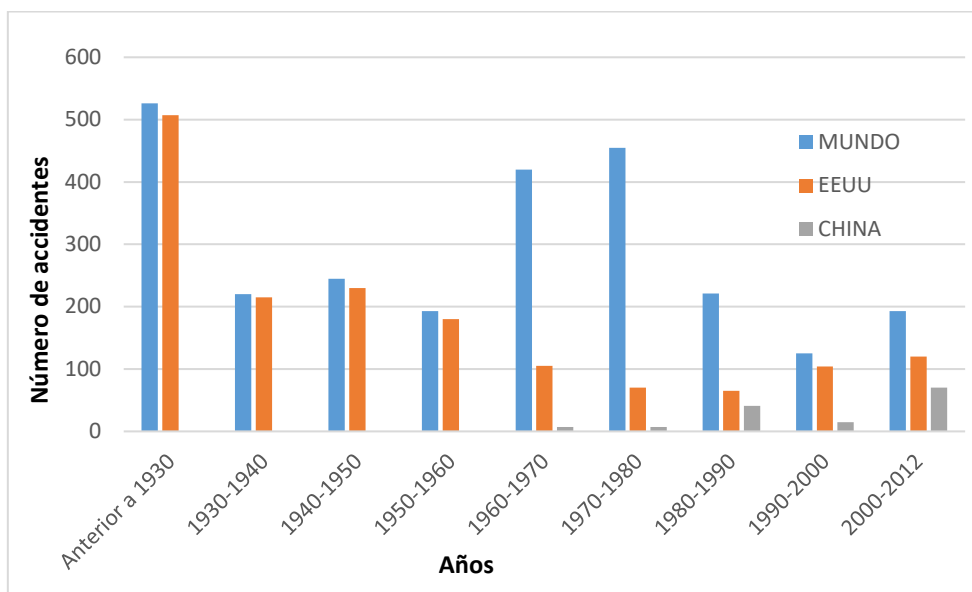


Figura 11. Evolución del número de explosiones con el paso del tiempo. Fuente: (Yuan et al., 2015).

Dentro de este gran número de explosiones por polvo, no todas son debidas a polvo de madera, que es el tema que nos ocupa, sino que, según la International Standard Industrial Classification of All Economic Activities (ISIC), publicado por

las Naciones Unidas (2008) los tipos de industrias en los que tienen lugar accidentes relacionados con polvo son muy diversas.

En la Figura 12 se muestra la distribución del total de estas explosiones en los distintos sectores, desde aquellas relacionadas con la manufactura de alimentos, la minería, la manufactura de productos químicos, metales y plásticos, la industria textil y, hasta la industria maderera y los productos derivados de la misma; suponiendo esta última un 11 % del total de los accidentes.

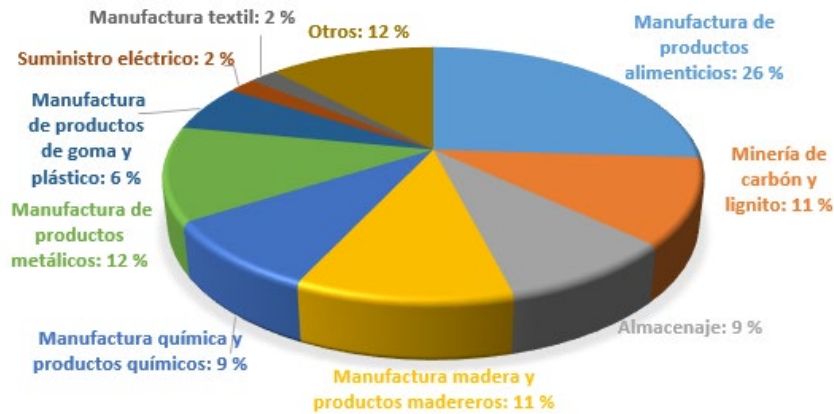


Figura 12. Distribución de las explosiones por polvo en la industria. Fuente: (Yuan et al., 2015).

Se debe tener en cuenta que estos accidentes no se traducen únicamente en daños materiales en las instalaciones, sino que, en muchos casos se producen heridos y muertes. Solo en el periodo entre 1980 y 2005, en Estados Unidos se registraron 281 accidentes importantes relacionados con polvo combustible, que provocaron 718 heridos y 119 personas fallecidas. (CBS, 2006)

En la Figura 13 se muestra la destrucción que una explosión por polvo combustible generó en una refinería de azúcar en el estado de Georgia (Estados Unidos) en febrero de 2008. (Cloney y Snoeys, 2019)



Figura 13. Fotografía de las instalaciones en Port Wentworth (Georgia, EEUU) tras la explosión. Fuente: (Cloney & Snoeys, 2019)

Tras Estados Unidos, Europa ocupa el segundo lugar en cuanto a mayor número de explosiones de polvo. (Yuan et al., 2015) Sin embargo, en Europa, al estar compuesta por muchos países diferentes no existe un sistema único de seguimiento de estas explosiones. Algunos países, como Alemania llevan un registro exhaustivo de las mismas, de forma que podemos saber que entre 1965 y 1980 hubo 357 explosiones de polvo (Eckhoff, 2003), las cuales fueron debidas a diferentes tipos de materiales y tuvieron consecuencias más o menos graves, como se puede observar en la Tabla 4 y la Figura 14.

Tabla 4. Datos sobre explosiones en Alemania recogidos por Eckhoff (2003). Fuente: (Cloney y Snoeys, 2019).

Tipo de polvo	Explosiones		Heridos			Muertes		
	Total	%	Total	%	Media	Total	%	Media
Madera	113	32	124	25	1,10	12	12	0,11
Alimentos y piensos	88	25	127	26	1,44	38	37	0,43
Metales	47	13	91	18	1,94	18	17	0,38
Plásticos	46	13	98	20	2,13	18	17	0,39
Carbón y turba	33	9	39	8	1,18	7	7	0,21
Papel	7	2	0	0	0,00	0	0	0,00
Otros	23	6	13	3	0,57	10	10	0,43
Total/Media	357		492		1,38	103		0,29

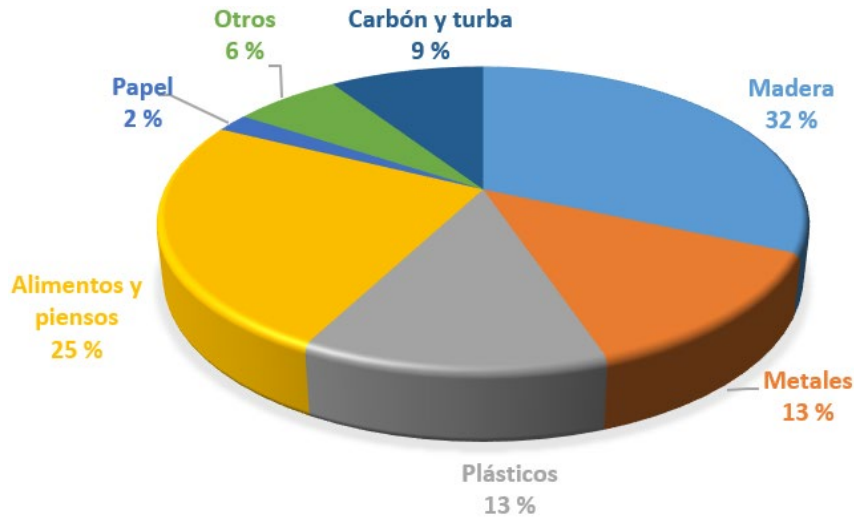


Figura 14. Distribución de las explosiones por polvo en la industria en Alemania. Fuente: (Cloney & Snoeys, 2019)

Si observamos las Figuras 12 y 14 sobre la distribución de los materiales involucrados en las explosiones de polvo, vemos cómo varían entre el conjunto de todos los países comparando con el caso de un país concreto como es Alemania, donde el número de explosiones relacionados con alimentos y piensos es elevado, pero es la industria maderera la que ocupa el primer lugar, sin embargo. Observando la Tabla 4, los metales y los plásticos tienen el mayor número de lesiones por accidente.

El gran número de accidentes en los que aparece implicado el sector de la madera es debido a que se trata de un material complejo que genera peligros muy diversos cuando se procesa. El polvo de madera se suspende en el aire, formando nubes explosivas que pueden encenderse con facilidad por la acción de fuentes como las chispas, que son inherentes al procesado y transformación de la madera. Para controlar estas emisiones y capas de polvo, en la industria maderera se emplean sistemas de ventilación compuestos por ventiladores, extractores, ciclones y colectores de polvo. Además, existe riesgo de explosiones secundarias, ya que las capas de polvo que se depositan en las máquinas, si se genera suficiente calor, pueden encenderse y generar una explosión.

Existen numerosos casos de explosiones debidas a nubes de polvo de madera que han dado lugar a graves consecuencias, un ejemplo es la ocurrida en la compañía de productos forestales de Lakeland Mills en Prince George, en la Columbia Británica (Canadá) en 2012, cuando veinticuatro empleados estaban trabajando en el aserradero en el que se produjo una fuerte explosión y comenzó el fuego, Figura 15. El resultado fue de dos muertos y veintidós heridos. (Worksafe, 2014)



Figura 15. Fotografía del incendio producido tras la explosión en Lakeland Mills. Fuente: (McKinnon, 2015).

Unos años más tarde, en julio de 2015, se producía otro accidente grave en un molino de harina de madera en Bosley, Reino Unido. En esta fábrica se realizaba el procesado de la madera hasta obtener un polvo fino usado para fabricar suelos laminados; este polvo dio lugar a una explosión que provocó la destrucción de las instalaciones, resultando heridas más de treinta personas y cuatro trabajadores fueron encontrados muertos entre los escombros. La enorme explosión se produjo después de que en la misma fábrica ya se hubieran producido previamente sendos incendios en 2010 y 2012, Figura 16. (Amyotte, 2014)



Figura 16. Destrucción provocada por la explosión en la fábrica de suelos laminados de Bosley (UK). Fuente: (Amyotte, 2014).

En España también se han producido accidentes de este tipo, en septiembre de 2016 tuvo lugar una explosión y un incendio posterior en un silo de la instalación de la fábrica de parqué de la empresa Wood Manners en Torrelavega (Cantabria).

Se produjo un estallido en el interior de un silo que contenía polvo depositado, Figura 17. Allí se encontraban trabajando tres operarios; uno de ellos resultó ileso, otro sufrió heridas y quemaduras leves, mientras que el tercero quedó atrapado en el interior del silo, sufrió quemaduras muy graves y falleció horas después en el hospital. (Díaz, 2016)



Figura 17. Labores de rescate de la persona herida en el interior de la fábrica. Fuente: (Díaz, 2016).

Datos como estos son más que suficientes para asegurar que el polvo de madera puede explotar y resaltar la importancia de una correcta evaluación del riesgo para evitar la formación de atmósferas explosivas en el sector de la madera.

2. OBJETIVOS

El objetivo de este estudio es la elaboración de una guía que permita identificar la mayor o menor peligrosidad del polvo generado en la transformación de la madera en la industria.

Para ello se van a establecer qué parámetros y condiciones resultan determinantes en la clasificación de los distintos tipos de polvo en función de su probabilidad para provocar una explosión. Se podrá, de este modo, tomar una muestra de polvo y mediante el análisis de sus características determinar si en unas condiciones concretas ese polvo generará o no una atmósfera explosiva.

En el proceso de elaboración de esta guía se han recogido muestras de distintos aserraderos e industrias de transformación de la madera de la comarca de la Sierra de la Demanda (Burgos), zona de gran tradición en la industria forestal y maderera. En estas industrias se llevan a cabo distintos procesos, el corte con distintas sierras, el lijado (Figura 18) o el cepillado del producto ya seco. Además, en estas instalaciones se cuenta con sistemas de aspiración que extraen el polvo generado. Cada una de estas operaciones tienen un mayor o menor peligro de explosión en función de las características de las partículas generadas.



Figura 18. Fotografía de una lijadora automática empleada en la transformación primaria de la madera.

Las especies recogidas para el estudio van desde el pino insigne (*Pinus radiata*), pino Soria (*Pinus sylvestris* L.), roble francés (*Quercus petraea*), roble húngaro (*Quercus frainetto*), mezcla de pino y roble, y hasta fibras de tableros de densidad media (MDF).

De la información generada en este estudio se ha extraído una guía titulada *Guía práctica ATEX Madera* (Hoyuelos et al., 2022), elaborada para ayudar a los profesionales de la industria, (empresarios, trabajadores, representantes de los trabajadores, personal técnico, técnicos de prevención...) a conocer el

Objetivos

comportamiento del polvo de madera desde el punto de vista de su explosividad, de forma que sea posible reducir la siniestralidad y así evitar daños a las personas y también a las instalaciones.

Con ayuda de esta guía, será más sencillo determinar de manera práctica si en una situación concreta existe un riesgo de explosión por la presencia de polvo de madera.

Esta guía puede servir de herramienta para su utilización en la industria de la madera (aserraderos, muebles, tableros, carpinterías) y en aquellas otras actividades en las que se genere polvo de madera.

Para el desarrollo de este documento se ha trabajado en los laboratorios de la Universidad de Burgos simulando atmósferas con polvo de madera mediante la realización de numerosos ensayos en múltiples condiciones diferentes.

3. CONDICIONES DE EXPLOSIVIDAD

Existen cuatro condiciones necesarias para que se produzca una explosión:

- Un material inflamable o combustible.
- Una concentración suficiente de dicho material en el aire.
- Un comburente (normalmente oxígeno) en el medio.
- Una fuente de ignición.

La experiencia nos dice que existe una serie de productos que pueden generar este tipo de explosiones, entre los que están las sustancias inorgánicas como el polvo de hierro, de magnesio o de aluminio y también orgánicas, como la harina, el carbón, el cacao, el café o la madera.

Además, la distribución de la densidad del polvo en la atmósfera es de gran importancia ya que existe una mezcla explosiva de polvo/aire cuando la concentración de partículas de polvo combustible se encuentra entre el límite inferior de explosividad (LIE) y el superior (LSE). Si la concentración de una sustancia está por debajo del límite inferior, no habrá suficiente polvo para que se produzca una explosión. Cuando la concentración de partículas es inferior al 25 % del LIE o inferior a 20 g/m³ de aire se consideran no explosivas. Del mismo modo, si la relación entre la cantidad del combustible y comburente está por encima del LSE, no hay suficiente agente oxidante (como el oxígeno), para mantener la combustión.

En condiciones normales, el oxígeno atmosférico es suficiente para producir una explosión de polvo. Cuanto mayor sea la concentración de oxígeno, mayor es el riesgo de explosión. Aparte del oxígeno, los gases como el cloro o el flúor pueden actuar como agentes oxidantes.

El último requisito previo para una explosión de polvo es la presencia de una fuente de ignición, esta puede producirse de diferentes maneras como pequeñas chispas o descargas electrostáticas, superficies calientes a gran temperatura o fuego procedente de una pequeña llama. (Kramer et al., 2019)

En el caso de la madera sólida y productos como los paneles de contrachapado o los tableros de partículas (que tienen propiedades de ignición muy similares a las de la madera sólida) pueden encenderse directamente en llamas, o de modo incandescente, que puede o no ser seguido por la aparición de llamas. La temperatura de ignición es de alrededor de 250 °C para la madera cuando se expone a un flujo mínimo de calor, encendiéndose, al menos inicialmente, en un modo incandescente. Para causar una ignición que dé lugar a llamas de forma directa se requieren temperaturas superficiales de entre 300 y 365 °C.

Existen, por tanto, dos temperaturas de ignición, una para la autoignición y otra para la ignición provocada, entendiéndose como la temperatura mínima de un horno capaz de encender una muestra que se sitúe en su interior, es decir, la

temperatura más alta a la que se puede someter al material sin que este se incendie. (Babrauskas, 2002)

Más allá de esto, algunas características físicas del polvo como el tamaño de las partículas o su forma también resultan relevantes para que se produzca o no la explosión y serán estudiadas más adelante.

3.1 El mecanismo de explosión

El proceso de toda explosión tiene varias fases, la ignición es el inicio y a la vez la etapa más importante de la combustión. Se trata de un fenómeno complejo, que incluye una gran variedad de procesos físicos y químicos. La ignición comienza con la pirólisis, que es el proceso por el cual los materiales se descomponen al ser expuestos al calor. La pirólisis sucede fundamentalmente en la madera o materiales en forma de troncos en grandes trozos, sin embargo, esta descomposición es más difícilmente observable en las partículas pequeñas o el polvo.

3.1.1 Pirólisis

Este proceso de pirólisis produce cambios químicos y físicos y, por lo tanto, comprender y cuantificar los procesos es fundamental para conocer el comportamiento de ignición, quema y extinción de un material.

La madera en forma de tronco o grandes trozos sometida a una radiación externa hace que la temperatura de ésta empiece a aumentar. Para que se produzca la combustión, se debe producir primero una descomposición en un mayor número de moléculas, lo que tiene lugar si la temperatura alcanza un cierto valor y la madera se descompone generando parte de productos carbonizados y otra parte de volátiles que quedan en el ambiente en forma de gases, principalmente dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4) y en menor cantidad, hidrógeno (H_2) y algunos hidrocarburos.

La reacción será autosuficiente, es decir, se mantendrá sin necesidad de seguir aportando calor de forma externa si la combustión de los gases produce suficiente calor para que la generación de volátiles continúe.

La pirólisis se refiere, por tanto, a la descomposición térmica de una sustancia, es un proceso endotérmico y puede ocurrir sin un oxidante.

La madera en trozos grandes suele pasar por tres etapas principales de pirólisis, ya que tiene una conductividad relativamente baja y un calor específico relativamente alto. Estas fases son, una deshidratación y pirólisis muy lenta por debajo de 200 °C, el inicio de la pirólisis entre los 200 y los 300 °C y una pirólisis rápida cuando la temperatura supera los 300 °C.

El calor generado de manera superficial fluye hacia el interior incrementando la temperatura global, generando más gases volátiles, que se mezclan con el aire creando una mezcla combustible, que cuando alcanza una concentración de gases adecuada, entre los límites de explosividad se produce la ignición. (Bartlett et al., 2019)

3.1.2 Ignición

El proceso de ignición suele ocurrir precedido por la pirólisis en las piezas de mayor tamaño, aunque también puede tener lugar sin necesidad de esta, cuando tratamos con material combustible finamente dividido. Cuando la pirólisis se pone en marcha y en el medio hay presencia suficiente de oxígeno, los productos generados pueden experimentar una reacción de combustión exotérmica que se produce rápidamente. Este proceso de inicio de la combustión es lo que se denomina ignición.

El tiempo de ignición, un parámetro importante en el estudio del fuego y las explosiones, se define como el intervalo de tiempo entre el comienzo de la exposición al flujo de calor y la aparición de una llama continua. (Xie et al., 2020)

Para que se produzca la ignición se debe generar una mezcla combustible en la fase gaseosa, que alcance después una temperatura a la que pueda producirse una reacción de combustión.

La ignición puede dar lugar a combustión, con o sin llamas, y puede ser ayudada por una chispa o llama que aumenta la temperatura de las especies gaseosas que se han ido generando, conllevando que la reacción continúe, o bien, no contar con esta ayuda y que los volátiles alcancen la energía necesaria para la ignición de forma autosuficiente.

La ignición se produce a temperaturas muy inferiores a las experimentadas en los incendios, que normalmente se encuentran entre los 900 y los 1.100 °C, aunque esta temperatura puede cambiar en función de factores como la temperatura ambiente, el modo de transferencia de calor o la temperatura de autoignición que puede variar para el mismo material dependiendo de factores externos. Otras características como la densidad, el contenido de humedad o el grosor de la muestra también influyen de forma determinante en la cantidad del calor necesario para la ignición.

Por tanto, hasta que la combustión tiene lugar hay distintos factores que pueden afectar, acelerando o retrasando la situación. Por ejemplo, una velocidad de flujo alta disminuye el tiempo de pirólisis, ya que favorece la transferencia de calor a la superficie, sin embargo, aumenta el tiempo de inducción, porque dificulta la permanencia de las partículas en la fase gaseosa. La humedad retrasa la ignición ya que incrementa la intensidad mínima necesaria para que se produzca, de modo que, la madera seca se encenderá así en la mitad del tiempo que una

madera con un contenido de humedad de alrededor del 12 %, que es el contenido en agua habitual de una pieza de madera. (Bartlett et al., 2019)

3.1.3 Combustión

Tras la ignición de los gases, los productos de pirólisis experimentarán la combustión, proceso que implica la mezcla de los gases de pirólisis con el aire del ambiente.

Los procesos de combustión de materiales carbonizados, cuando se encuentran en un entorno oxidante, pueden suceder de dos maneras diferentes, bien implicando la combustión en llamas, o bien, una combustión lenta (o combustión incandescente) como se muestra en la Figura 19.

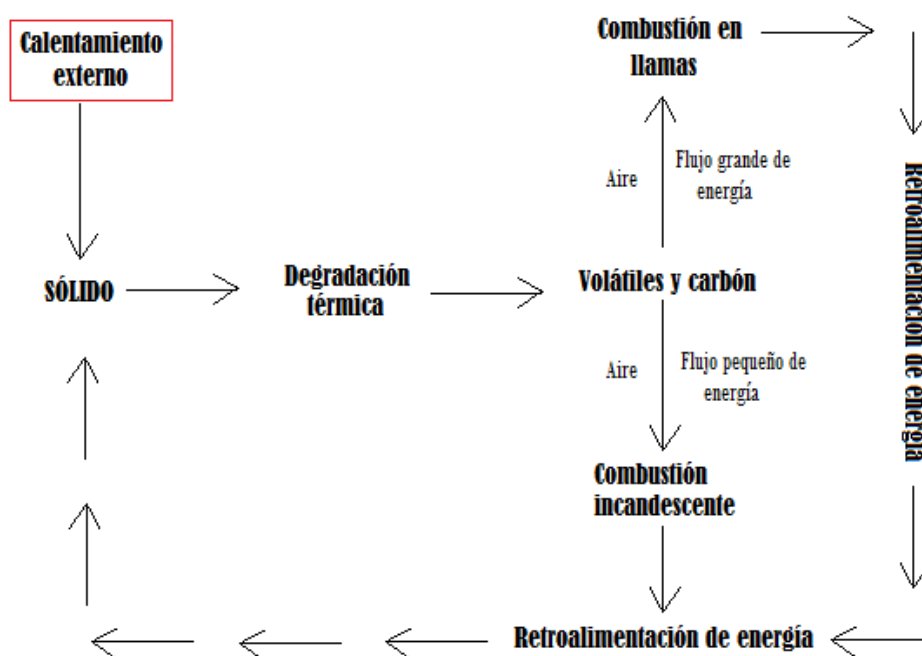


Figura 19. Esquema de los procesos de combustión. Fuente: (Di Blasi, 1993).

