



Escola Politècnica