La combustión será llameante si la oxidación tiene lugar en la fase gaseosa de los volátiles que se han generado por degradación térmica, lo cual sucede cuando la combustión en fase gaseosa de productos volátiles produce el calor suficiente para provocar la degradación del combustible sólido y la propagación de la llama.

Cuando la temperatura o el calor generado se encuentran por debajo de este nivel, la oxidación da lugar a una combustión lenta, que es lo que suele ocurrir con la madera, un material poroso en el que el aire difunde dentro de la matriz sólida, dando lugar a una oxidación de este tipo. La liberación de calor es pequeña y uniforme sin pérdidas significativas por radiación, convección y

conducción, lo que hace que el material se carbonice y la combustión se propague de manera latente.

El calor de la combustión de la madera es de unos 15-20 mJ/kg, de estos, entre la mitad y dos terceras partes se liberan a través de la llama, y el resto son debidos a la combustión lenta, siendo la celulosa el componente que más contribuye a la combustión en llamas, debido a la gran cantidad de volátiles que produce.

Después de la ignición, la mayoría del oxígeno disponible será consumido por la llama, por lo que la descomposición térmica posterior a la ignición se producirá en ambiente muy viciado. Las llamas suelen ser fuertes al principio, para luego ir debilitándose hasta que las porciones de madera más profundas son pirolizadas.

La llama suministra un flujo de calor adicional al proporcionado por la fuente externa, sin embargo, el calor de la llama no es suficiente para generar una combustión sostenida por sí sola.

En la Figura 20 se puede observar el proceso completo de degradación de la madera, que combina procesos de transmisión de calor, como la radiación inicial y la convección posterior hacia el interior de la madera.

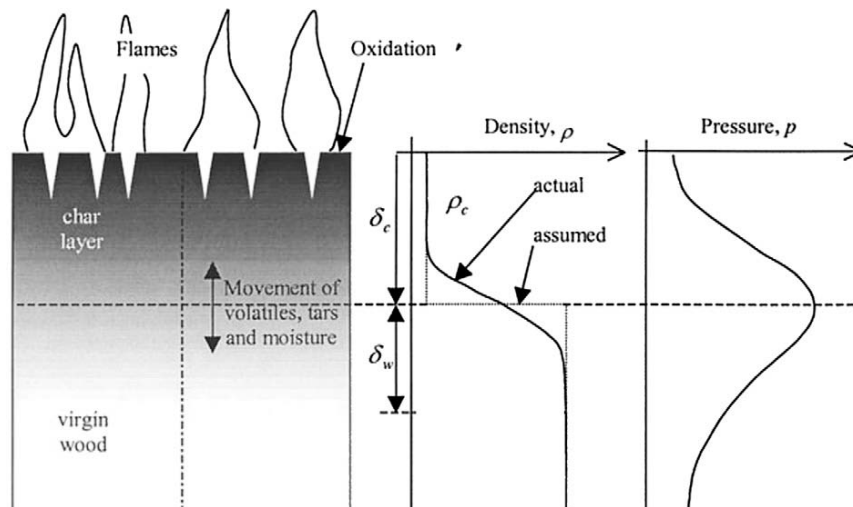


Figura 20. Modelo esquemático de la degradación física de la madera. Fuente: (Bartlett et al., 2019; Wang et al., 2010).

3.1.4 El mecanismo de explosión con muestras de polvo

El mecanismo explicado anteriormente varía cuando, en lugar de producirse la ignición de un trozo sólido de madera, este proceso tiene lugar debido a la existencia de una nube inflamable, formada por la mezcla de polvo y aire en la proporción adecuada y una fuente que inicie el proceso. Cuando la fuente (chispa, llama, etc.) entra en contacto con la nube tiene lugar una combustión muy rápida del combustible y la llama se propaga a través de la mezcla

explosiva. La mayor o menor propagación de dicha llama depende de varios factores, entre otros el tamaño de las partículas de polvo.

Una explosión de polvo es un fenómeno complejo, ya que implica, al mismo tiempo una transmisión de masa y de energía que tiene lugar como una reacción en varias fases. Por lo tanto, es importante comprender el mecanismo de un proceso de combustión de polvo, diferenciándolo del proceso de combustión de una explosión de gases.

Existen dos diferencias básicas entre los polvos y los gases. La primera de ellas es que la física de la generación y mantenimiento de las nubes de polvo y las nubes de gas son diferentes, lo que significa que en la mayoría de las situaciones en que pueden producirse fácilmente nubes de gas explosivas, la generación de nubes de polvo explosivas sería poco probable. Por otro lado, a diferencia de lo que sucede en las mezclas de gases, en el caso del polvo, la propagación de la llama no se limita solo a las nubes de polvo, sino que la existencia de capas depositadas supone un peligro adicional, pudiendo incrementar el alcance y la gravedad de la explosión.

La propagación de la llama a través de una nube de polvo puede ocurrir de dos maneras, por la combustión de los gases inflamables emitidos por las propias partículas cuando son calentadas hasta el punto de vaporización o pirólisis, o bien, por la oxidación directa en la superficie de las partículas de polvo.

En cualquier caso, el tamaño de las partículas juega un papel importante en el proceso de combustión, ya que las de mayor tamaño son menos eficientes en la propagación de la llama, mientras que las partículas de polvo más pequeñas reaccionan más rápida y eficientemente durante la combustión debido a que estas, al ser más finas, tienen mayor superficie por masa, se dispersan más fácilmente en el aire y permanecen en el aire por períodos más largos.

En las últimas dos décadas se han realizado multitud de pruebas experimentales para conocer mejor las diferencias y similitudes entre los mecanismos de propagación de las llamas en las nubes de polvo y en las mezclas de gases. Una de las principales divergencias reside en que, una partícula de polvo debe primero volatilizarse antes de prenderse fuego, además, también hay notables cambios en cuanto al mecanismo de turbulencia a nivel microscópico. La mayoría de los polvos de materiales usados en la industria son capaces de volatilizarse a temperaturas relativamente bajas (por debajo de 1.000 °C), por lo que la interacción entre la turbulencia y la combustión en las nubes de polvo es posiblemente de menor grado que en las llamas gaseosas.

Al igual que para las mezclas de gases se puede crear una curva de inflamabilidad para mezclas de polvo/aire, con límites inferior y superior de inflamabilidad. Sin embargo, los procesos que conducen al punto de ignición de los polvos son diferentes de los que se asocian con la ignición de gases inflamables.

En el caso de los polvos orgánicos (los más comunes en la industria), la combustión real comienza después de un lento proceso de volatilización de las partículas de polvo, motivo por el cual la ignición puede retrasarse unos milisegundos. La velocidad a la que la llama consume la mezcla combustible depende del tipo de la mezcla, su concentración, la turbulencia o la temperatura. (Abbasi y Abbasi, 2007).

3.1.5 Tipos de explosiones

En función de cómo y cuándo se produce una explosión podemos diferenciar entre explosiones primarias o secundarias.

Las explosiones primarias son aquellas que se producen de forma directa dentro de alguna unidad de proceso o maquinaria, como puede ser un molino, un silo de almacenamiento o un ciclón. Cuando este suceso se produce el objetivo principal es que la explosión quede limitada a la extensión de dicho emplazamiento.

Las explosiones secundarias tienen lugar cuando, una vez producida la explosión primaria, esta no es contenida y da lugar a una nueva explosión fuera del equipo de proceso. Para que esto ocurra, debe haber polvo acumulado que por la acción de la onda expansiva sea dispersado en el aire y alcanzado por la llama de la explosión primaria. Si esto sucede, es posible que ocurra la ignición de la nube secundaria generada, siempre que las condiciones de tamaño de partícula, humedad y concentración del polvo se encuentren entre los límites de explosividad.

Este tipo de explosiones representan un peligro aún mayor que las primarias, ya que pueden abarcar regiones mucho más grandes, por lo que suponen un problema potencial que debe evitarse prestando atención a la limpieza de las zonas cercanas a los equipos del proceso, reduciendo así, en la medida de lo posible, la presencia de capas de polvo que puedan generar nubes explosivas.

En algunos casos, puede ocurrir que la ignición de la nube de polvo secundario no genere un aumento de presión suficiente para que se produzca una explosión, pero sí para que se den incendios que se propaguen a grandes distancias respecto a la llama inicial. Este tipo de sucesos son mucho menos dañinos, pero igualmente pueden dar lugar problemas para los trabajadores, tanto por quemaduras como por inhalación de gases. (Eckhoff, 2019)

3.2 ¿Qué es una atmósfera explosiva?

Se considera que en un espacio se puede producir una atmósfera explosiva (ATEX) cuando hay una mezcla con aire de sustancias inflamables en forma de gases, vapores, nieblas o polvos, en condiciones atmosféricas, en la que después de una ignición, la combustión se propaga hacia la mezcla no quemada.

No se aplica este término si el riesgo de explosión viene dado por la existencia de sustancias inestables o cuando la mezcla combustible se encuentra en condiciones diferentes a las atmosféricas normales. Estas condiciones se refieren a la presión y temperatura habituales en el ambiente de trabajo. Por lo que no se considera atmósfera explosiva el ambiente dentro de un recipiente a presión, pero sí cuando se produce una fuga de una sustancia combustible almacenada a presión, llegando este escape a un lugar de trabajo que se encuentra en condiciones atmosféricas.

Para que se produzca una explosión no basta con unas condiciones ATEX, sino que esta atmósfera debe coincidir con un foco o fuente que inicie la ignición. Por este motivo, en las zonas con probabilidad de generarse unas condiciones explosivas se deben tener en cuenta dos aspectos, los equipos que se van a instalar en ese espacio, que deben ser seguros y no susceptibles de convertirse en una fuente de ignición y la seguridad con la que se trabaja en ese lugar, Figura 21.



Figura 21. Aviso de zona de la atmósfera explosiva ATEX. Fuente: <https://pixabay.com/es/>.

A este respecto existen numerosas disposiciones legales y técnicas que determinan las características y condiciones de seguridad que deben cumplir los distintos equipos en zonas en las que puedan producirse atmósferas explosivas. Una de las referencias en este sentido es la UNE-EN 60079-10-2:2016, que especifica los requisitos generales para la construcción, ensayo y marcado de material eléctrico destinado a ser usado en condiciones ATEX.

Además, esta misma norma aclara las condiciones atmosféricas que deben ser consideradas normales, es decir, para qué valores de presión y temperatura sería aplicable el término de atmósfera explosiva. Se establece así que se asumen como condiciones atmosféricas normales:

- Temperaturas en el intervalo entre -20 °C y 60 °C.
- Presiones en el intervalo entre 80 kPa (0,8 bar) y 110 kPa (1,1 bar).

Se indica adicionalmente que el contenido de oxígeno en el aire debe ser, como norma general de un 21 % v/v.

Siguiendo esta norma, todos los equipos que vayan a ser instalados o empleados en una zona que pueda considerarse ATEX, han de contar con un marcado EX, que indica que dicho material ha superado las pruebas necesarias y cumple con los requisitos establecidos para ser empleado sin riesgo en una atmósfera explosiva.

3.3 Instalaciones ATEX

Se consideran ATEX aquellos lugares en los que la presencia de gases, vapores, polvos o nieblas sea suficiente para generar una explosión además de todos los emplazamientos en los que se trabaje con polvos y fibras, como son cereales azúcar, cacao, leche en polvo, especias y harinas, carbón y coque, polvo de madera, azufre, productos metálicos, fibras sintéticas o algodón entre otros, siempre que se encuentren en cantidad suficiente. Entre estos se encuentran:

- Zonas de trabajo, manipulación y almacenamiento de las industrias alimentarias, químicas y farmacéuticas.
- Zonas en las que se producen, procesan, manipulan o empaquetan polvos metálicos de materiales ligeros (Al, Mg, etc.).
- Zonas de tratamiento de textiles, como algodón.
- Plantas de fabricación y procesado de fibras.
- Talleres de confección.
- Industrias de procesado de madera.

3.4 Clasificación por zonas

Dentro de las instalaciones en las que se puede formar una atmósfera explosiva es necesario distinguir diferentes zonas. Algunas de ellas podrán considerarse sin riesgo cuando no es esperable que se den condiciones ATEX. Entre los lugares en los que exista probabilidad de que se forme una atmósfera explosiva se han de distinguir tres zonas según el nivel de peligrosidad, Tabla 5.

De esta clasificación por zonas dependen las medidas de prevención y protección que se adoptan, siendo mucho más estrictas cuanto mayor sea la probabilidad de que se puedan generar atmósferas explosivas. Los equipamientos a emplear en cada una de estas zonas requieren de unas medidas de seguridad extremas, lo que incrementa su coste de manera ostensible respecto a equipos que desarrollan la misma actividad pero que no son aptos para ser empleados en condiciones de explosividad.

Tabla 5. Zonas según el nivel de peligrosidad de los lugares en los que existe probabilidad de que se forme una atmósfera explosiva.

La atmósfera explosiva viene dada por una mezcla de aire con:	
Gases o Vapores inflamables	Muestras de polvo inflamables
Zona 0	Zona 20
Lugar o área de trabajo donde existe una atmósfera explosiva presente frecuentemente . Es la zona de mayor probabilidad de explosión.	
Zona 1	Zona 21
Lugar o área de trabajo en la que, de manera ocasional , pueden darse condiciones ATEX.	
Zona 2	Zona 22
Lugar o área de trabajo donde puede darse la formación de una atmósfera explosiva pero rara vez sucede y si sucede, se produce durante periodos cortos de tiempo.	

Esta clasificación debe ser óptima y ajustada a la realidad, para determinar con gran exactitud y precisión qué instalaciones o espacios son considerados como peligrosos, ya que una distinción de zonas conservadora puede suponer un gasto muy elevado en la compra del material que disponga de las protecciones ATEX, mientras que el caso contrario puede ser un riesgo para la integridad de los trabajadores e instalaciones.

Por este motivo, este tipo de evaluaciones están realizadas por técnicos de prevención y son recogidas en el Documento de Protección contra Explosiones (DOPEX) en el que se tienen en cuenta no solo las áreas de trabajo si no también el interior de los equipos. (De Gea, 2007)

Para realizar esta distinción entre zonas y con ellas las medidas a adoptar, se deben seguir los siguientes pasos.

En primer lugar, se deben determinar las características del polvo combustible, por lo que la información aportada en esta guía es un componente indispensable en el proceso de protección frente a una explosión.

Además, es importante tener en cuenta el diseño de la instalación y el proceso industrial que se va a desarrollar, de manera que se adopten medidas preventivas reduciendo todo lo posible la generación de polvo combustible mediante procesos cerrados o sistemas de aspiración local.

Esta clasificación por zonas también viene dada por las fuentes de escape, es decir, aquellos lugares por donde el componente inflamable puede escapar

generando la mezcla combustible con el aire. Las zonas más alejadas de los posibles escapes suelen tener una probabilidad menor de que se genere una atmósfera explosiva. Según la frecuencia del escape se puede distinguir entre:

- Escape continuo: la fuente de escape puede darse de manera continua, permanece durante mucho tiempo o bien, durante pequeños períodos, pero con gran frecuencia. Este tipo de escapes darán lugar a zonas 20 y suelen estar presentes en el interior de silos o molinos, en los que se introducen o generan polvos como parte del proceso productivo.
- Escape primario: la fuente de escape puede darse de forma ocasional durante el trabajo. En este caso se formarán zonas de tipo 21, como sucede en el interior de algunos equipos de extracción.
- Escape secundario: el escape puede darse, pero no es algo esperable en condiciones de normalidad. Cuando se produce dura períodos cortos y es poco frecuente que ocurra. Generan zonas 22 y un ejemplo de este tipo de escape es la zona exterior de un depósito de polvo.

Por último, resulta muy importante identificar la posibilidad de formación de capas de polvo que puedan resultar peligrosas. Por norma general, cualquier lugar en el que se deposite polvo combustible es susceptible de crear una mezcla explosiva con el aire y por tanto debe clasificarse como zona ATEX, ya que, existe otro riesgo derivado de las capas de polvo, que es la generación de incendios si estas capas se depositan sobre equipos o aparatos eléctricos que alcanzan temperaturas elevadas pudiendo producirse la ignición del polvo en capa.

Además, las capas de polvo acumuladas podrían generar explosiones secundarias, igual o más perjudiciales que las primarias, cuando una explosión primaria levante dichas capas de polvo, generando nuevas nubes inflamables.

Según la frecuencia con la que se puedan producir corrientes o fenómenos que den lugar a que la capa forme una mezcla explosiva con el aire, se clasificarán como zona 21 si son frecuentes, o zona 22 si se produce de forma ocasional. (Fernández, et al., 2003; Herrero, 2007)

3.5 Extensión de las zonas

Cuando un determinado espacio reúne las condiciones para ser considerado como una zona ATEX, es importante conocer la extensión de la misma, es decir, la distancia desde la fuente y en cualquier dirección, en la que se considera que existe riesgo de explosión. La mayor o menor extensión de dicha zona depende en gran parte de los parámetros que trataremos más adelante y que determinan la explosividad de la mezcla polvo/aire, entendiéndose que cuanto mayor sea la peligrosidad o la probabilidad de explosión, más grande será la zona considerada como ATEX. Entre los factores que influyen de manera decisiva en la extensión

de la zona peligrosa se encuentran la cantidad de polvo, su tamaño, la concentración del mismo y su contenido en humedad.

A diferencia de las zonas con riesgo de explosión debido a gases, cuya extensión se calcula con gran precisión, las normativas para el cálculo de zonas con presencia de mezclas pulverulentas explosivas no incluyen expresiones o fórmulas tan concisas, por lo que habitualmente se estima una distancia de un metro en torno a la fuente de escape y hasta el suelo o cualquier superficie sólida. En el caso de que el polvo se deposite formando acumulaciones o capas, se extiende la zona considerada peligrosa hasta el límite en el que exista polvo depositado.

Como se ha mencionado con anterioridad, podemos distinguir tres tipos de zonas ATEX para polvos explosivos según la frecuencia con la que se genera un ambiente peligroso. La extensión de zona 20, la considerada más peligrosa, incluye el interior de los equipos y los conductos en los que está presente de manera frecuente o continúa la mezcla explosiva de polvo/aire. Se considera que estas condiciones son incompatibles con el desarrollo de cualquier actividad, por lo que está prohibido que exista una zona 20 en un lugar de trabajo.

En cuanto a la zona 21, incluye el interior de equipos que procesan algunos polvos con probabilidad de generar una mezcla explosiva polvo/aire y los emplazamientos fuera de los equipos, con una extensión de un metro en torno a la fuente de escape en todas las direcciones. En el caso de que existan en dicho área, estructuras, paredes, muros, etc., que limiten la difusión del polvo, estos elementos son considerados los límites de la zona. Cuando se trata de espacios al aire libre o en el exterior de los edificios, la extensión de la zona puede variar en función de las condiciones meteorológicas existentes en cada momento, ya que la presencia de lluvia o viento puede afectar de manera considerable al contenido en humedad o a la dispersión de la mezcla combustible.

Por último, la zona 22, al igual que la 21, también se ve afectada por las características propias de la mezcla. Normalmente se estima suficiente la consideración de un área de un metro a partir de la zona 21 alrededor de la fuente de escape. Igualmente, esta extensión varía en función de la existencia de estructuras o de los efectos meteorológicos cuando se trata de emplazamiento al aire libre.

Como norma general, una zona 21 no confinada, es decir, no limitada espacialmente, vendrá rodeada a continuación por una zona 22.

En la Figura 22 se puede observar un plano de un emplazamiento real de un aserradero con las diferentes zonas de riesgo de formación de atmósferas explosivas.

ASERRADERO

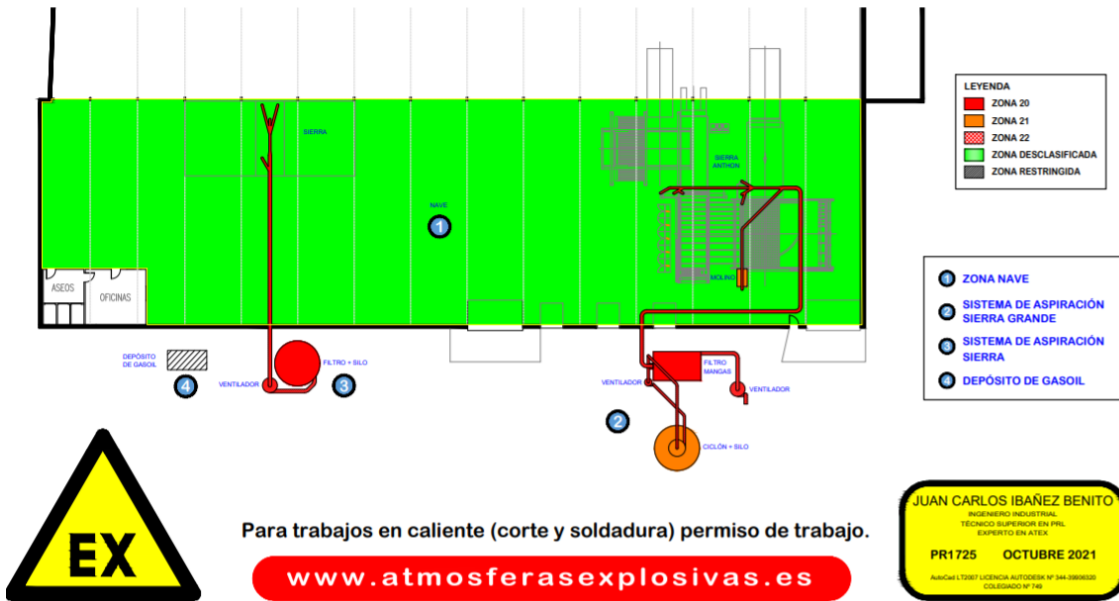


Figura 22. Plano de un aserradero con identificación de las distintas zonas de peligro ATEX. Fuente: elaborado por la empresa *Atmósferas Explosivas* (www.atmosferasexplosivas.es) en base a un emplazamiento real.

En las Figuras 23 y 24 se observan las instalaciones, tanto exteriores del ciclón, el silo y ventiladores representados en el plano, como las interiores, con zonas restringidas por vallas, como las sierras.



Figura 23. Fotografías de las instalaciones externas del aserradero. Fuente: cesión de fotografías realizadas por la empresa *Atmósferas Explosivas* (www.atmosferasexplosivas.es).



Figura 24. Fotografías de las instalaciones en el interior del aserradero. Fuente: cesión de fotografías realizadas por la empresa *Atmósferas Explosivas* (www.atmosferasexplosivas.es).

En ocasiones puede considerarse despreciable la extensión de las diferentes zonas, esto sucede cuando:

- La zona 20 < 1 dm³.
- La zona 21 < 10 dm³.
- La zona 22 < 100 dm³.

En otras ocasiones, algunas de las variables que intervienen en la extensión de zonas son superiores a estos parámetros, por lo que no se considera un metro como se ha indicado con anterioridad, sino que es necesario calcular la distancia empleando la siguiente fórmula:

$$d_z = (d_0 + d_h) \cdot (K_d \cdot K_u \cdot K_{ta} \cdot K_w) \quad \text{Ec.1}$$

Siendo,

d_z : la extensión de las zonas en metros.

d_0 : la distancia de referencia en metros.

d_h : la distancia en función de la altura de la fuente de emisión en metros.

K_d : el coeficiente que depende de varios factores como el límite inferior de explosividad y del caudal.

K_u : el coeficiente relativo al contenido de humedad del polvo.

K_{ta} : el coeficiente relativo al tipo de ambiente, cerrado o abierto.

K_w : el coeficiente que depende de la velocidad del aire y de la velocidad de cimentación.

Algunos de estos parámetros han de ser calculados mientras que otros coeficientes tienen un valor u otro en función del caso concreto. (Herrero, 2007; García-Torrent, et al., 2008; UNE-EN 60079-10-2:2016)

4. PARÁMETROS A CONTROLAR

En diferentes estudios a lo largo del tiempo se han ido estableciendo los factores que influyen en una explosión de polvo y que, por tanto, han de ser controlados. Entre estos parámetros se pueden diferenciar los que tienen que ver de manera directa con las características del propio polvo, los que determinan la sensibilidad a la ignición y los que influyen en la severidad de la misma.

Las propiedades fisicoquímicas del polvo de madera tienen una gran influencia en su comportamiento frente a una fuente de ignición o lo que es lo mismo, una misma muestra de polvo en diferentes condiciones, tanto propias como del ambiente que rodea a la mezcla, puede reaccionar dando lugar a una explosión o no hacerlo.

4.1 Parámetros característicos de una muestra concreta

4.1.1 El tamaño de partícula

Resulta imprescindible la determinación de la granulometría de las muestras a estudiar, ya que la diferente proporción de los distintos tamaños de grano influye profundamente en la explosividad. Las partículas más finas facilitan que la llama se propague, ya que, además dada su pequeña masa son capaces de permanecer más tiempo en suspensión e intensifican la severidad de la explosión. (Dudarski et al., 2015) Cuando las partículas tienen diámetros superiores a 500 μm , no se forman nubes de polvo inflamables y la máxima inflamabilidad tiene lugar cuando el tamaño medio de las partículas está por debajo de 75 μm . (Jespen, 2016) Sin embargo, se alcanza un momento en el que, si las partículas de polvo son muy pequeñas y no existe una influencia de la volatilización en la combustión, es decir, la generación de residuos procedentes de la combustión de compuestos volátiles no tiene un efecto impulsor en la reacción, entonces, la reducción del tamaño de las partículas no afectará a la explosividad de la muestra.

4.1.2 La humedad de la muestra

El contenido en humedad de la madera, es decir, la masa de agua que esta contiene en su interior respecto a su masa anhidra (UNE-EN 844:2020) se estabiliza entorno a un valor que se denomina humedad de equilibrio y que depende de la humedad y la temperatura ambientales. La cantidad de agua contenida en la muestra influye de manera determinante en su explosividad por varios motivos, uno de ellos es que el agua incrementa el peso del polvo haciendo que este se deposite más rápidamente y dificultando la formación de atmósferas explosivas debidas al polvo en suspensión. Además, la humedad obstaculiza el mecanismo de propagación de las explosiones, de manera que puede llegar incluso a actuar como un inhibidor impidiendo que esta se produzca

si el contenido en agua es suficientemente elevado. En las muestras con baja humedad, el agua es consumida rápidamente debido al aumento de temperatura y al calor de la explosión, algo que resulta mucho más complicado cuando la cantidad de agua en el interior de la muestra aumenta, de manera que, a mayores humedades menor probabilidad de que la explosión tenga lugar. (De la Mata, 2011)

4.1.3 La forma de las partículas

La estructura microscópica de las partículas tiene que ser considerada como un factor importante en la explosividad del polvo. Como norma general, las formas con una mayor superficie propagarán mejor la llama y serán, por tanto, más peligrosas. (Cashdollar, 2000) Las partículas más grandes son ineficientes en la propagación de la llama por lo que son las porciones más finas las que contribuyen a aumentar la peligrosidad de la muestra, del mismo modo que las partículas con mayor relación de superficie por unidad de masa reaccionan más rápido. En la comparación de muestras fibrosas de madera con otras esféricas, se observan diferencias en el comportamiento frente a la explosividad, siendo las primeras las que, en las mismas condiciones de ensayos, presentan energías y temperaturas mínimas de ignición más bajas. (Amyotte et al., 2012) Se considera, por tanto, que además de la distribución de tamaño de partículas, la forma de estas también resulta clave, ya que las porciones de tamaño más pequeño y formas no esféricas son más explosivas alcanzando en los ensayos valores de presión máxima más elevados. (Lee et al., 2016)

4.2 Parámetros externos

4.2.1 Las condiciones ambientales

De manera inevitable, las propiedades fisicoquímicas de la muestra vendrán determinadas por el ambiente en el que se encuentre. Si esta se encuentra en un ambiente a una temperatura muy alta, la cantidad de oxígeno disponible para la combustión será menor, pero al mismo tiempo, la muestra estará mucho más seca. Estos dos efectos darán lugar a un incremento en la severidad de la explosión, algo que también sucede cuando se incrementa la presión.

4.2.2 La fuente de ignición

En la norma UNE-EN 1127-1:2020 se indican los distintos tipos de fuentes que pueden dar lugar a una explosión si son puestas en contacto con una atmósfera explosiva como la que se produce cuando existe polvo en suspensión. Estas son muy variadas y van desde llamas, chispas o corrientes eléctricas, diferentes tipos de radiaciones o superficies calientes. Cada una de estas alcanza temperaturas más o menos elevadas, genera unas energías distintas e incluso abarca mayores

o menores volúmenes de muestra, haciendo que la explosión pueda darse o no en las mismas condiciones en función de la fuente que esté presente, variando además enormemente la severidad de la misma en caso de producirse.

En nuestro caso de estudio vamos a probar dos fuentes diferentes que abarcan los distintos tipos de equipos o acontecimientos que podrían dar lugar a una explosión. Se va a emplear un arco eléctrico generado para intentar reproducir el efecto que tendría que se produjera una chispa en un entorno de una atmósfera explosiva. Por otro lado, se utilizará una resistencia eléctrica que alcanza una temperatura cercana a los 400 °C, de manera que simulará unas condiciones en las que la mezcla de polvo y aire entre en contacto con alguna superficie, material o equipo a elevada temperatura.

4.2.3 El tiempo de retardo y la turbulencia

Estos dos parámetros a los que normalmente no se les da mucha importancia pueden resultar claves en el desarrollo de una explosión. Se entiende como tiempo de retardo el tiempo que transcurre entre el comienzo de la dispersión de la muestra de polvo en el aire y el momento de la descarga o generación de la chispa que produce la explosión. (UNE-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016) La severidad de explosión depende en gran medida de este valor.

La turbulencia también juega un papel importante en la generación de una explosión de polvo y en la severidad de la misma. Se entiende como turbulencia los movimientos aleatorios que el aire genera. Normalmente se requieren mayores energías y temperaturas para provocar la ignición cuando las nubes de polvo presentan una alta turbulencia, aunque también esta turbulencia provoca explosiones más violentas. (Larrad, 2016).

4.2.4 La presencia de inertizantes

Una mezcla de polvo y aire que reúna todas las características (concentración, humedad, tamaño de partícula...) para provocar una explosión puede verse inhibida si se mezcla con el polvo un gas u otro polvo que actúe como inertizante. Cuando se emplean gases inertes (como el nitrógeno o el dióxido de carbono) lo que se hace es conseguir disminuir la concentración de oxígeno en el aire hasta que es insuficiente para producir la ignición, de manera que la explosión no puede generarse. (Larrad, 2016) El empleo de algunas sales, como el bicarbonato de sodio, mezcladas con el polvo, también ha demostrado tener efecto en la reducción de la velocidad de propagación de la llama en muestras explosivas. (Chen et al., 2017)

La adición de polvo no combustible o inerte al polvo combustible es un medio eficaz que permite reducir el riesgo de explosiones de polvo, ya que es capaz de prevenir y/o de mitigar sus efectos. (Amyotte, 2006) El empleo de este tipo de

polvos no combustibles tiene como resultado un aumento de la energía mínima de ignición (EMI) y de la temperatura mínima de ignición (TMI) de las mezclas haciendo que disminuya la sensibilidad a la ignición del polvo combustible y previniendo la explosión, o bien, la gravedad de las consecuencias de ésta en caso de producirse. (Bu et al., 2020)

Además de los factores anteriormente mencionados, que son decisivos en que la explosión se produzca o no, se han definido una serie de parámetros medibles que se desarrollan en el siguiente apartado, y que deben tenerse en cuenta en el estudio de las sustancias inflamables o combustibles, ya que resultan básicos para determinar la sensibilidad a la ignición y la severidad, ayudándonos así a conocer la probabilidad de que se produzca la explosión y la gravedad de las consecuencias que de ella pueden derivar.

4.3 Parámetros que determinan la sensibilidad a la ignición

La sensibilidad a la inflamación hace referencia a la facilidad que tiene la sustancia concreta o combustible, para iniciar la ignición cuando está en presencia de alguna de las fuentes de ignición ya mencionadas, para la valoración de esta facilidad o tendencia a la inflamación se tienen en cuenta tres parámetros:

4.3.1 La Temperatura Mínima de Ignición

Esta temperatura es el valor más bajo capaz de provocar que la muestra inicie la ignición. Se determina empleando dos métodos, la inflamación en nube (TMI_{nube}) y en capa (TMI_{capa}). El método de nube consiste en la dispersión de una pequeña cantidad de polvo en un horno a una temperatura constante que se va aumentando o disminuyendo hasta encontrar el punto en el que comienza la inflamación. (UNE-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016)

Esta prueba es de una duración corta, por lo que los datos obtenidos son aplicables, sobre todo a los equipos industriales en los que el polvo está presente como nube durante períodos pequeños.

El valor obtenido se expresa en °C y es determinante para establecer las temperaturas máximas de trabajo en áreas con atmósferas potencialmente explosivas. Cuanto más bajo sea este valor, más fácilmente se iniciará el incendio de la muestra y con ello la posible explosión.

La manera de proceder se recoge en la norma UNE-EN ISO/IEC 80079-20-2 (2016). Así, la muestra es introducida en un horno, y en ausencia de información previa, se establece una temperatura de 500 °C, una presión de aire, que dispersa la muestra, de 30 kPa y una cantidad de muestra de 0,3 g. En caso de no producirse la ignición la temperatura se aumenta hasta alcanzar los 600 °C (máxima temperatura alcanzable por el equipo).

Una vez producida la ignición se va variando la cantidad de muestra y la presión hasta conseguir las condiciones que dan lugar a la ignición más vigorosa.

A continuación, manteniendo esa misma masa y presión de dispersión, se van realizando nuevas pruebas, reduciendo la temperatura 20 °C cada vez hasta que tras diez intentos a una temperatura no se produzca la ignición de la muestra. Si se sigue produciendo la ignición a 300 °C, se continúa reduciendo la temperatura en 10 °C cada vez.

Este mismo ensayo se realiza variando la concentración de polvo, estableciéndose que la TMI es la temperatura más baja a la que se observa cualquier resultado positivo (llama) a lo largo de una serie de concentraciones. (Dastidar, 2019; UNE-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016)

Para la determinación de la temperatura mínima de inflamación en capa se procede siguiendo la misma normativa que para el ensayo de nube. El procedimiento consiste en depositar una capa de polvo cuyo espesor se puede ir variando sobre una placa eléctrica cuya temperatura está controlada con un termopar, de modo que es posible regular la misma hasta obtener el valor más bajo que da lugar a la ignición de la capa.

4.3.2 El Límite Inferior de Explosividad o la Concentración Mínima Explosiva de la mezcla

Existen unos límites de explosividad tanto para los gases como para los distintos tipos de polvos. Esto quiere decir que hay un intervalo de concentración en el que la mezcla de polvo y aire será explosiva; tanto por encima como por debajo de ese intervalo no existe riesgo de explosión. Estas concentraciones comprendidas entre el límite de explosividad inferior y superior, se denominan rango de explosividad.

La Concentración Mínima Explosiva (CME) es un parámetro que hace referencia a la densidad de partículas de polvo en su mezcla con el aire, siendo este límite el valor más bajo de concentración de polvo capaz de iniciar la ignición cuando entre en contacto con la fuente de ignición correspondiente. Para expresar este valor se hace en unidades de masa por unidad de volumen de aire; un valor bajo del Límite Inferior de Explosividad (LIE) o de la CME hace que la probabilidad de que la explosión se produzca, aumente.

Conocer el LIE es de gran importancia en el estudio de la inflamabilidad de los polvos. El Límite Superior de Explosividad (LSE) se trataría de una concentración muy alta a partir de la cual la mezcla deja de resultar peligrosa, sin embargo, en la práctica es mucho más útil conocer el Límite Inferior.

Siempre y cuando la concentración de polvo en el aire se encuentre en el rango de explosividad, la severidad de la explosión dependerá de la concentración. En el intervalo entre ambos límites la severidad se representa como una campana

de Gauss, cuanto más nos acerquemos a los límites, menos severa o destructiva será la explosión.

Cuando la concentración de polvo suspendido en el aire sea cercana a la mínima que pueda generar la ignición y la propagación de la llama, es decir, a la CME, la presión de explosión será pequeña y, en consecuencia, la explosión tendrá poca repercusión. Según nos alejemos de ese valor de CME, la severidad de la explosión aumentará hasta alcanzar un punto máximo.

Para determinar la CME se procede realizando pruebas sucesivas a concentraciones de polvo decrecientes empleando la misma fuente de ignición. Se suele partir de una concentración de 100 g/m^3 que se va variando en función de si la muestra da lugar a una explosión o no.

En función de la norma que se tome como referencia se puede proceder de diferentes maneras, la norma americana ASTM E1515-14 indica que se debe modificar sistemáticamente en 10 g/m^3 la concentración cuando la inicial es de 100 g/m^3 o menor, o en un 25 % si es mayor de 100 g/m^3 , hasta que se consigue determinar la concentración mínima explosiva.

Otra forma de proceder, según la UNE-EN 14034-3:2011 es iniciar la prueba con una concentración más elevada (500 g/m^3) e ir disminuyendo la concentración a la mitad hasta que no se produzca la explosión. Si la muestra no explota con la concentración inicial, ésta se aumenta en 250 g/m^3 y se prueba de nuevo.

Para realizar esta prueba se emplea una esfera de 20 litros como la que aparece en la Figura 25 o una similar de 1 m^3 , en la que se deposita la muestra y la energía de ignición puede variar entre 2,5 y 5 kJ para el primer caso o emplear una fuente de ignición de 10 kJ en el caso de la esfera de 1 m^3 . (Dastidar, 2019)

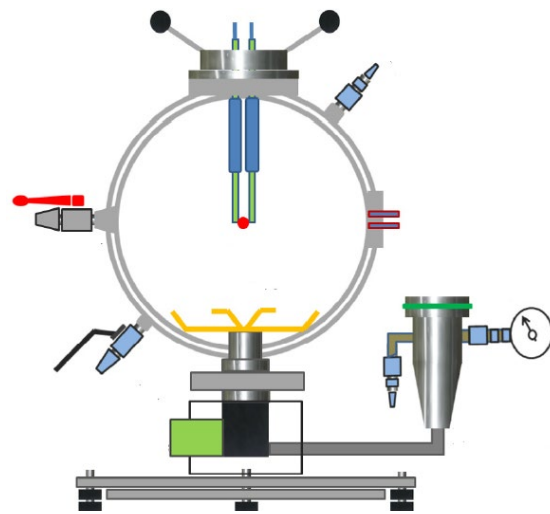


Figura 25. Esquema de la esfera de explosión de 20 L.
Fuente: (Lee et al., 2016).

También es posible realizar esta prueba empleando un Tubo Hartmann como el que se emplea en la determinación de la Energía Mínima de Ignición. En este caso se emplearía el mismo método de trabajo que con la esfera, recalculando las concentraciones en función del volumen del tubo.

4.3.3 La Energía Mínima de Ignición

Este parámetro indica el valor más bajo de energía, expresado en mJ, aportado por la fuente de ignición que es suficiente para que se produzca la inflamación de la mezcla más inflamable de una mezcla explosiva.

Normalmente, en las mezclas de gas inflamable en el aire, las energías mínimas de inflamación son muy bajas en general, entre 0,01 y 1,0 mJ, valores que en algunos casos están por debajo de los que supone una descarga estática, por lo que estas mezclas siempre presentan un riesgo de ignición siendo ésta menos probable a medida que se aproxima a valores cercanos a 1 mJ o por encima de estos.

En el caso de las nubes de polvo esta energía se ve afectada por muchos factores, mencionados anteriormente, como las condiciones ambientales, la presión, la concentración de oxígeno, la humedad de las muestras, el tamaño de partícula, etc. La Energía Mínima de Ignición (EMI) de las nubes de polvo puede variar en un rango muy amplio, suelen localizarse en el rango entre 10 y 100 mJ, pero también es posible encontrar valores más bajos (en torno a 1 mJ) a temperaturas elevadas y en presencia de gases inflamables o en el caso concreto del polvo de azufre más fino, alrededor de 0,01 mJ; en el extremo superior pueden superar los 1.000 mJ.

Conocer la EMI de una nube de polvo ayuda a determinar riesgos potenciales de esta. De esta forma, cuando la Energía Mínima determinada es elevada se considera que la nube de polvo no es sensible a la ignición por descargas electrostáticas, que proporcionan energías bajas, normalmente inferiores a 1 mJ. En la Figura 26 se pueden observar los distintos rangos de energía en los que se sitúan las Energías Mínimas de Ignición de diferentes tipos de materiales.

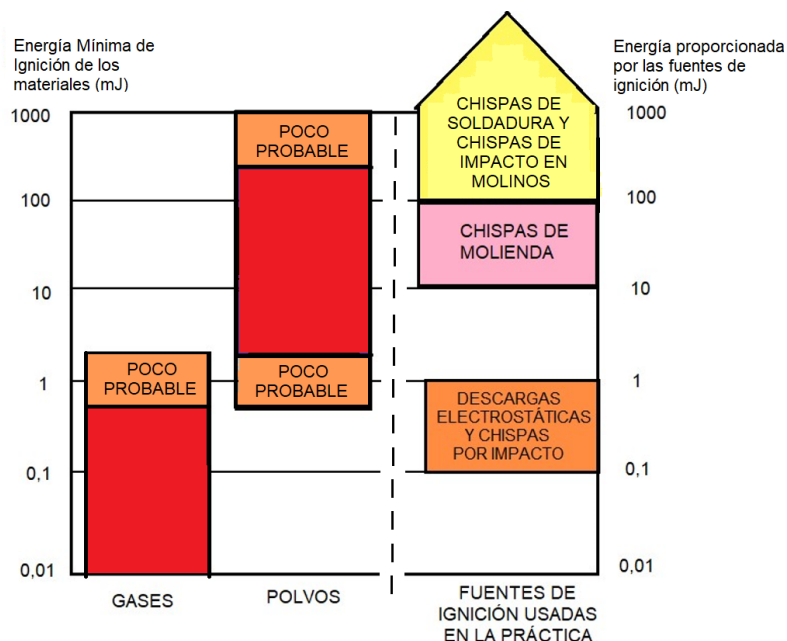


Figura 26. Energía mínima de ignición de diferentes materiales. Fuente: (Jespen, 2016).

Para llevar a cabo esta prueba se toma como referencia la norma y método de la UNE-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016 que emplean un tubo Hartmann modificado como equipo de ensayo. Este aparato está equipado con una copa de dispersión de polvo con una boquilla de dispersión en su centro, una fuente de aire comprimido que trabaja en torno a 7 bares de presión y dos electrodos situados a cada lado del tubo de vidrio transparente (uno de alta tensión y otro de tierra), Figura 27.

En cada prueba se coloca una cantidad de la muestra de polvo en la copa de dispersión, el polvo se dispersa generando una nube dentro de la cámara por la acción del aire comprimido.

Tras un tiempo de retardo previamente establecido se genera una chispa en el circuito y se observa si se produce o no la ignición de la muestra. En función de si se produce o no la propagación de la llama, la manera de proceder se repite para una misma concentración variando la energía de la chispa hasta encontrar la mínima energía con la que la nube de polvo no se enciende tras realizar diez pruebas seguidas.

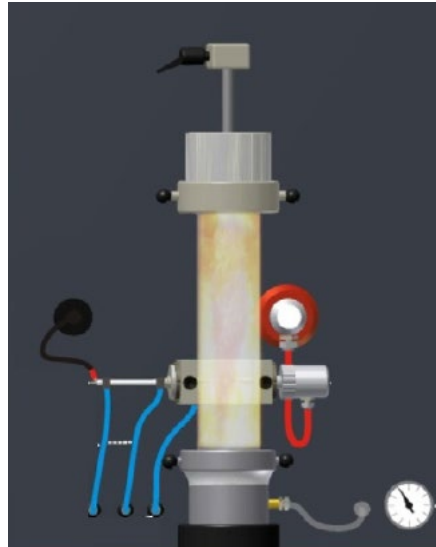


Figura 27. Tubo de Hartmann empleado en la determinación del MIE. Fuente: (Dastidar, 2019).

El procedimiento se repite a diferentes concentraciones de polvo hasta que se encuentra el valor más bajo (mínimo) de energía de ignición.

Si al realizar la prueba, se encuentra que con una energía inicial de 1 mJ es suficiente para encender la nube de polvo generada no se realiza ninguna prueba adicional y se establece que el valor de EMI es <1mJ.

4.4 Parámetros que determinan la severidad de la explosión

Una explosión de polvo sólo se produce, por tanto, si existen al mismo tiempo una mezcla explosiva de polvo/aire, es decir, aquella con las características adecuadas y las condiciones ambientales propicias; y una fuente de ignición con suficiente energía. Para evaluar si existe o no riesgo de explosión y para el diseño de medidas de seguridad preventivas y de protección se necesitan conocer las características de seguridad como la capacidad de formar mezclas explosivas de polvo/aire, presión máxima de explosión o el valor del índice de deflagración.

Resulta de gran importancia conocer también la severidad de una explosión, sobre todo cuando esta tiene lugar en un espacio cerrado, ya que el confinamiento influye de manera negativa en las consecuencias de la misma. De

manera experimental se pueden obtener ciertos datos que ayudan a valorar la gravedad de la explosión en caso de producirse, estos parámetros son:

4.4.1 La Concentración Límite de Oxígeno

Esta concentración es el porcentaje más bajo de oxígeno en el aire necesario para que se produzca la ignición con una concentración determinada de polvo en suspensión. Para calcular este límite se recurre a la situación más peligrosa, es decir, a la concentración de polvo en el aire más proclive a causar una explosión. Se ha llegado a la conclusión de que la combustión de madera no puede mantenerse cuando la concentración de oxígeno es menor del 14 %, lo que sugiere que dicha concentración es un valor crítico para este proceso. (Back III et al., 2000)

4.4.2 La Presión Máxima de explosión

Se entiende como presión máxima ($P_{m\acute{a}x}$) la diferencia entre la presión que había justo en el momento en el que se inicia la ignición y la presión más alta que se alcanza durante la explosión, es decir, el incremento producido debido al propio proceso. Esta presión, por lo general, alcanza unos valores entre 6 y 10 bares.

4.4.3 La constante característica o índice de deflagración

Esta constante, conocida como $K_{m\acute{a}x}$ o K_{St} , se calcula teniendo en cuenta la velocidad máxima de aumento de presión a cada concentración de polvo $\left(\frac{dP}{dT}\right)_{m\acute{a}x}$ y el volumen de la instalación en la que se produce la explosión. De manera que la constante se calcula como:

$$K_{m\acute{a}x} = \left(\frac{dP}{dT}\right)_{m\acute{a}x} \cdot v^{1/3} \quad \text{Ec.2}$$

Según el valor que se obtenga para esta constante se distinguen diferentes clases de explosión, Tabla 6.

Tabla 6. Diferentes clases de explosión dependiendo del valor de $K_{m\acute{a}x}$. Fuente: (De Gea, 2007).

Explosividad	$K_{m\acute{a}x}$ (bar·m/s)	Tipo de explosión
St 0	0	No se produce
St 1	0-200	Débil
St 2	201-300	Considerable / Grave
St 3	>300	Muy grave

La gran mayoría de los polvos combustibles tienen una explosividad del tipo St 1. En la Tabla 7 se recogen algunos ejemplos de los tipos de explosión provocados por cada tipo de polvo.

Tabla 7. Ejemplos de $K_{m\acute{a}x}$ en distintos polvos. Fuente: (Jespen, 2016).

Polvo	Tamaño de partícula (μm)	$K_{m\acute{a}x}$ (bar·m/s)	Tipo de explosión
Polvo de madera	43	102	St 1 – Débil
Harina de soja	20	110	St 1 – Débil
Carbón	29	117	St 1 – Débil
Almidón de arroz	18	190	St 1 – Débil
Polvo de aluminio	22	400	St 3 – Muy grave
Magnesio	28	508	St 3 – Muy grave

En la Tabla 8 se muestran los rangos en los que parámetros como el límite inferior de explosividad, la presión máxima o las temperaturas de ignición pueden variar en función de los tipos de polvo y las características físicas (granulometría y humedad) de cada muestra concreta. (Larrad, 2016)

Tabla 8. Parámetros para distintas muestras de polvo. Fuente: (Jespen, 2016).

Polvo	LIE (g/m^3)	$P_{m\acute{a}x}$ (bar)	$K_{m\acute{a}x}$ (bar·m/s)	TMI_{nube} ($^{\circ}\text{C}$)	TMI_{capa} ($^{\circ}\text{C}$)
Polvo de madera	30-60	8,9-10,5	130-190	420-520	310
Polvo de carbón	30	8,5	140	430	240
Azúcar	30	9,0	123	370	400
Arroz	60	6,7	91	510	450
Harina de trigo	60-125	8,0-9,3	139	440	440
Celulosa	125	8,9	56	480	270

Para conocer estos parámetros se realizan pruebas basadas en métodos que se definen en las normas, con condiciones reproducibles, como la energía de la fuente de ignición, la intensidad de la turbulencia y la homogeneidad de la mezcla polvo/aire. En la práctica, las mezclas explosivas de polvo/aire se producen muy a menudo debido a la dispersión de una capa de polvo, el transporte de polvo o procesos en los que la nube de polvo generada no suele ser homogénea y no se extiende por todo el recinto.

Hasta ahora, el diseño de las medidas de seguridad, dependía de los valores $P_{m\acute{a}x}$ y $K_{m\acute{a}x}$, sin embargo, la tendencia de los polvos a formar o no nubes de polvo no se ha tenido en cuenta. Para optimizar la evaluación de los riesgos de explosión y el diseño de las medidas de protección contra las explosiones podría ser útil una nueva característica de seguridad, la llamada *polvorosidad* o *dustiness*. (Klippel et al., 2013)

El comportamiento de las mezclas polvo/aire es muy complejo y en condiciones normales, las partículas en el aire se depositan debido a la gravedad. Sin embargo, el tiempo que pasa hasta la deposición total, o la facilidad para que este polvo depositado vuelva a dispersarse, depende en gran medida de la muestra de polvo específica. Esta cualidad, denominada *polvorosidad*, y que se determina de forma experimental, es la tendencia del polvo a formar nubes y a permanecer en el aire.

Para la determinación de esta cualidad, al no tratarse de una propiedad física se atiende a dos principios básicos, la atenuación de la luz y la proporción de masa de la muestra respecto a la masa medida.

Las técnicas de atenuación de la luz consisten en medir la concentración de polvo en función del tiempo a través de la proporción de luz recibida del total de intensidad emitida. Esta atenuación de la luz es un método adecuado para conocer la concentración de polvo. Para evaluar la deposición de polvo o las fracciones de masa y tamaño en determinados puntos lo más recomendable es emplear la gravimetría.

Esta evaluación de la *polvorosidad* de los polvos industriales es de gran utilidad para determinar la seguridad en el lugar de trabajo. Entre los riesgos tradicionalmente evaluados se encuentran la fracción inhalable y con ello los problemas para la salud, aunque en los últimos tiempos también se ha empleado esta cualidad en la protección contra las explosiones de polvo, tanto en la mejora de la determinación de zonas como en la adaptación de áreas de ventilación. (Klippel et al., 2015)

4.5 Parámetros relacionados con la susceptibilidad térmica

En ocasiones, con determinadas muestras pueden darse procesos de oxidación y autocalentamiento. En estos casos, es importante tener en cuenta algunos parámetros para conocer el comportamiento térmico y la posibilidad de autocombustión de una mezcla concreta. Entre ellos están:

4.5.1 El índice de Maciejasz

Este índice se obtiene en relación a la reactividad de las sustancias orgánicas de la muestra respecto al oxígeno, midiendo así su tendencia a la autoinflamación. Cuando el valor del índice de Maciejasz (IM) es superior a 10, se considera que existe riesgo de autocombustión. (De Gea, 2007)

4.5.2 La Temperatura de Emisión de Volátiles inflamables

Este valor, también llamado TEV, permite conocer la facilidad que tienen las sustancias orgánicas para degradarse térmicamente generando sustancias volátiles que son más sensibles a la ignición y pueden dar lugar a la inflamación de la muestra con mayor facilidad. Cuanto más baja sea esta temperatura mayor será la probabilidad de que la explosión se produzca. (De Gea, 2007)

4.5.3 El ensayo de Termogravimetría y la Calorimetría Diferencial de Barrido

La Termogravimetría (TGA) consiste en someter la muestra a un calentamiento programado registrando las pérdidas de masa que se van produciendo, de este modo, se puede conocer a qué temperaturas se producen las distintas reacciones. El segundo ensayo también conocido como DSC (por las siglas en inglés de *Differential Scanning Calorimetry*) consiste en registrar los intercambios de calor que se producen en una muestra de polvo comparando con una referencia. Valores de temperatura bajos, como para la temperatura de oxidación característica (T_{carac}), suponen una mayor susceptibilidad a la autocombustión. (De Gea, 2007)

4.5.4 La Energía de activación

Esta energía, abreviada como E_a , permite caracterizar las diferentes muestras de polvo. De modo similar a los anteriores parámetros, valores bajos significan una mayor facilidad para el comienzo de las reacciones y con ello un mayor riesgo de ignición. (De Gea, 2007)

5. TOMA DE MUESTRAS

Para la realización de este estudio se ha recogido polvo procedente de diferentes puntos del proceso de la transformación de la madera en la industria, de distintas especies de empleo frecuente en la sierra de Burgos y Soria, como son: pino insigne (*Pinus radiata*), pino Soria (*Pinus sylvestris L*), roble francés (*Quercus petraea*), roble húngaro (*Quercus frainetto*), mezcla de pino y roble, hasta fibras de tableros de densidad media (MDF).

Estas muestras presentan características diversas en cuanto a tamaño de partícula, humedad, procedencia o especie de madera lo que ayuda a que los datos obtenidos sean más completos.

Las muestras recogidas que se han seleccionado para la realización de las distintas pruebas presentan las características recogidas en la Tabla 9.

Tabla 9. Características de las distintas muestras de madera recogidas. La toma de muestras se ha realizado en distintas épocas del año para garantizar diversidad en las condiciones de recogida.

Tipo de madera	Proceso en el que se recoge la muestra	Tamaño promedio de partícula (μm)	Humedad en el momento de la recogida (%)
MDF	Lijado	70,40	7,39
Roble francés	Filtros de bandas	144,08	9,95
Pino insigne	Tubos de aspiración	265,15	10,34
Pino Soria	Depositado sobre las tuberías	288,61	10,61
Mezcla de roble y pino	Corte	378,60	9,64
Roble húngaro	Corte	921,21	9,37

Las pruebas que se van a realizar tienen como objetivo determinar la influencia que tienen las características propias de la muestra respecto a su comportamiento frente a una fuente de ignición como una resistencia eléctrica, un arco eléctrico o temperaturas elevadas.

6. EQUIPOS EMPLEADOS Y ENSAYOS REALIZADOS

Como se ha explicado con anterioridad, resulta imprescindible conocer las características de las muestras de polvo recogidas antes de llevar a cabo las pruebas de explosividad. Para ello se realizan las medidas correspondientes a la humedad y granulometría de cada una de ellas.

6.1 Determinación de la humedad

En primer lugar, se determina la humedad inicial de la muestra, para tener un conocimiento exacto de la situación real, es decir, la cantidad de agua presente en dicho tipo de polvo cuando se encuentra en un silo, depósito, aserradero...



Figura 28. Equipo analizador de humedad.

Para medir el contenido en humedad se emplea el método de diferencia de secado, que consiste en la determinación del contenido en agua de la muestra por diferencia de pesada entre la masa inicial y la masa final de la misma tras ser sometida a una temperatura de 103 °C. (UNE-EN 13183-1:2002)

En nuestro caso se emplea para esta tarea el Analizador de humedad MB90 de Ohaus Corporation, Figura 28, que incluye una bandeja en la que se deposita una pequeña cantidad

de la muestra (en torno a 1 gramo),

esta es pesada y calentada hasta la temperatura deseada mediante un sistema de lámparas halógenas. La temperatura se mantiene hasta que se alcanza una pesada estable, entendiéndose que se ha perdido todo el agua contenido en la muestra. La pantalla del equipo muestra entonces el contenido de humedad expresado en porcentaje en peso (%).

6.2 Separación granulométrica por tamizado

Tras conocer el dato inicial de humedad, el resto de la muestra se seca durante un día en una estufa a temperatura constante de 40 °C con el objetivo de facilitar su tamizado (mediante el cual se realizará la clasificación granulométrica). Este secado tiene como propósito eliminar gran parte de agua de la muestra evitando que se formen agregados, pero sin llevar al polvo a sequedad total, ya que dicha

sequedad disminuiría drásticamente el peso de las partículas dificultando la tarea de los tamices, que basan su eficacia en la acción de la gravedad. De modo que, si la masa de las partículas de polvo es demasiado pequeña, estas no conseguirán depositarse si no que quedarán flotando entre los tamices haciendo



Figura 29. Tamices con distintos pasos de luz.

casi imposible su separación por tamaños.

El tamizado es un proceso sencillo empleado con el objetivo de obtener diferentes porciones de la muestra inicial en función de los diferentes tamaños de partícula contenidos en la misma. Para ello, se toma una batería de tamices de acero inoxidable de 200 mm de diámetro de la marca FILTERA, con

pasos de luz de 32, 63, 125, 250, 320, 400, 500, 620 μm y de 1 milímetro, Figura 29. De esta forma se establece la clasificación de las distintas porciones basada en el método pasa/no pasa para cada uno de los tamices. La muestra va cayendo por gravedad con los tamices ordenados de manera decreciente respecto al tamaño de malla pudiendo separar las partes de muestra que quedan retenidas en cada uno de ellos.

Mediante la pesada posterior de la cantidad de muestra retenida en cada tamiz se puede elaborar un perfil granulométrico con el que obtener el tamaño medio de partícula como el de la Figura 30.

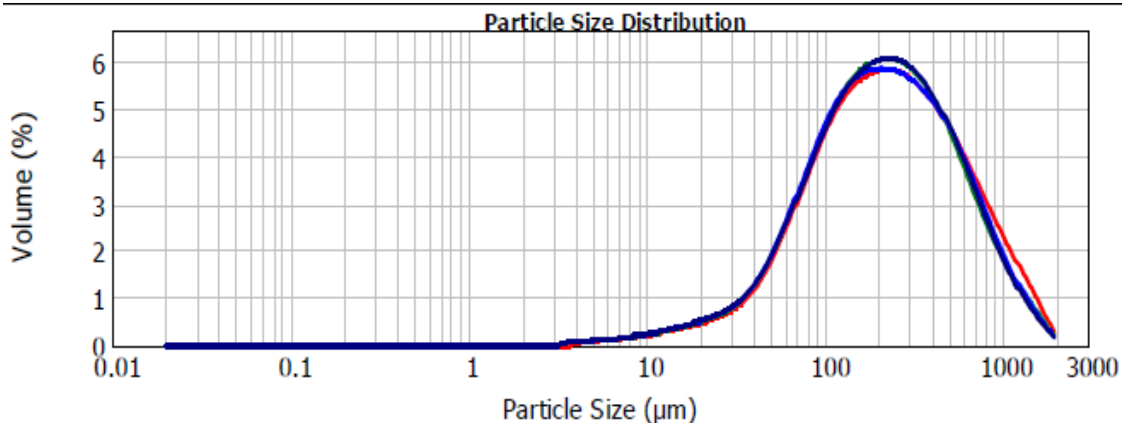


Figura 30. Perfil granulométrico de una muestra de polvo de madera obtenida con el equipo Mastersizer 2000.

6.3 Ensayos de explosividad

Una vez finalizado el proceso de tamizado se realiza nuevamente la medida de la humedad de cada una de las porciones de las muestras y se ensayan en el tubi Hartmann con el objetivo de determinar si podrían o no dar lugar a una explosión.

Para los ensayos de explosividad, tanto para determinar la Concentración Mínima Explosiva como para conocer la relación entre granulometría – humedad – explosividad, se emplea un tubo de metacrilato, basado en una modificación del tubo Hartmann, cuyas características se definen en la UNE-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016 y que se puede observar en la Figura 31. Consiste en un recipiente cilíndrico de vidrio con un diametro interno de 70 ± 5 mm que cuenta con una cámara de combustión de 1,2 L y un sistema de dispersión de polvo en forma de hongo. Esta dispersión se produce por medio de un soplido de aire generado por un compresor que permite suspender en el aire la muestra, que se había depositado en el fondo del tubo, de manera que se forma una nube que puede ser inflamable, simulando las condiciones reales en las que el polvo de madera podría estar en la industria.

La fuentes de ignición más comunes son una resistencia eléctrica que simula la presencia de superficies calientes o rozamientos en la industria o un arco eléctrico que genera una chispa, como las que podrían generarse en la industria al trabajar con ciertas herramientas de corte.

En nuestro caso, hemos centrado los ensayos en el empleo de la resistencia que es de una aleación de níquel-cromo con un alambre de un diámetro aproximado de 1,2 mm, una longitud de 470 mm y alcanza temperaturas por encima de los 400 °C. (Klippel et al., 2013)

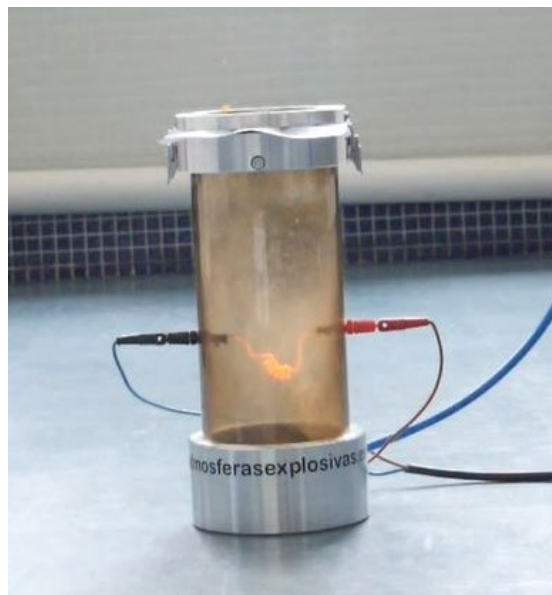


Figura 31. Fotografía del equipo de explosión, basado en una modificación del tubo Hartmann.

En la realización de ensayos se va a emplear un polvo explosivo como estándar de referencia que permita comparar el resto de muestras con él. En nuestro caso se ha tomado el *licopodium*, sustancia que procede de las semillas de una planta similar al helecho. Se emplea como estándar de calibración para la determinación de energías mínimas de ignición con equipos de generación de chispas de alto voltaje. (DIN IEC 60079-20-2:2009-01 – Entwurf VDE 0170-20-2:2009-01)

Esta sustancia se adquiere de forma comercial bajo el nombre Lycopodium de Sigma-Aldrich. El tamaño medio de partícula que presenta el producto es muy pequeño, por lo que se realizan los diferentes ensayos únicamente en las porciones de tamaño de partícula inferior a 32 µm, en el rango 32-63 µm, así como en el producto sin tamizar, Tabla 10,

Tabla 10. Resultados de los ensayos de explosividad realizados con el Lycopodium.

	Lycopodium		
	Porción <32 µm	Porción 32-63 µm	Producto sin tamizar
Concentración Mínima Explosiva (g/m³)	97,48	116,98	136,47
Temperatura Mínima de Ignición en nube (°C)	460	460	460
Humedad máxima de explosión (%)	-	29	20,76
Humedad máxima de ignición (%)	-	30,27	23,30

6.3.1 Concentración Mínima Explosiva

Para la realización de este ensayo se toman como referencia las dos normas UNE-EN 22333-1990 y 22335-1992, las cuales establecen un método de trabajo para la determinación de la concentración mínima explosiva de polvo de carbón, que se adapta para el polvo de madera.

Hemos ensayado la Concentración Mínima Explosiva para las distintas especies de madera y las distintas porciones granulométricas obtenidas tras el tamizado, de manera que podemos analizar si hay variaciones entre especies y cómo evoluciona la CME a medida que aumenta el tamaño de partícula.

Se han obtenido los resultados que se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Determinación de la CME (g/m³) en las diferentes porciones tamizadas de cada especie.

Muestra	CME (g/m ³)					
	Porción <63 μm	Porción 63-125 μm	Porción 125-250 μm	Porción 250-320 μm	Porción 320-400 μm	Porción 400-500 μm
Roble húngaro	-	77,99	565,39	779,85	-	-
Pino y roble	-	77,99	136,47	506,90	-	-
Pino insignne	77,99	58,49	77,90	214,46	311,94	525,39
Roble francés	77,99	58,49	97,48	311,94	740,86	1.481,71
MDF	97,48	77,99	116,98	214,46	292,44	779,85
Pino Soria	77,99	77,99	116,98	155,97	272,95	1.676,68

Las muestras de diferentes especies resultan indistinguibles cuando la granulometría es pequeña, Figura 32. Además, en todos los casos, las partículas menores de 125 μm son capaces de producir ignición en concentraciones inferiores a 100 g/m³. A medida que se incrementa el tamaño de las partículas, la CME aumenta exponencialmente y este incremento sigue sin depender de la especie concreta.

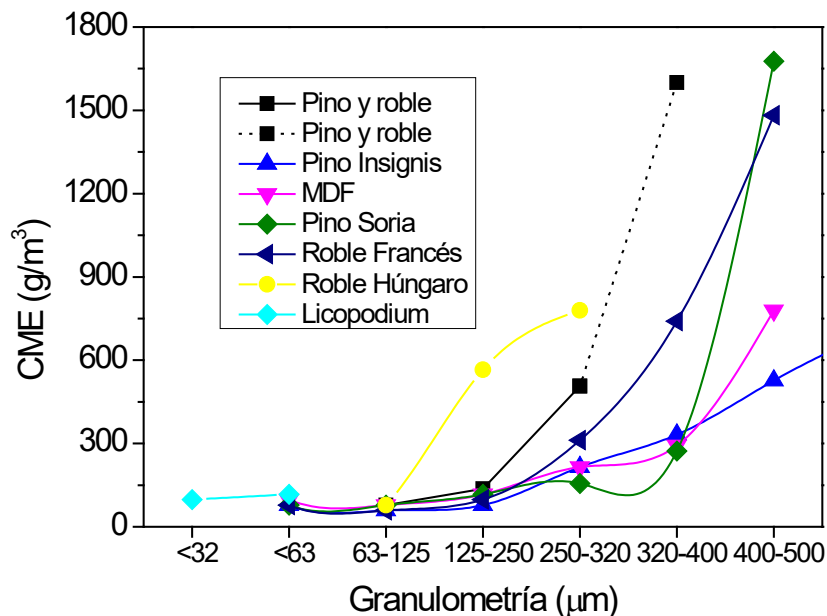


Figura 32. Concentración Mínima Explosiva (CME) en función de la granulometría de las muestras sin tamizar a máxima sequedad.

Existe una relación directamente proporcional entre el tamaño de partícula y la concentración de la muestra necesaria para que se produzca la ignición. La mayor diferencia entre especies aparece en el caso del roble húngaro, que aumenta más rápidamente su CME al aumentar el tamaño de partícula.

En el caso del *licopodium*, el cual solo se puede ensayar en las porciones menores debido a su pequeño tamaño comercializado, los valores obtenidos también se encuentran en un rango cercano a los de las muestras de polvo de madera e incluso estas últimas presentan valores más bajos.

6.3.2 Explosividad en función de la humedad y del tamaño de partícula

Para este ensayo se ha probado una concentración fija (alrededor de 580 g/m³) de distintas muestras a las cuales se les va aumentando gradualmente su contenido en humedad, desde la sequedad total hasta el valor a partir del cual ya no son capaces de producir una llama o generar una explosión.

En todos los casos se han ensayado varias muestras diferentes dentro de cada especie de madera, recogándose en este trabajo aquellas con peores condiciones o que han dado lugar a explosión o generación de llama (ignición) hasta alcanzar valores de humedad más elevados.

Se ha llevado a cabo esta prueba tanto con las porciones de distinta granulometría, con el objetivo de ver la relación entre el tamaño de partícula y la influencia de la humedad en la explosividad, como con las muestras recogidas originales, sin tamizar.

6.3.2.1 Muestras originales sin tamizar

Al observar las muestras sin tamizar, advertimos que el grado de humedad hasta el cual se produce la ignición no presenta una gran variación entre las distintas especies o variedades de muestras estudiadas, si no que depende del tamaño medio de las partículas en cada caso. Para diferenciar este comportamiento de las muestras hemos dividido las muestras en dos grupos en función de su tamaño de partícula de recogida. En la Figura 33 se observa el distinto comportamiento de las muestras de uno y otro grupo.

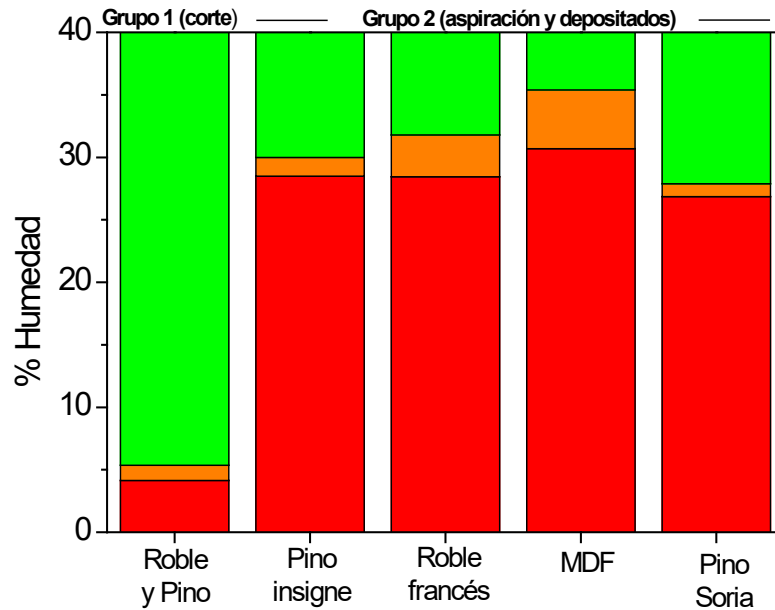


Figura 33. Comparativa de la explosividad en función de la humedad para muestras del Grupo 1 y del Grupo 2. Zona de Explosión (rojo), Zona de Ignición (naranja) y Zona de No Explosión (verde).

Se incluyen en el Grupo 1 a las muestras procedentes de los primeros procesos de transformación, como son el corte con cualquier tipo de sierra, manual o automática, así como el cepillado de troncos. Las muestras de este tipo suelen tener una proporción pequeña de partículas finas y su tamaño promedio siempre está por encima de 320 μm ya que están formadas principalmente por virutas o partículas de gran tamaño. Además, el corte suele producirse a partir del tronco verde, por lo que la humedad de las muestras es bastante elevada, en ocasiones por encima del 35 % en masa. Estas dos características, el gran tamaño de partícula y la elevada humedad, hacen que el polvo clasificado como Grupo 1 resulte poco susceptible a producir una explosión. En la Figura 34 se observa cómo serían las muestras de esta clase.



Figura 34. Madera tras el primer corte, Grupo 1.

En la Figura 33, la primera columna empezando por la izquierda corresponde al Grupo 1 y presenta un comportamiento muy diferente a las demás, ya que únicamente produce ignición o genera una explosión con un grado de humedad en torno al 5 %. Esto es debido a que presenta un tamaño medio de partícula mucho más grande que el resto de las muestras, que se encuadran en el Grupo 2, con tamaños de partícula mucho menores, y siendo peligrosas hasta humedades más elevadas.

Se encuadran en el Grupo 2 a las muestras que han sido sometidas a más procesos además del corte, como puede ser el lijado, a las que se recogen en los sistemas de aspiración o extracción y al polvo depositado y acumulado con el paso del tiempo.



Figura 35. Polvo de madera recogido por aspiración, Grupo 2.

En estos casos, por norma general, la proporción de partículas de tamaño pequeño es elevada. El lijado es un proceso agresivo que rompe las fibras de la madera reduciendo su tamaño. En el caso de las muestras de aspiración están compuestas fundamentalmente por los denominados “finos”, es decir, la porción de muestra cuyas partículas son más pequeñas, ya que, las más grandes se depositan debido a su peso y no son extraídas, Figura 35.

Las muestras recogidas como polvo depositado proceden de zonas en las que no se realiza una actividad concreta (tuberías, rejillas...) y que, por tanto, son partículas de pequeño tamaño que se han mantenido en suspensión debido a su bajo peso y que se han ido depositando de manera aleatoria con el transcurrir del tiempo, hasta dar lugar a capas o acumulaciones importantes si no se mantiene una limpieza frecuente y adecuada.

En todos los casos, las partículas incluidas en este grupo presentan, además, humedades más bajas que las del Grupo 1, por lo que su peligrosidad y riesgo de explosión aumenta considerablemente.

En la Tabla 12 se compara el tamaño promedio de partículas de las distintas especies y variedades de madera estudiadas con su explosividad a diferentes humedades. Se observa con claridad la relación entre el tamaño de partícula y las humedades máximas de explosión e ignición. Cuanto menor es el tamaño medio de partícula, hasta humedades más altas es capaz la muestra de seguir dando lugar a una explosión o existe riesgo de generación de llama.

Además, en la Tabla 12 se incluye la humedad a la que se recogieron las muestras inicialmente y se compara con las humedades hasta las que las muestras siguen siendo peligrosas.

Tabla 12. Comparativa entre humedades y explosividad de las muestras sin tamizar de las distintas especies.

Grupo	Tipo de madera	Tamaño promedio de partícula (µm)	Humedad en el momento de la recogida (%)	Humedad máxima de explosión (%)	Humedad máxima de ignición (%)
Estándar	Licopodium	32-63	4,92	20,76	23,30
2	MDF	70,41	7,39	30,69	35,40
2	Roble francés	144,08	9,95	28,44	31,80
2	Pino insigne	265,14	10,34	28,50	29,99
2	Pino Soria	288,58	10,61	26,86	27,89
1	Mezcla de roble y pino	378,59	9,64	4,13	5,36

Las muestras del Grupo 2 tenían en el momento en el que se cogieron una humedad muy inferior a la máxima a partir de la cual dejan de ser peligrosas, o lo que es lo mismo, en las condiciones de recogida todas ellas se encontraban en la zona roja del gráfico, es decir, la zona de explosión. La muestra del Grupo 1 es la única que en las condiciones de recogida se encontraba fuera de la zona de riesgo.

6.3.2.2 Muestras tamizadas

Se realiza también el tamizado de las muestras iniciales y se separan en porciones de diferente tamaño para conocer su comportamiento con distintos grados de humedad en cada uno de estos rangos de tamaño de partículas.

La cantidad de muestras ensayadas del Grupo 1 es menor respecto al Grupo 2 para las porciones más pequeñas, ya que, en muchos casos, en estas muestras, que se obtienen de manera directa del corte, no existen partículas de menos de 63 o 125 µm.

Cuando se representa gráficamente estas muestras del Grupo 1 en relación con las diferentes porciones estudiadas, Figura 36, se observa que, para tamaños de partícula muy pequeños resultan muy peligrosas y se comportan de manera similar a las muestras del Grupo 2, que han sido sometidas a muchos otros procesos.

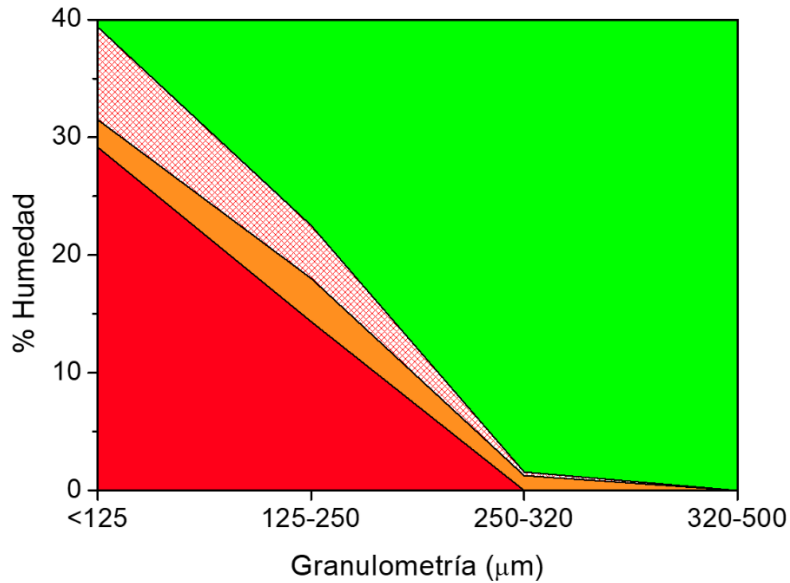


Figura 36. Relación granulometría-explosividad de las muestras del Grupo 1. Zona de Explosión (rojo), Zona de Ignición (naranja), Zona de Margen de Seguridad (puntos rojos) y Zona de No Explosión (verde).

De la Figura 36 se infiere que las muestras del Grupo 1, que contienen porciones de partículas menores de 125 µm y en el rango 125-250 µm son explosivas (Zona roja) hasta humedades en torno a un 30 % y un 14 %, respectivamente.

Cabe recordar que el tamaño medio de recogida de estas muestras del Grupo 1 está por encima de 320 µm y se puede advertir que solo una parte pequeña de las partículas se encuentra por debajo de las 250 µm y las muestras con tamaño medio mayor de 250 µm descienden bruscamente su peligrosidad.

Se procede igualmente con las muestras clasificadas como Grupo 2 y se realiza la representación gráfica de las distintas porciones tamizadas, Figura 37.

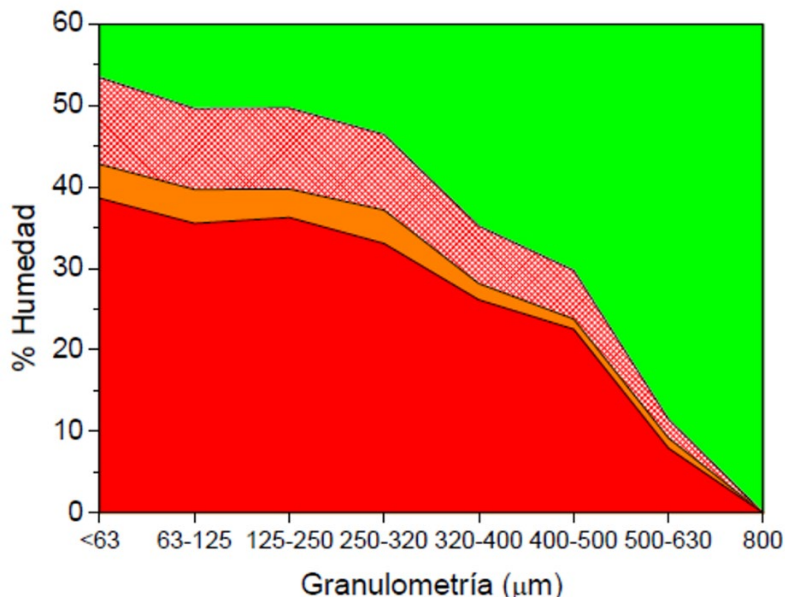


Figura 37. Relación granulometría-explosividad de las muestras del Grupo 2. Zona de Explosión (rojo), Zona de Ignición (naranja), Zona de Margen de Seguridad (puntos rojos) y Zona de No Explosión (verde).

Para las muestras ensayadas de Grupo 2 ha tenido lugar explosión hasta humedades elevadas, llegando incluso a valores cercanos al 40 %, generándose igualmente llama en aquellas ocasiones en los que la explosión no ha llegado a producirse. Algunas muestras de este grupo con tamaño de partículas superior a 630 μm generan llamas e incluso dan lugar a una explosión cuando su contenido en agua es bajo.

Estas diferencias existentes entre las muestras de uno y otro grupo no encuentra explicación en los parámetros considerados hasta el momento ya que hemos observado que para porciones con el mismo rango de tamaño de partícula y mismo grado de humedad, las muestras del Grupo 2 resultan significativamente más peligrosas que las del primer Grupo. Esto parece indicar que existe otro factor o factores que marcan la diferencia entre las partículas de ambos grupos, siendo la distinción principal entre unos y otros su tratamiento en los distintos procesos. Las muestras del Grupo 1, incluso las de menor tamaño, solo han sido sometidas a procesos de corte por lo que aún en las partículas pequeñas, la estructura se mantiene, mientras que en las muestras del Grupo 2, los distintos procesos dañan la estructura de las partículas aumentando su peligrosidad.

Esta relación entre la estructura interna de la madera y su peligrosidad se comprobará más adelante empleando la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), que permite observar la forma o disposición estructural de las distintas partículas a nivel microscópico y establecer una relación con su explosividad.

6.4 Temperatura mínima de ignición en nube

Otro ensayo importante en el estudio de las propiedades del polvo de madera es la medida de la temperatura mínima de ignición en nube, para ello se emplea el equipo MIT-3 de Anko Trading Ltd, Figura 38. En este equipo, se introduce una pequeña cantidad de muestra, que es dispersada en su interior y se ve sometida a las altas temperaturas a las que se encuentra el horno siguiendo el procedimiento recogido en la norma UNE-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016. En caso de que la explosión no se produzca se variaría la rampa de temperatura elevando la temperatura máxima hasta 1.000 °C y si la explosión no tiene lugar se determinará que la temperatura mínima de ignición es mayor a 1.000 °C y se finalizará la prueba.

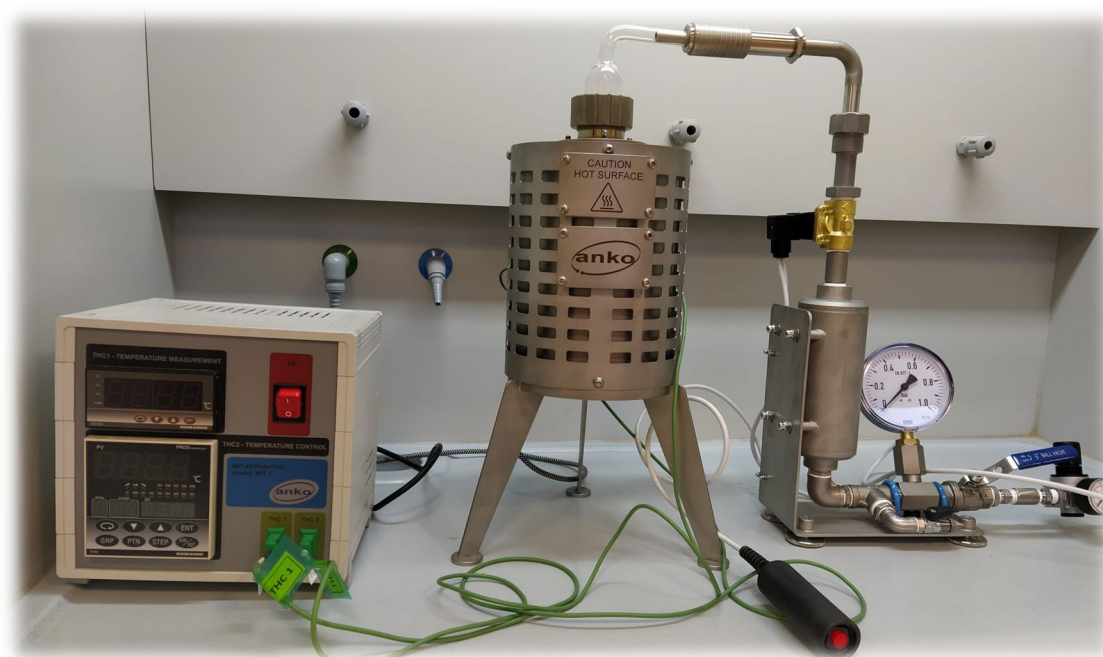


Figura 38. Equipo MIT3 para la determinación de la Temperatura Mínima de Ignición en nube.

Para determinar la temperatura mínima de ignición se fija la temperatura inicial de ensayo, se establece una presión suficiente para que la muestra se introduzca por completo en el horno y se ensaya una pequeña cantidad de muestra que se va aumentando hasta encontrar la masa que produce la explosión más vigorosa. Una vez fijados ambos parámetros de cantidad de muestra y presión, se procede a ir disminuyendo la temperatura hasta que se obtenga la temperatura a la cual no se observa llama en 10 experimentos seguidos.

6.4.1 Muestras originales sin tamizar

Se realiza el ensayo para las muestras sin tamizar. En algunos casos, si el tamaño medio de la muestra es muy grande (como es el caso de la muestra de roble húngaro), este ensayo no se puede llevar a cabo. En la Tabla 13 se recogen los resultados obtenidos.

Tabla 13. Temperatura Mínima de Ignición en nube (°C) de las muestras sin tamizar.

Tipo de madera	Masa (g)	Presión (bar)	Tamaño medio de partículas (μm)	TMI _{nube} muestra sin tamizar (°C)
Mezcla de roble y pino	0,5	0,5	378,59	540
MDF	0,6	0,5	323,46	580
Pino Soria	0,5	0,5	288,58	540
Pino insigne	0,5	0,5	265,15	500
Roble francés	0,5	0,5	144,08	460

Se observa una relación entre el tamaño medio de las partículas de la muestra y la temperatura obtenida, cuánto menor es la granulometría, más baja es la temperatura de ignición de la muestra.

6.4.2 Muestras tamizadas

Se procede igualmente tomando porciones distintas de cada muestra, de manera que podamos tener una idea de cómo afecta la granulometría a la temperatura mínima de ignición en nube dentro de una misma muestra. En la Tabla 14 se observa como se produce un aumento de la temperatura mínima de ignición en nube a medida que aumenta el tamaño de las partículas.

Tabla 14. Relación de muestras y sus distintas porciones con sus temperaturas mínimas de ignición en nube.

Tipo de madera	Masa (g)	Presión (bar)	TMI _{nube} (°C)					
			<63 μm	63-125 μm	125-250 μm	250-320 μm	320-400 μm	400-500 μm
Roble húngaro	0,5-0,8	0,5-0,6	-	420	480	520	560	-
MDF	0,5-1	0,4-0,5	460	440	480	550	580	640
Pino Soria	0,4-1	0,4-0,5	480	460	480	560	620	720
Pino insigne	0,4-1	0,4-0,5	480	480	460	520	580	620
Mezcla de roble y pino	0,5-1	0,4-0,5	-	420	460	720	-	-
Roble francés	0,5-1	0,4-0,6	440	400	460	700	-	-

En la Figura 39, se observa que todas las muestras mantienen una temperatura mínima de ignición en nube que se establece por debajo de 500 °C para las granulometrías menores (inferiores a 250 μm) y que las distintas especies no resultan claramente distinguibles entre sí, si bien las dos muestras de roble presentan inicialmente valores ligeramente más bajos que el resto.

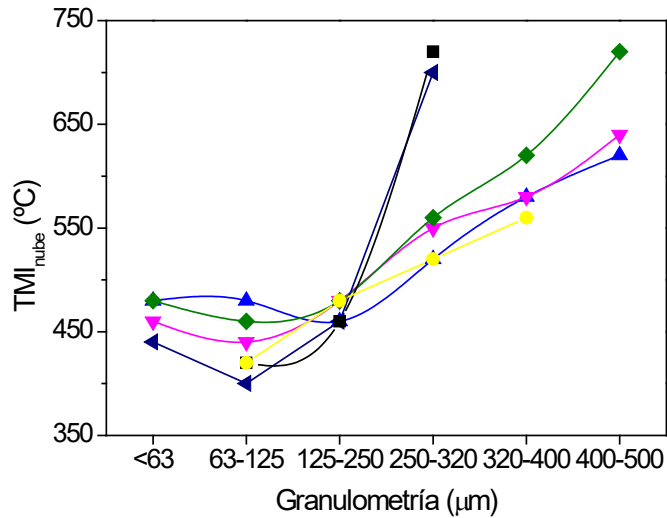


Figura 39. Relación de las distintas porciones de las muestras con su temperatura mínima de ignición en nube. Pino y roble (■), pino insigne (▲), MDF (▼), pino Soria (◆), roble francés (◄) y roble húngaro (●).

6.5 Temperatura mínima de ignición en capa

También resulta útil la determinación de la temperatura mínima de ignición en capa, TMI_{capa} , lo cual es posible empleando el equipo LIT-3 de Anko Trading Ltd, Figura 40. En este caso, el método de trabajo es similar, pero en lugar de disponer de un horno, la fuente de ignición es una placa calefactora que se calienta a una temperatura que se puede controlar y sobre la cual se deposita una capa de polvo cuyo grosor se puede variar entre ensayos. El objetivo es determinar la temperatura más baja a la que una capa de polvo de un grosor determinado es capaz de producir una llama al contacto con una superficie caliente.

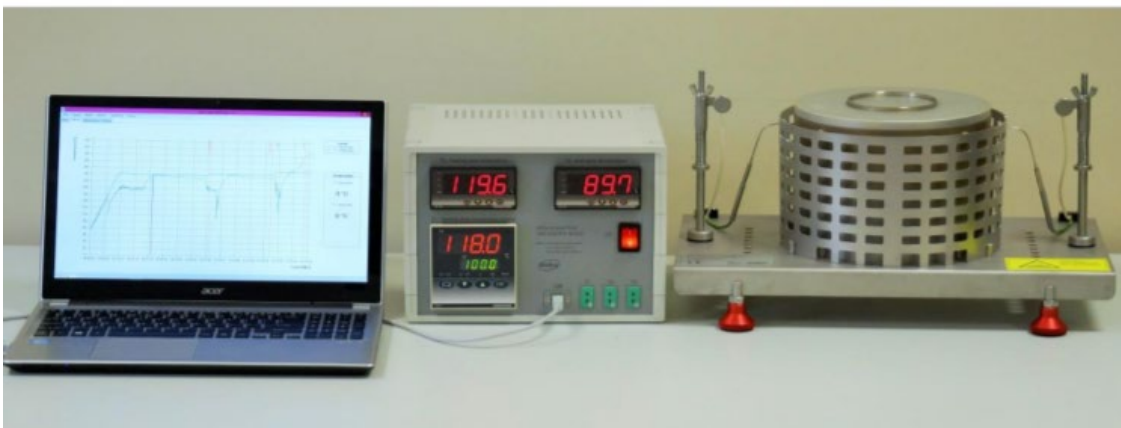


Figura 40. Equipo de medida de la temperatura mínima de ignición en capa.

6.6 Análisis termogravimétrico

Para la caracterización de las distintas muestras se emplean otras técnicas, como la Termogravimetría o análisis termogravimétrico (TGA) en la que se mide la pérdida de masa de la muestra mientras es sometida a un aumento de temperatura, en este caso desde la temperatura ambiente (en torno a 25 °C) hasta 800 °C.

Este proceso se realiza por duplicado, en un experimento se emplea una atmósfera de nitrógeno y en otro se introduce oxígeno. Para ello se emplea el equipo TGA Q50 de TA Instruments que se puede ver en la Figura 41.



Figura 41. Equipo TGA Q50 de TA Instruments para la realización de termogravimetrías.

Como norma general, en la atmósfera de oxígeno, al ser éste un oxidante más potente, los procesos de combustión se producen a temperatura más baja que en la atmósfera de nitrógeno y, del mismo modo, existen ciertas combustiones que se producen con el oxígeno que el nitrógeno no es capaz de provocar.

Los tres principales procesos que se observan tienen que ver con la pérdida de los tres compuestos más abundantes que componen la estructura de la madera. En primer lugar, se produce la combustión de la hemicelulosa, que tiene lugar entre los 250 y los 350 °C, apareciendo en ocasiones solapada con el inicio de la combustión de la celulosa que se produce a continuación, entre los 300 y los 400 °C. Esta cercanía en la temperatura a la que se producen ambos procesos, siendo la celulosa un componente más abundante, hace que en ocasiones no sea posible identificar la pérdida de la hemicelulosa o bien que se produzcan dos fases en esta, una combustión inicial y una reactivación de la misma cuando comienza la combustión de la celulosa.

Por último, a temperaturas más elevadas y habitualmente sin llegar a solaparse con los procesos anteriores, se produce la combustión de la lignina, que no suele observarse en la termogravimetría en atmósfera de nitrógeno, y que con oxígeno suele producirse en torno entre los 430 y los 500 °C.

En la Figura 42, se recoge la gráfica de una muestra de roble francés en atmósfera de oxígeno, la curva de caída representa las distintas pérdidas de masa de la muestra a medida que va aumentando la temperatura (la pérdida más pronunciada se produce entre 250 y 350 °C, coincidiendo con la combustión de la hemicelulosa y la celulosa).

Cuando se hace la derivada de la curva con el *software* de tratamiento de los datos, se observan tres picos, que corresponden con los tres puntos del análisis en el que se producen máximos de pérdida de masa. En la Figura 42 se detecta un primer pico a 280 °C correspondiente a la descomposición de la hemicelulosa, otro pico, el más grande de los tres, a 330 °C coincidente con la descomposición de la celulosa y, por último, otro en torno a 480 °C que se relaciona con la rotura de la lignina.

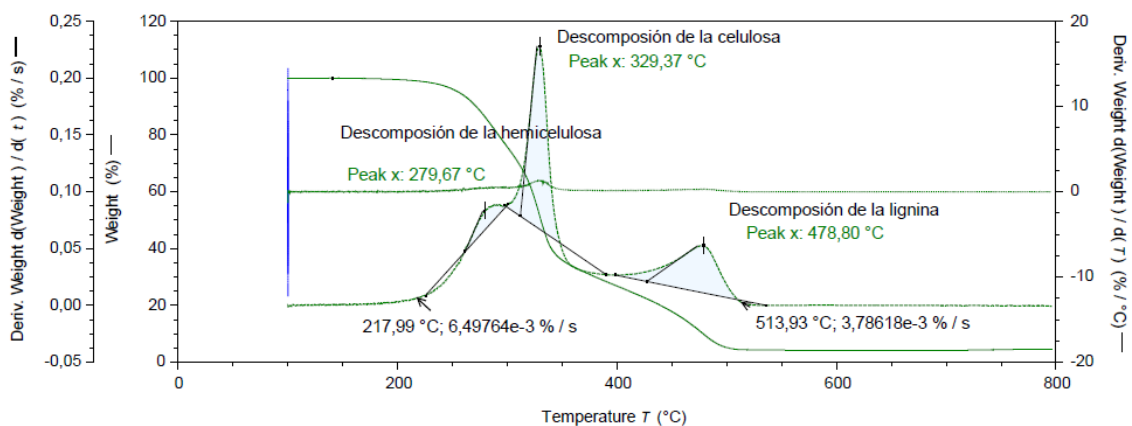


Figura 42. TGA en atmósfera de oxígeno de una muestra de roble francés.

Para la misma muestra se ha realizado el análisis en atmósfera de nitrógeno, el cual es un oxidante menos potente, por lo que los procesos de combustión de la hemicelulosa y la celulosa tienen lugar a temperaturas más elevadas, es decir, se necesita alcanzar una mayor temperatura para que en nitrógeno se inicie la combustión, Figura 43.

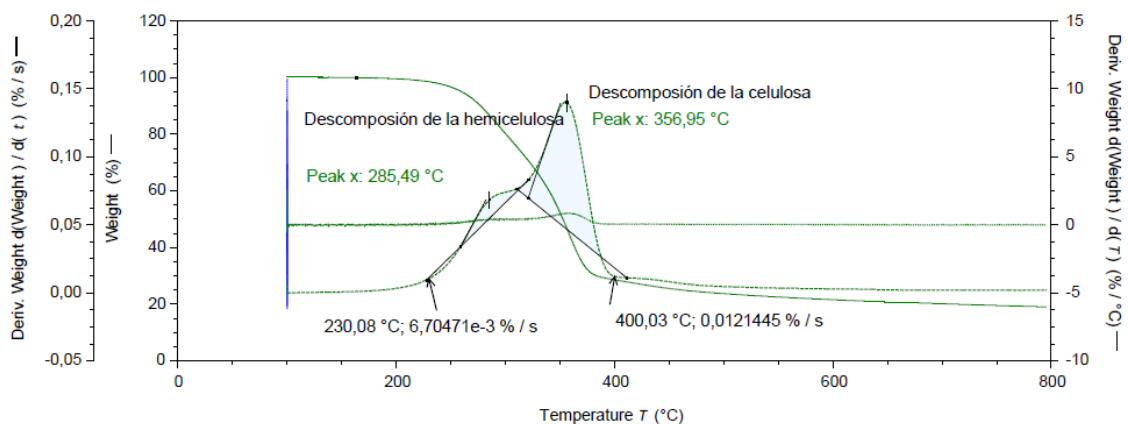


Figura 43. TGA en atmósfera de nitrógeno de una muestra de roble francés.

En la Figura 43 se observa el primer pico a 285 °C, una temperatura ligeramente más elevada que la de la descomposición de la hemicelulosa en atmósfera de oxígeno (280 °C); la descomposición de la celulosa se localiza a los 357 °C frente a los 330 °C de la atmósfera con oxígeno y por último, la pérdida de la lignina no resulta observable, bien porque tiene lugar a temperaturas muy elevadas que no recoge el ensayo o bien porque en nitrógeno no se produce esta descomposición.

6.7 Calorimetría Diferencial de Barrido

Otra de las técnicas de análisis es la Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC por sus siglas en inglés) en la que se compara el calor que absorbe o desprende la muestra de polvo de madera, introducida en una cápsula, en relación a la referencia (cápsula vacía que no contiene muestra). Este intercambio de calor se registra a medida que se va incrementando la temperatura desde la ambiental (18-20 °C) hasta 500 °C. De este modo es posible conocer los distintos procesos endotérmicos y exotérmicos que sufre el polvo de madera durante su combustión. El equipo empleado es el DSC Q200 de TA Instruments que aparece en la Figura 44.



Figura 44. Equipo DSC Q200 de TA Instruments para la realización de calorimetrías diferenciales de barrido.

Al realizarse el análisis por DSC, del mismo modo que sucedía en el análisis termogravimétrico, se observan varios picos a diferentes temperaturas que corresponden con la descomposición de los componentes de la madera.

En este caso, como la medición se realiza en términos de intercambio de calor, encontramos dos tipos de picos en el proceso, los que indican hacia arriba y suponen máximos se relacionan con procesos exotérmicos, es decir, en los que la muestra desprende energía en forma de calor y por tanto se observa un aumento de calor en el sistema. En el caso contrario, cuando los picos generan

mínimos de energía corresponden a procesos endotérmicos, en los que la muestra absorbe calor del medio.

Para la realización de este análisis el flujo de gas empleado corresponde con una atmósfera de nitrógeno.

En la mayor parte de las muestras analizadas se observa un primer pico entre 300 y 350 °C que da lugar a un máximo de calor, por lo que correspondería a un proceso exotérmico y que se asocia al proceso de combustión de la hemicelulosa. A continuación, entre 350 y 400 °C se produce un mínimo de calor, que se asocia a un proceso endotérmico y se relaciona con la combustión de la celulosa, que toma calor del medio para producirse. Por último, se vuelve a encontrar un máximo entre 425 y 475 °C, es decir, un nuevo proceso exotérmico que se relaciona con la combustión de la lignina.

Se observa también un mínimo muy pronunciado en torno a 100 °C que no se tiene en cuenta como parte del proceso de combustión ya que corresponde con la pérdida de agua de la muestra, que se produce al inicio del calentamiento y se trata de un proceso endotérmico, ya que requiere del calor del medio para que la deshidratación se produzca.

En la Figura 45 se muestra el análisis por DSC correspondiente a polvo de madera de pino Soria.

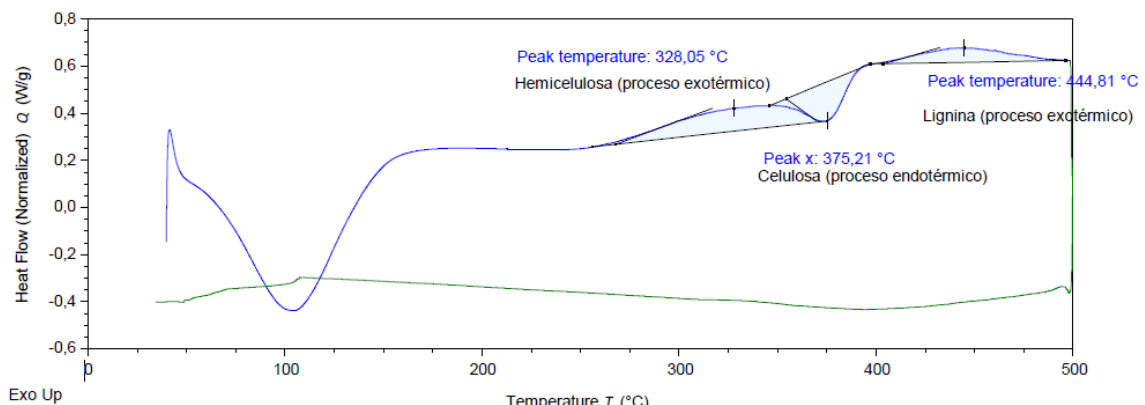


Figura 45. DSC de una muestra de Pino Soria.

En esta muestra se observa un proceso exotérmico que alcanza su máximo en torno a 328 °C, coincidente con la descomposición de la hemicelulosa; a 375 °C se detecta una caída o pérdida de calor correspondiente al proceso endotérmico de pérdida de la celulosa. Por último, a 445 °C se produce el proceso exotérmico de descomposición de la lignina.

A continuación, se muestra el análisis de una muestra de roble francés, Figura 46, en la cual los picos aparecen a temperaturas ligeramente más bajas que en el caso anterior, pero dentro de un rango fijo que permite identificar los procesos de descomposición.

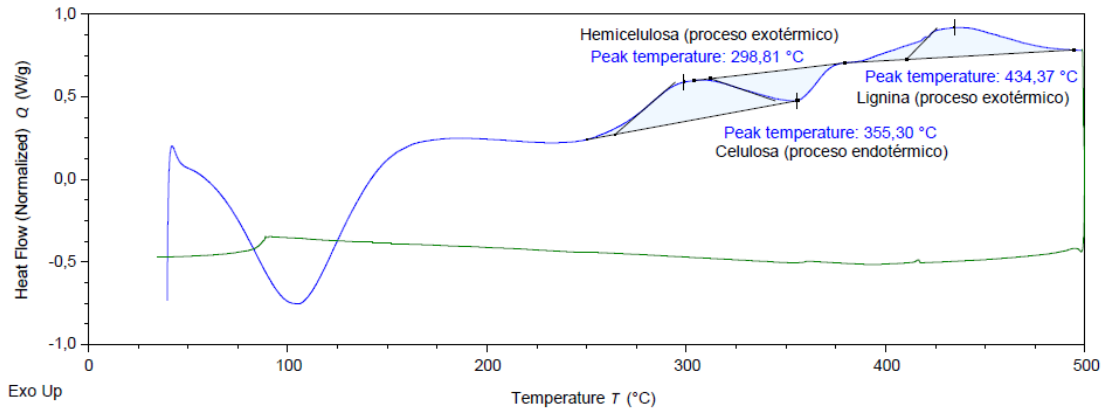


Figura 46. DSC de una muestra de roble francés.

6.8 Microscopía Electrónica de Barrido

Para conocer la forma de la partículas se lleva a cabo la Microscopía Electrónica de Barrido (también llamada MEB o SEM por sus siglas en inglés) que consiste en la toma de imágenes de gran resolución gracias a la incidencia de un rayo láser sobre las muestras. Para que estas muestras puedan formar una imagen tras la proyección del láser es necesario que sean conductoras, en caso de no serlo por sí mismas, como con el polvo de madera, se deposita una fina capa de un metal conductor (oro), proceso que puede verse en la Figura 47 A y que se realiza con el equipo Emitech 500. Para proceder al análisis, una pequeña cantidad de muestra se deposita, con ayuda de cinta de doble cara, sobre los portamuestras metálicos en la Figura 47 B.

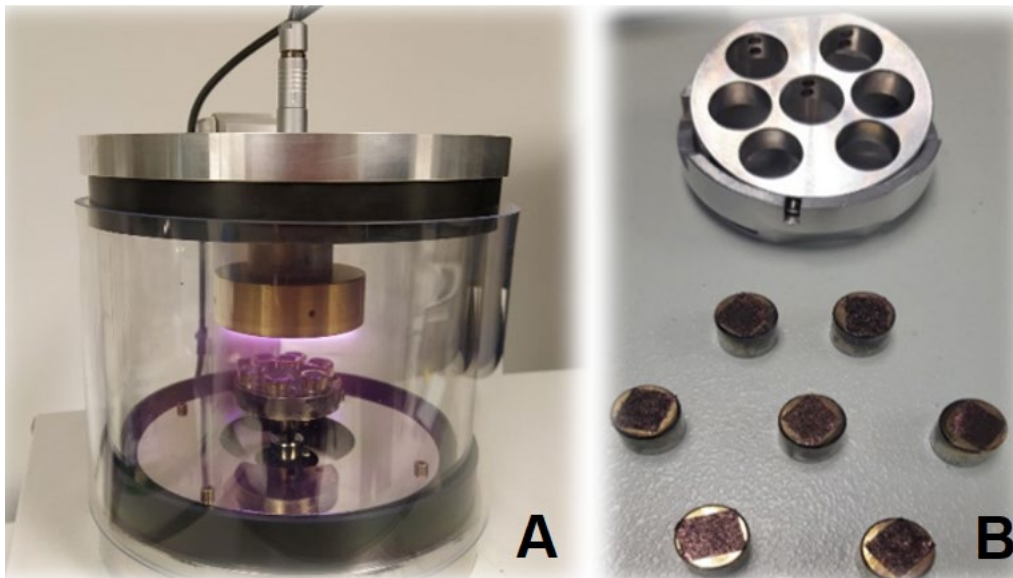


Figura 47. A – Equipo para depositar oro sobre las muestras. B – Portamuestras con oro depositado preparadas para el análisis por MEB.

Tras ser recubiertas por una fina capa de oro, las muestras son introducidas en el microscopio electrónico y se van observando de manera individual haciendo

posible alcanzar una ampliación de 10.000 aumentos y tomar medidas de la imagen ampliada para conocer las dimensiones de las partículas observadas.

El equipo empleado es el Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM-6460LV, situado de las instalaciones del parque científico-tecnológico de la Universidad de Burgos, Figura 48.

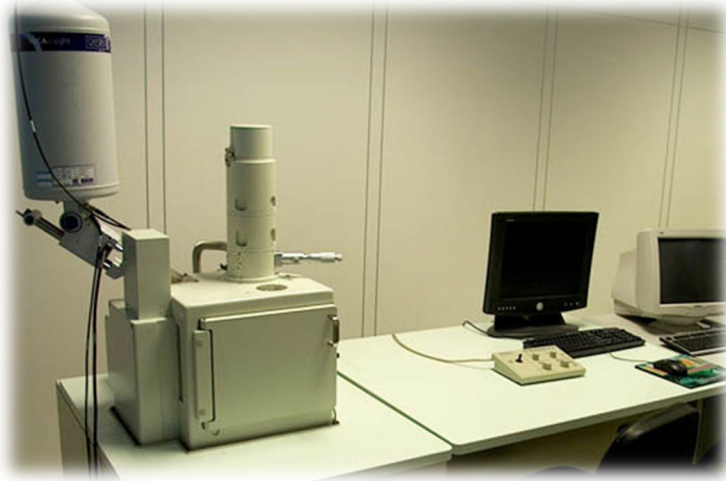


Figura 48. Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6460LV. Fuente: página web de la Universidad de Burgos.

Este microscopio electrónico de barrido utiliza un haz de electrones para formar una imagen de alta resolución, de manera que es posible observar con detalle la morfología de las partículas y medir su tamaño.

Cuando las muestras son introducidas en el microscopio electrónico se realiza un barrido con electrones que son acelerados a través del cañón, en lugar del haz de luz que emplean los microscopios clásicos. El detector del equipo es capaz de recoger y medir los electrones generados en la interacción con la superficie de la muestra, consiguiendo así formar una imagen en la que se observen las características superficiales, pudiendo diferenciar la forma, textura, estructuras, etc., de cada tipo de polvo de madera analizado.

Se ha realizado esta prueba tanto para las muestras sin tamizar como para distintas fracciones tamizadas, de modo que se pueda observar la variación de la forma de las partículas a medida que el tamaño disminuye. Además, se van a comparar muestras de partículas antes y después de producirse la explosión, de manera que podamos conocer cómo se modifica la estructura y la forma de las partículas.

Al observar la estructura de las muestras se puede apreciar que presentan una red de canales alargados, que corresponden a los caminos por los que se desplaza de savia que alimenta al tronco de madera, a su vez, existen también pequeños agujeros laterales que conectan los canales – llamados vasos leñosos – y que aparecen con claridad en las distintas muestras observadas. Tales como los de la imagen correspondiente a una muestra de pino Soria, Figura 49.

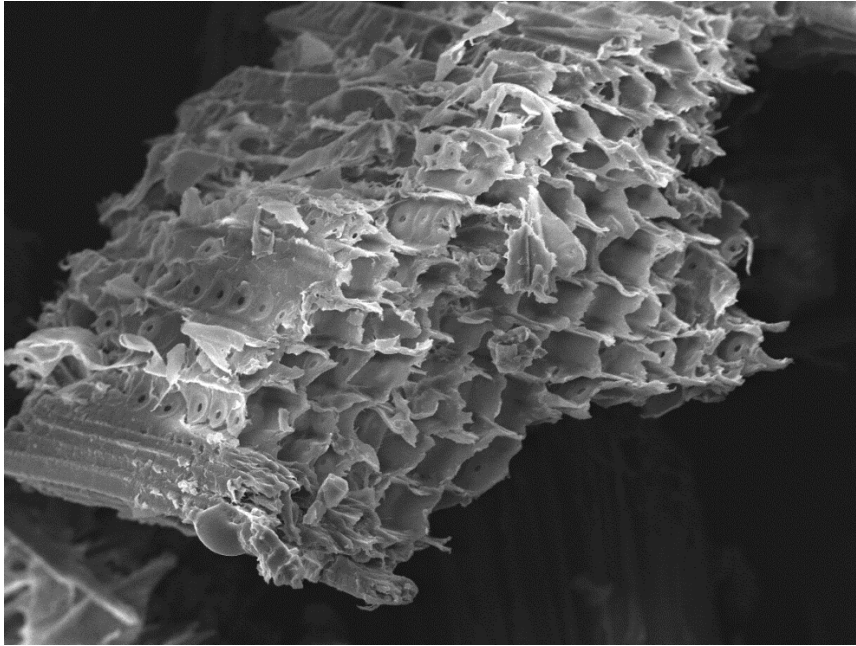


Figura 49. Fotografía tomada por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de una muestra de pino Soria original sin tamizar (x200 aumentos).

Al observar la forma de las partículas destaca que éstas presentan forma alargada cuando tienen tamaño más grande y se van redondeando a medida que se rompe su estructura y se van haciendo más pequeñas (por debajo de 125 μm), algo que se puede observar en la Figura 50. Ambas fotografías retratan porciones de la misma muestra de pino insigne con los mismos aumentos (x30), la Figura 50 A se trata de las partículas de menos de 125 μm , mientras que la Figura 50 B corresponde a un rango de mayor tamaño (> 250 μm).

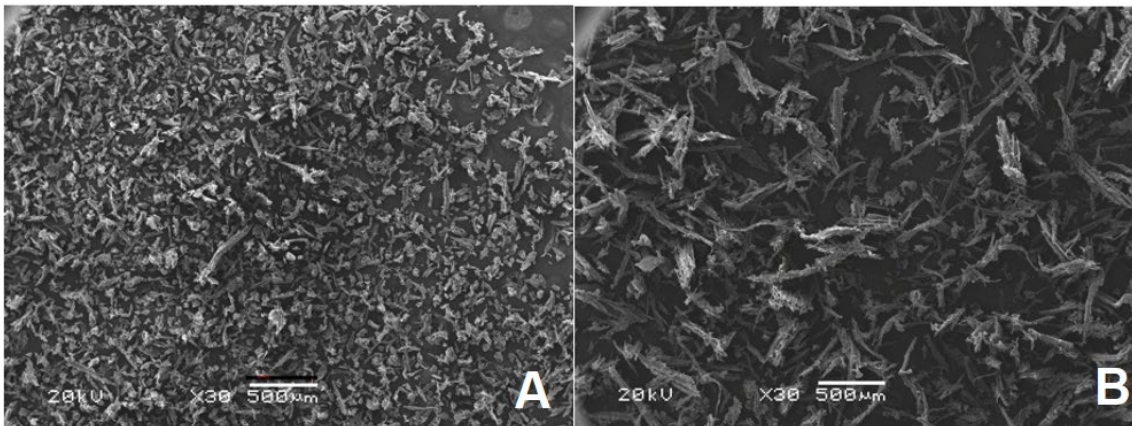


Figura 50. Fotografías tomada por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de una muestra de pino insigne. A – Porción de la muestra con tamaño de partícula menor de 125 μm (x30 aumentos). B – Misma muestra, porción mayor de 250 μm (x30 aumentos).

Esta forma de las partículas, que van perdiendo su estructura a medida que sus canales se rompen y/o aplastan, también es fácilmente apreciable en las muestras procedentes de otros tipos de madera. En la Figura 51 se muestra polvo de madera de roble francés en la porción de partículas menor de 125 μm .

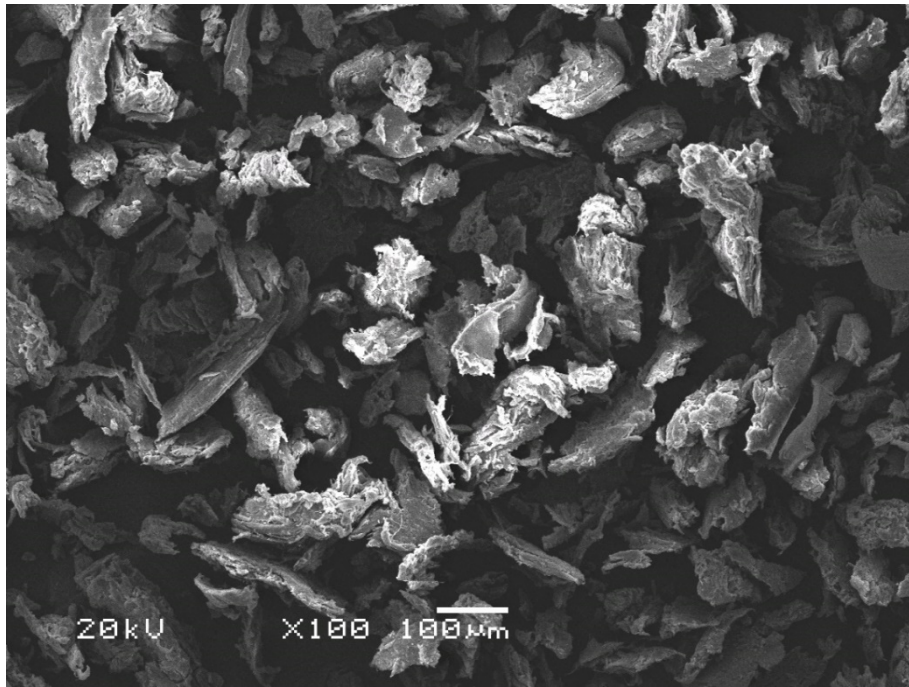


Figura 51. Fotografía tomada por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de una muestra de roble francés en la porción inferior a 125 µm (x100 aumentos).

Las partículas presentan estructuras acanaladas fácilmente observables en las porciones de mayor tamaño de partícula. Estos canales son regulares en forma y tamaño y se observan en todas las muestras, con mayor o menor facilidad según como haya sido el corte de la misma. La Figura 52 corresponde con fotografías de una muestra de pino Soria sin haber sido tamizada en la que se observa la estructura de canales.

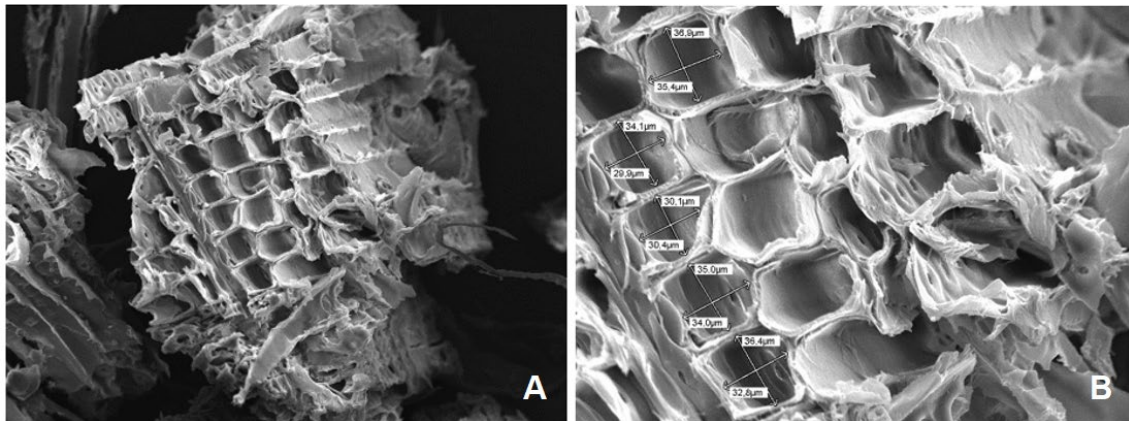


Figura 52. Fotografía tomada por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de una muestra de pino Soria original sin tamizar. A – Vista frontal de los canales (x200 aumentos). B – Vista ampliada con medidas de los canales (x500 aumentos).

En cuanto a otras muestras, si el corte se ha producido de manera longitudinal, las celdas o canales no se observan con tanta nitidez pero es posible reconocer la estructura. Las dos fotografías que se observan en la Figura 53 se corresponden a muestras distintas, ambas de pino insigne.

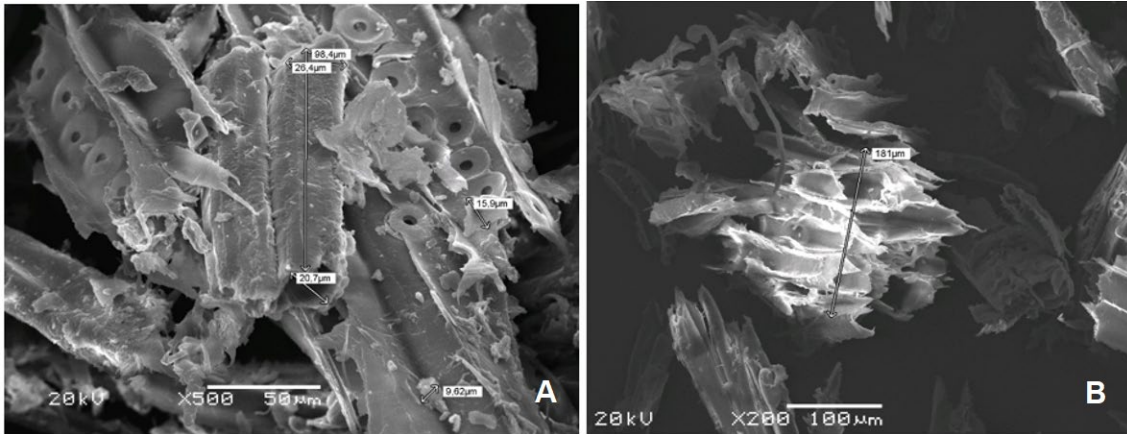


Figura 53. Fotografías tomadas por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de muestras de pino insigne originales sin tamizar. A – Vista frontal de los canales y vasos leñosos (x500 aumentos). B – Vista lateral de los canales (x200 aumentos).

Esta estructura aparece en las muestras con un tamaño de partícula más grande, ya que, a medida que el tamaño disminuye, los canales se van deformando y destruyendo hasta que desaparecen.

Una vez conocida la estructura tipo que presentan las muestras, se comparan dos muestras tamizadas de las que se ha tomado la misma porción o rango de tamaños, cada una de ellas corresponde a uno de los dos grupos que hemos establecido, Figura 54. Las del Grupo 1 que proceden directamente del corte en el proceso de transformación y las del Grupo 2, que se han recogido tras haberse producido otras operaciones además del corte o bien se encontraban en los conductos de aspiración o como polvo depositado.

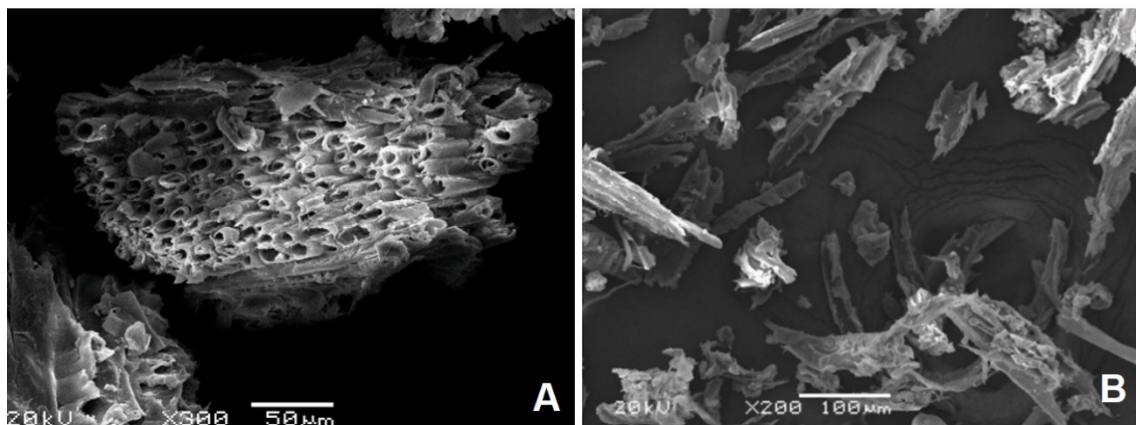


Figura 54. Fotografías tomadas por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de dos muestras distintas, ambas con tamaño de partícula entre 125-250 μm. A – muestra de roble y pino del Grupo 1 (x300 aumentos). B – Muestra de pino insigne del Grupo 2 (x200 aumentos).

En la Figura 54 se observa una diferencia estructural entre las dos muestras, a pesar de que pertenecen a un mismo rango granulométrico (125-250 μm). Las partículas de la muestra del Grupo 1 tienen una organización estructural bien definida, ya que su pequeño tamaño se debe únicamente a que se tratan de partículas más pequeñas que se han generado durante el proceso de corte, Figura 54 A. Sin embargo, las partículas correspondientes al Grupo 2 presentan

una estructura mucho menos reconocible, algunas partículas son redondeadas, otras alargadas con los canales rotos, otras se encuentran apelmazadas como si hubieran sido aplastadas, Figura 54 B. Esto es debido a que estas partículas de tamaño pequeño, que son mucho más numerosas, proceden de partículas de mayor tamaño que se han ido rompiendo.

Del mismo modo, se ha comprobado cómo cambia la forma y estructura de las partículas cuando se produce la explosión, Figura 55, en la que se ve cómo los canales se rompen y se abren por completo una vez explotada la muestra.

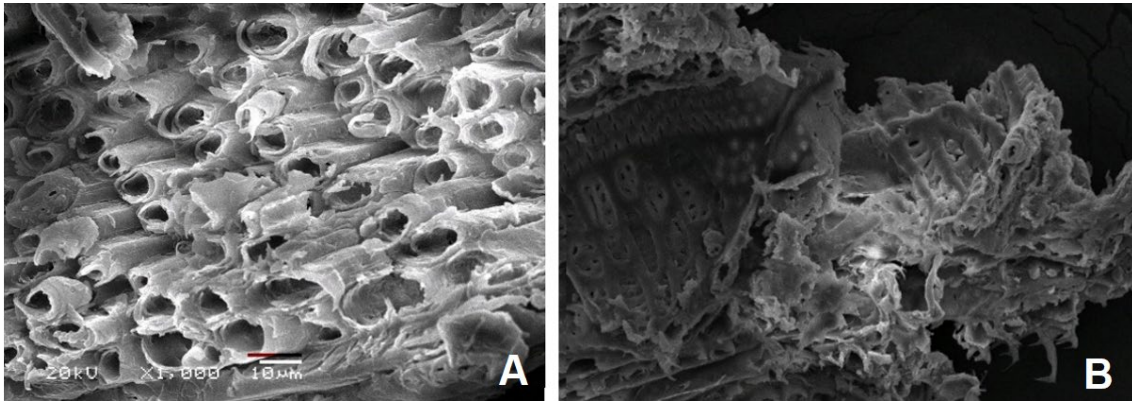


Figura 55. Fotografías tomadas por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de una muestra de roble y pino con tamaño de partícula entre 125-250 μm . A – Muestra antes de la explosión (x1.000 aumentos). B – Misma muestra después de la explosión (x300 aumentos).

Cuando la muestra se recoge después de haber explotado, algunas de las partículas siguen presentando la estructura que era predominante antes de la ignición, pero otras, las que han formado parte, de manera directa del proceso de combustión, presentan los canales rotos y la estructura abierta, Imagen 55 B.

Esta rotura de la estructura con la explosión explicaría la relación entre el tamaño de las partículas y su peligrosidad. Cuanto mayor es la granulometría y más estructurada están las muestras, mayor energía es necesaria para que se produzca la reacción

Sin embargo, en las partículas de menor tamaño, cuyos canales se encuentran rotos o aplastados, al encontrarse “abiertas” tras romperse su estructura presentan una mayor relación superficie/masa, de manera que el área que tienen disponible para establecer contacto con la fuente de ignición, o bien, para transmitir la llama procedente de otras partículas es mayor en relación a su masa que en las partículas de tamaño grande y estructura definida. Este hecho explica la mayor peligrosidad en la generación de atmósferas explosivas de las muestras con menores granulometrías.

6.9 Espectroscopía de Infrarrojos

La espectroscopia de reflectancia total atenuada con transformada de Fourier (ATR-FTIR) es una técnica que permite medir los espectros infrarrojo de sólidos y líquidos.

Los análisis por esta técnica se realizaron empleando un espectrofotómetro con Transformada de Fourier JASCO FT-IR 4200, localizado en el laboratorio instrumental del Área de Química Inorgánica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Burgos (UBU), con un accesorio ATR PRO ONE Single-reflection14, con cristal de diamante PKS-DIF, para medir así la reflectancia total atenuada. Con dicho espectrofotómetro es posible realizar un barrido entre 4.000 y 400 cm^{-1} .

Para las muestras de polvo de madera se obtiene un espectro como el recogido en la Figura 56 perteneciente a un muestra de pino insigne, en el que se identifican los picos correspondientes a diferentes compuestos propios de la madera que aparecen recogidos en bibliografía. (Emandi et al., 2011)

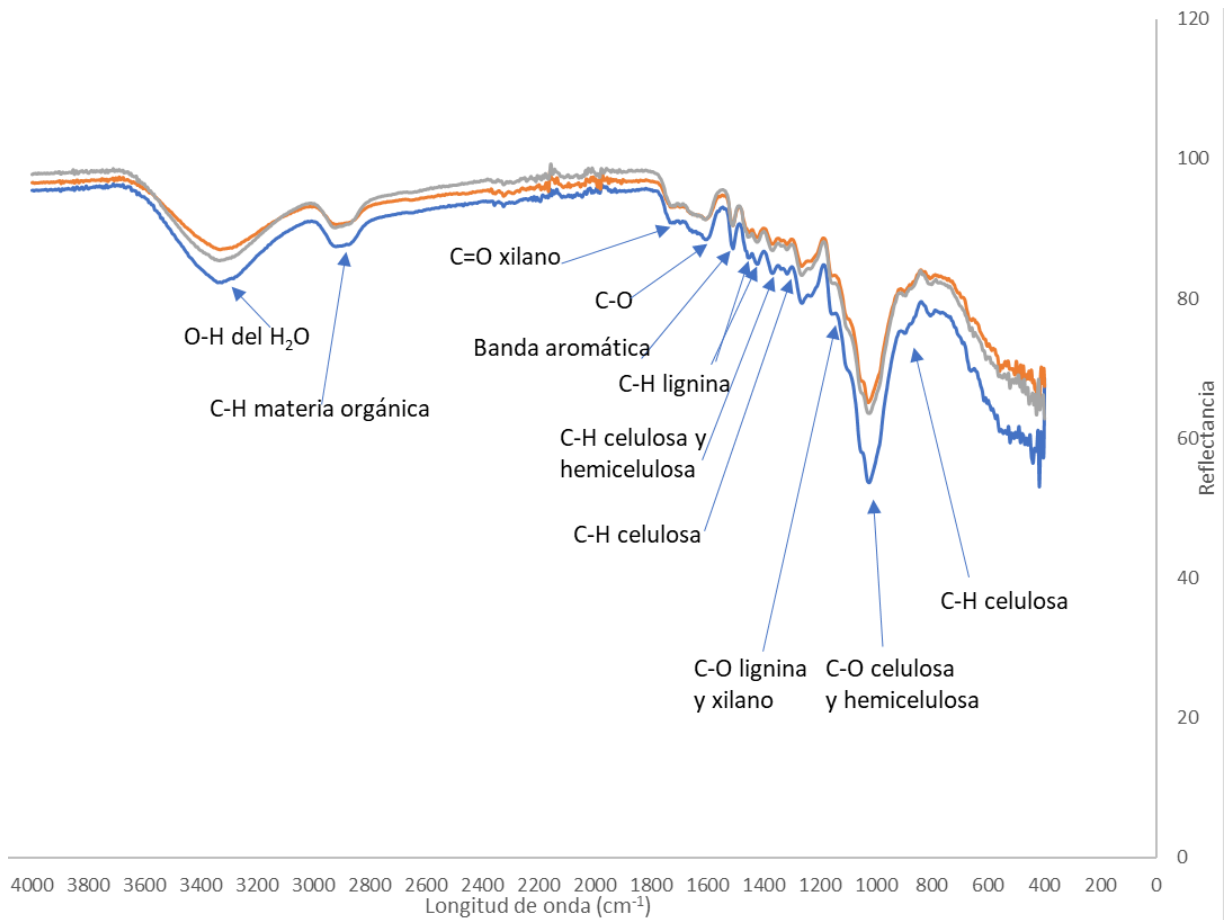


Figura 56. Espectro de FT-IR para una muestra de pino insigne e identificación de su picos de vibración característicos.

En la Figura 56 se detectan los distintos componentes de la madera, como son la lignina que aparece como dos picos distintos por las vibraciones de sus enlaces C-H entre 1.450 y 1.400 cm^{-1} y otro correspondiente a la vibración del C-O en torno a 1.150 cm^{-1} . Lo mismo sucede con la celulosa con picos correspondientes a los enlaces C-H en torno a 1.370 cm^{-1} junto a la hemicelulosa, otro pico en 1.320 cm^{-1} y otro más en torno a 900 cm^{-1} . Los enlaces C-O tanto de celulosa como de hemicelulosa se registran como un gran pico en torno a 1.030 cm^{-1} .

6.10 Toma de fotografías

Además de los diferentes ensayos para la determinación de las características físicas y químicas del polvo de madera y de la microscopía electrónica para conocer las muestras a nivel estructural, también se ha llevado a cabo la toma de imágenes para conocer más a fondo las características del proceso.

6.10.1 Cámara termográfica

Se ha empleado una cámara termográfica FLIR E75 con la que se mide la temperatura de trabajo, tanto la alcanzada por la resistencia cuando se encuentra incandescente (441 °C), como la temperatura de la llama cuando se produce la ignición (en torno a 160 °C), Figura 57. Si bien, resulta complicado precisar con exactitud la temperatura alcanzada por la resistencia ya que la sección del alambre es muy pequeña, de modo que la superficie de medida se reduce, dificultando la medición.

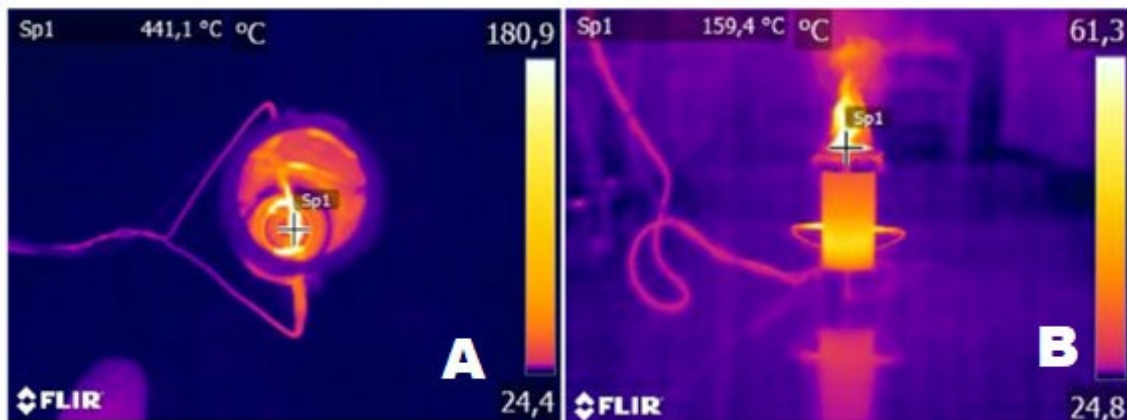


Figura 57. Imágenes de la cámara termográfica. A – Medición de la temperatura alcanzada por la resistencia eléctrica. B – Medición de la temperatura de la llama generada en la combustión.

6.10.2 Cámara lenta

Igualmente, para obtener más información acerca del proceso de explosión de las muestras, se emplea una cámara lenta recogiendo 180 *frames* por segundo (fps), con la intención de analizar qué sucede desde el inicio de la dispersión de las partículas en el tubo de combustión hasta que finaliza la explosión.

De esta manera se observa que el proceso sucede del modo siguiente: se produce la dispersión de la muestra (Figura 58 A), estas partículas de polvo en suspensión entran en contacto con la fuente de ignición y tiene lugar la generación de una llama inicial que produce una primera explosión, (Figuras 58 B y C). Cuando esta termina, las partículas de polvo dispersadas caen por acción de la gravedad (tanto las que han explotado como las que no). Durante esta caída, pueden entrar de nuevo en contacto con la resistencia eléctrica incandescente, de manera que si la cantidad de muestra que se dispersa en la caída es suficiente (Figura 58 D) se produce una nueva explosión igual o incluso más vigorosa que la primera (Figura 58 E). El proceso completo de explosión dura 1.051 ms.

Esta segunda explosión encuentra su explicación en dos hechos fundamentales, las partículas que participan en la segunda explosión han estado en contacto con la resistencia, por lo que la temperatura inicial de la muestra ha crecido y habrá perdido humedad en caso de tenerla. Por otro lado, tal y como se observó en la Microscopía Electrónica de Barrido, las muestras ya explotadas pierden su estructura, haciéndose más pequeñas y pareciéndose más a las partículas más peligrosas del Grupo 2, debido al aumento de su relación superficie/masa, que facilita su puesta en contacto con la fuente de ignición.

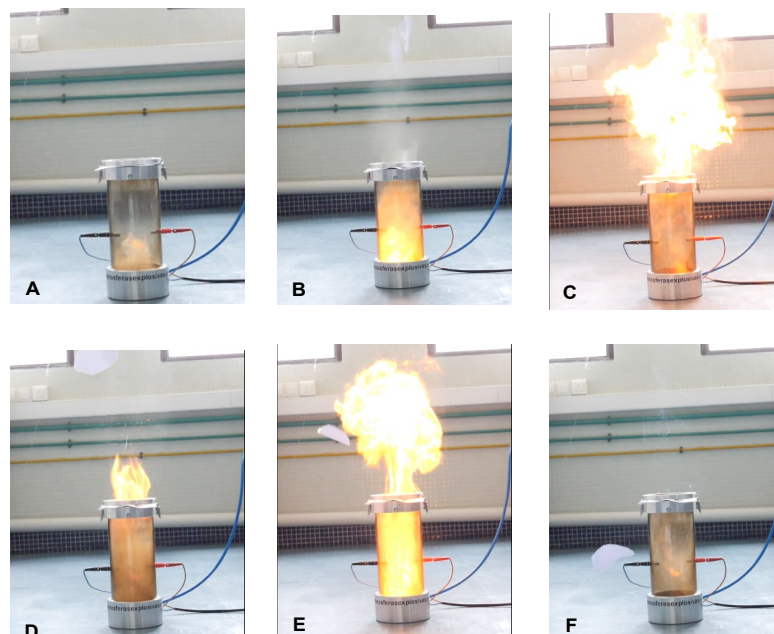


Figura 58. Fotografías de los distintos momentos de la explosión: A – 40,3 ms, máxima dispersión previa a la ignición; B – 257 ms, ignición previa a la primera explosión; C – 284 ms, instante de máxima virulencia de la primera explosión; D – 766 ms, máxima dispersión previa a la segunda explosión; E – 791 ms, instante de máxima virulencia de la segunda explosión; F – 1.051 ms, final del proceso.

7. APÉNDICE

Tabla 15. Datos bibliográficos de los parámetros de explosividad de diferentes muestras de polvo de madera.

TIPO DE POLVO	Tamaño partícula (µm)	Humedad (%)	TMI _{capa} (°C)	TMI _{nube} (°C)	CME (g/m ³)	K _{máx} (bar·m /s)	P _{máx} (bar·g)	MIE (mJ)	Aparato medida MIE	Explosividad
Madera ^a	<10	-	280	330	125	113	8,6	>1000	-	-
Pulpa de madera ^a	20	-	325	480	30	107	9,1	>1000	-	-
Madera de peral ^a	27	-	300	400	30	205	10,5	-	-	-
Polvo de madera ^b	33	-	500				100	-	20 L Vessel	-
Madera de aglomerado ^c	43	-	320	490	60	102	9,2	-	20 L Vessel	-
Depósito de polvo de madera de aglomerado ^d	43	-	320	490	60	102	9,2	-	-	St1
Polvo de madera de aglomerado ^b	43	-		490	60	102	9,2	-	20 L Vessel	St1
Astillas/polvo de madera ^d	<63	1,8	-	-	30	144	8,9	-	-	St1
Residuo madera conglomerado ^a	61	-	320	490	30	156	9,2	-	-	-
Depósito de polvo de haya de aserrado ^d	69	7,9	320	-	30	86	7,2	-	-	St1
Separador de polvo y pulpa de madera ^d	76	3,5	-	-	60	53	7,2	30/100	-	-
Polvo de madera ^b	80	-	480	-	-	-	7	-	20 L Vessel	-
Depósitos de polvo de madera de aserrado ^d	83	8,6	330	410	20	63	7,4	30/100	-	St1
	145	12,2	330	430	20	36	6,7	300/1000	-	St1
Polvo molido de haya/madera tropical (95:5) ^d	145	-	320	490	60	56	8,1	-	-	St1
Depósitos de polvo de madera de aserrado ^d	378	18,9	350	430	60	12	6	>1000	-	St1
Depósito de polvo de pino/abeto de aserrado ^d	618	17,8	350	410	250	12	5,9	>1000	-	St1

^a (De Gea, 2007)

^b (Eckhoff, 2003)

^c (Hurley, 2016)

^d GESTIS-DUST-EX [base de datos]

8. GLOSARIO DE DEFINICIONES

1. **Área de explosión:** lugar dentro de la curva límite formada por los límites de explosión de una sustancia inflamable en las diversas mezclas con aire y gas inerte.
2. **Atmósfera explosiva:** mezcla con aire, en condiciones atmosféricas, de sustancias inflamables en forma de gases, vapores, nieblas o polvos, en los cuales, después de que se produce la ignición, la combustión se extiende a toda la mezcla no quemada. (UNE-EN 14034-1:2004+A1:2011)
3. **Deflagración:** explosión que se propaga a una velocidad subsónica. (ISO 8421-1:1987)
4. **Explosión:** reacción brusca de oxidación o descomposición que produce un aumento de la temperatura, de la presión o de ambos simultáneamente. (ISO 8421-1:1987)
5. **Ignición:** propagación de una llama lejos del lugar de la fuente de ignición.
6. **Inertizar:** reemplazar el oxígeno atmosférico en un sistema por un gas o polvo, no reactivo o no inflamable, para que la atmósfera dentro del sistema no pueda propagar la llama (CEN/TR 15281:2006)
7. **Límites de explosión:**
 - Límite inferior de explosión (LIE): es el valor mínimo en el rango de explosión al que puede suceder una explosión. (UNE-EN 1839:2017; UNE-EN 14034-3:2011).
 - Límite superior de explosión (LSE): es el valor máximo en el rango de explosión al que puede suceder una explosión. (UNE-EN 1839:2017; UNE-EN 14034-3:2011).
8. **Peligro de ignición:** existencia de una fuente potencial de ignición que es capaz de encender una atmósfera explosiva. (UNE- EN 15198:2008)
9. **Polvo:** conjunto de pequeñas partículas sólidas en la atmósfera que se depositan por la acción de su propio peso, pero que pueden permanecer en suspensión en el aire durante algún tiempo. (UNE-EN 14034-1:2011)
10. **Polvo combustible o inflamable:** polvo capaz de experimentar una reacción exotérmica con el aire cuando se produce una ignición. (UNE-EN 14034-1:2011)

- 11. Sustancia combustible o inflamable:** sustancia en forma de gas, vapor, líquido, sólido o mezcla de ellas capaz de producir una reacción exotérmica con el aire cuando se produce la ignición.
- 12. Velocidad de llama:** velocidad de un frente de llama con respecto a un punto de referencia fijo. (UNE-EN 15089:2010)

9. BIBLIOGRAFÍA

Referencias

- Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2007). *Dust explosions - Cases, causes, consequences, and control*. Journal of Hazardous Materials, 140 (1-2), 7-44. doi:[10.1016/j.jhazmat.2006.11.007](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.11.007)
- Centro Tecnológico del Mármol y la Piedra (2010). *El polvo de madera: Riesgo laboral y su prevención*. Madrid.
- Amyotte, P. R. (2006). *Solid inertants and their use in dust explosion prevention and mitigation*. Journal Loss Prev. Process Ind., 19, 161–173.
- Amyotte, P. R. (2014). *Some myths and realities about dust explosions*. Process Safety and Environmental Protection, 92(4), 292-299. doi:[10.1016/j.psep.2014.02.013](https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.02.013)
- Amyotte, P. R., Cloney, C. T., Khan, F. I., & Ripley, R. C. (2012). *Dust explosion risk moderation for flocculent dusts*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 25(5), 862-869. doi:[10.1016/j.jlp.2012.05.007](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.05.007)
- Babrauskas, V. (2002). *Ignition of Wood: A Review of the State of the Art*. Journal of Fire Protection Engineering 12, 163-189. doi:[10.1177/10423910260620482](https://doi.org/10.1177/10423910260620482)
- Back III, G. G., Beyler, C. L., & Hansen, R. (2000). *A quasi-steady-state model for predicting fire suppression in spaces protected by water mist systems*. Fire Safety Journal, 35, 327-362.
- Bartlett, A. I., Hadden, R. M., & Bisby, L. A. (2019). *A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction*. Fire Technology, 55(1), 1-49. doi:[10.1007/s10694-018-0787-y](https://doi.org/10.1007/s10694-018-0787-y)
- Bu, Y. J., Li, C., Amyotte, P., Yuan, W. B., Yuan, C. M., & Li, G. (2020). *Moderation of Al dust explosions by micro- and nano-sized AL(2)O(3) powder*. Journal of Hazardous Materials, 381, doi:[10.1016/j.jhazmat.2019.120968](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120968)
- Burmadera*. (2016) BURMADERA. <http://burmadera.org/>
- Cashdollar, K. L. (2000). *Overview of dust explosibility characteristics*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 13(3-5), 183-199. doi:[10.1016/s0950-4230\(99\)00039-x](https://doi.org/10.1016/s0950-4230(99)00039-x)
- Castelló, P., Piedrabuena, A., Ferreras, A., García, C., Murcia, J., Corrales G, J. M., Rodrigo, J. (2009). *ERGOMAD. Manual de Ergonomía para Máquinas del Sector de Transformados de Madera*. Valencia.
- CBS. (2006). *Investigation Report: Combustible Dust Hazard Study*.

- Chen, X. F., Zhang, H. M., Chen, X., Liu, X. Y., Niu, Y., Zhang, Y., & Yuan, B. H. (2017). *Effect of dust explosion suppression by sodium bicarbonate with different granulometric distribution*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 49, 905-911. doi:[10.1016/j.jlp.2017.02.012](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.02.012)
- Cloney, C., & Snoeys, J. (2019). *Chapter three. Dust explosions: A serious concern*. In P. Amyotte & F. Khan (Eds.), *Methods in chemical process safety. Dust explosions (Vol. 3)*: Academic Press.
- Dastidar, A. G. (2019). *Chapter four. Dust explosions: Test methods*. In P. Amyotte & F. Khan (Eds.), *Methods in chemical process safety. Dust explosions (Vol. 3)*: Academic Press.
- De Gea, X. (2007). *Capítulo 1: Parámetros de seguridad de las sustancias sólidas. Prevención y protección en explosiones en instalaciones industriales*. Fremap.
- De la Mata, J. (2011). *Influencia de la humedad de la madera en la evaluación de las propiedades mecánicas del pino silvestre mediante técnicas no destructivas*. (Ingeniería de Montes). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Di Blasi, C. (1993). *Modeling and simulation of combustion processes of charring and non-charring solid fuels*. Progress in Energy and Combustion Science, 19(1), 71-104. doi:[10.1016/0360-1285\(93\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0360-1285(93)90022-7)
- Díaz J. (8 de septiembre de 2016) *Fallece un trabajador de 59 años tras una explosión en la empresa Forjater de Torrelavega*. Cadena Ser https://cadenaser.com/emisora/2016/09/08/ser_torrelavega/1473362866_434275.html
- Díaz, L., & Acuña, L. (2000). *La empresa forestal en Castilla y León: caracterización y aspectos estructurales*. 7.º Congreso de Economía Regional de Castilla y León: comunicaciones. Soria.
- Dudarski, G., Kowal, M., & Czestochowki, C. (2015). *Dust explosion hazard in wood processing*. Forestry and Wood Technology N° 90, 61-65.
- Eckhoff, R. K. (2003). *Dust explosions in the Process Industries*. United States of America: Elsevier Science.
- Eckhoff, R. K. (2019). *Dust explosions: Fundamentals*. In P. R. Amyotte & F. I. Khan (Eds.), *Methods in Chemical Process Safety. Dust explosions. (Vol. 3)*: Academic Press.
- Emandi, A., Vasiliu, C. I., Budrugaec, P., & Stamatina, I. (2011). *Quantitative investigation of wood composition by integrated FT-IR and thermogravimetric methods*. Cellulose Chemistry and Technology, 45(9-10), 579-584.

- Fernández, C., García-Torrent, J., & Vega, Á. (2003). *Breve guía sobre productos e instalaciones en atmósferas explosivas*. Recuperado el 3 de marzo de 2022, de https://www.guemisa.com/articulos/Breve_guia_ATEX.pdf
- FICA-UGT. (2017). *Presente y futuro de la industria de la madera y el mueble en Castilla y León*. Valladolid. Recuperado el 3 de marzo de 2022, de <https://fafecyl.jcyl.es/web/jcyl/FundacionEmpleo/es/Plantilla100Detalle/1284791901538/Publicacion/1284791915454/Redaccion>
- García-Torrent, J., Querol, E., & Medic, L. (2008). *Zonas clasificadas ATEX por la presencia de polvo inflamable. Elementos para definir su extensión*. Revista de Ingeniería Química, 457, 88-101.
- García-Torrent, J. (2003). *Seguridad industrial en atmósferas explosivas* (L. O. Madariaga Ed.).
- GESTIS-DUST-EX. Database Combustion and explosion characteristics of dusts [base de datos] Recuperado el 3 de marzo de 2022, de <https://staubex.ifa.dguv.de/?lang=e>
- Guindeo, A. (1994). *La madera como materia prima y su transformación industrial*. Revista de AITIMA asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera, 43-50.
- Herrero, M. (2007). *Metodología para la Clasificación de Zonas con Riesgo de Incendio y Explosión debido a polvo combustible*. Valladolid: Consejería de Economía y Empleo. Dirección General de Trabajo y Prevención de Riesgos Laborales. Junta de Castilla y León.
- Hoyuelos, F.J., Santamaría-Herrera A. & Casado C. (2022) *Guía práctica ATEX Madera*. Universidad de Burgos. doi: [10.36443/9788418465215](https://doi.org/10.36443/9788418465215)
- Hurley, M. (2016). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Springer.
- Instituto Nacional de Estadística (3 de marzo, 2022). *Empresas por CCAA, actividad principal (grupos CNAE 2009) y estrato de asalariados*. Recuperado de <https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=39372#!tabs-grafico>
- Jespen, T. (2016). *ATEX-Explosive Atmospheres: Risk Assessment, Control and Compliance*. Springer.
- Junta de Andalucía (2013). *Guía de buenas prácticas de lucha contra el ruido en la industria de la madera*. Recuperado el 3 de marzo de 2022, de <https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/Gu%C3%ADa%20de%20buenas%20practicas%20contra%20el%20ruido%20en%20la%20industria%20de%20la%20madera.pdf>

- Junta de Castilla y León (2017). *Informe laboral del sector forestal en Castilla y León*. Recuperado el 3 de marzo de 2022, de <https://castillayleon.ccoo.es/80d11b74e17c98f5604687c8dc4ba0c7000054.pdf>
- Klippel, A., Scheid, M., & Krause, U. (2013). *Investigations into the influence of dustiness on dust explosions*. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(6), 1616-1626. doi:[10.1016/j.jlp.2013.07.016](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.07.016)
- Klippel, A., Schmidt, M., & Krause, U. (2015). *Dustiness in workplace safety and explosion protection-Review and outlook*. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 34, 22-29. doi:[10.1016/j.jlp.2015.01.011](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.01.011)
- Kramer, P., Braun, M., & Bendels, H. K. (2019). *What is a dust explosion?* *Zentralblatt Fur Arbeitsmedizin Arbeitsschutz Und Ergonomie*, 69(1), 33-37. doi:[10.1007/s40664-018-0302-9](https://doi.org/10.1007/s40664-018-0302-9)
- Lanchas, Á. (2018). *Agentes atmosféricos degradantes de la madera*. *Protecma*, 1, 4-7. Recuperado de: <https://issuu.com/esinal/docs/protecma-1-comprimido>
- Larrad, M. (2016). *Análisis de las condiciones de inflamación de capas y depósitos combustibles sólidos*. (Grado de Ingeniería de la Energía). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Lee, M. C., Kim, Y. S., & Rie, D. H. (2016). *Analysis of explosion characteristics of combustible wood dust in confined system using the thermal decomposition rate and mass loss rate*. *Applied Thermal Engineering*, 109, 432-439. doi:[10.1016/j.applthermaleng.2016.08.010](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.010)
- Maderas Estanqueiro. Aserradero - 1ª Transformación de la madera (2020)*. Madeiras Estanqueiro SL. Recuperado el 3 de marzo de 2022, de <https://www.madeirasestanqueiro.com/aserradero-1o-transformacion-de-la-madera.html>
- McKinnon, A. (2 de marzo de 2015) *Lakeland Mills inquest begins into explosion that killed 2*. CBC News. <https://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/lakeland-mills-inquest-begins-into-explosion-that-killed-2-1.2977759>
- Microscopía Electrónica de Barrido*. (2022). Scai uma.es. <https://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html>
- Morales, E. (2019). *Durabilidad de la madera por tratamiento químico*. *Protecma*, 3, 4-7. Recuperado el 3 de marzo de 2022, de <https://issuu.com/esinal/docs/protecma-3>
- Naciones Unidas (2008). *International Standard Industrial Classification of All Economic Activities (ISIC)*, Rev.4. Nueva York. Recuperado el 3 de marzo de 2022, de https://unstats.un.org/unsd/publication/seriesm/seriesm_4rev4e.pdf

Paz, F. J. (2008). *Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer clareo en árboles de melina (gmelina arborea roxb.), de una plantación proveniente del departamento de Izabal.* (Ingeniería Química). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Región de Murcia (2010) *Manual Básico de Prevención de Riesgos Laborales de la familia profesional: Madera, mueble y corcho.* Recuperado el 3 de marzo de 2022, de https://www.llegarasalto.com/docs/manuales_prl/MANUAL_MADERA_Q.pdf

Santiago, P., Guevara, C. L., & Espinoza, M. L. (2013). *Manual de transformación de la madera.* Perú: AIDER (Asociación para la Investigación y Desarrollo Integral)

UGT La Rioja (2008) *Manual de buenas prácticas en prevención de riesgos laborales en el sector de la madera.* Recuperado el 3 de marzo de 2022, de <http://portal.ugt.org/saludlaboral/publicaciones/CCAA/Rioja/Manual%20RL%20Madera.pdf>

Wang, Y. F., Yang, L. Z., Zhou, X. D., Dai, J. K., Zhou, Y. P., & Deng, Z. H. (2010). *Experiment study of the altitude effects on spontaneous ignition characteristics of wood.* Fuel, 89(5), 1029-1034. doi:[10.1016/j.fuel.2009.11.010](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.11.010)

Worksafe. (2014). *Lakeland Mills incident investigation: Incident investigation report.* Recuperado el 3 de marzo de 2022, de <https://www.worksafebc.com/en/resources/health-safety/incident-investigation-report-summaries/lakeland-mills-incident-investigation-incident-investigation-report?lang=en>

Xie, T., Wei, R. C., Wang, Z., & Wang, J. (2020). Comparative analysis of thermal oxidative decomposition and fire characteristics for different straw powders via thermogravimetry and cone calorimetry. Process Safety and Environmental Protection, 134, 121-130. doi:[10.1016/j.psep.2019.11.028](https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.028)

Yuan, Z., Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2015). Dust explosions: A threat to the process industries. Process Safety and Environmental Protection, 98, 57-71. doi:[10.1016/j.psep.2015.06.008](https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.06.008)

Normativa

Directiva europea sobre ATEX

DIRECTIVA 1999/92/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 16 de diciembre de 1999 relativa a las disposiciones mínimas para la mejora de la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas

(Decimoquinta Directiva específica con arreglo al apartado 1 del artículo 16 de la Directiva 89/391/CEE del Consejo)

DIRECTIVA 2014/34/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 26 de febrero de 2014 sobre la armonización de las legislaciones de los Estados miembros en materia de aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas (refundición)

Legislación relacionada

REAL DECRETO 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.

Ley 31/1995 de 8 de Noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales. Boletín Oficial del Estado, número 269, de 10-11-95).

Real Decreto 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.

Real Decreto 656/2017, de 23 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus Instrucciones Técnicas Complementarias MIE APQ 0 a 10.

Normas técnicas

UNE-EN 844:2020 Madera aserrada y madera en rollo. Terminología.

UNE-EN 1127-1:2020. Atmósferas explosivas. Prevención y protección contra la explosión. Parte 1: Conceptos básicos y metodología.

UNE-EN 1839:2017 (Ratificada). Determinación de los límites de explosividad y de la concentración límite de oxígeno (LOC) para gases y vapores inflamables.

UNE-EN 13183-1:2002. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa.

UNE-EN 13237:2012. Atmósferas potencialmente explosivas. Términos y definiciones para equipos y sistemas de protección destinados a utilizarse en atmósferas potencialmente explosivas.

UNE-EN 13463-1:2011 Equipos no eléctricos destinados a atmósferas potencialmente explosivas. Parte 1: Requisitos y metodología básica

UNE-EN 14034-1/2/3/4:2011. Determinación de las características de explosión de nubes de polvo.

UNE-EN 15089:2010. Sistemas de aislamiento de explosión.

- UNE-EN 15198:2008. Metodología para la evaluación del riesgo de ignición de equipos y componentes no eléctricos destinados a atmósferas potencialmente explosivas.
- UNE 22333:1990. Explosividad de polvo de carbón. Método de preparación y ensayos previos de muestras.
- UNE 22335:1992. Explosividad de polvo de carbón. Método de ensayo para la determinación de la concentración mínima explosiva en el tubo de Hartman.
- UNE-EN 60079-10-2:2016. Atmósferas explosivas. Parte 10-2: Clasificación de emplazamientos. Atmósferas explosivas de polvo.
- UNE-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016/AC:2017. Atmósferas explosivas. Parte 20-2: Características del material. Métodos de ensayo de polvos inflamables.
- NTP 369. Atmósferas potencialmente explosivas: instalaciones eléctricas.
- ISO 8421-1:1987. Fire protection — Vocabulary — Part 1: General terms and phenomena of fire.
- CEN/TR 15281:2006 Guidance on Inerting for the Prevention of Explosions.
- DIN IEC 60079-20-2:2009-01 – Entwurf VDE 0170-20-2:2009-01. Explosive atmospheres - Part 20-2: Material characteristics - Combustible dusts test methods.
- ASTM E1515-14. Standard Test Method for Minimum Explosible Concentration of Combustible Dusts.



**UNIVERSIDAD
DE BURGOS**

ISBN 978-84-18465-22-2



9 788418 465222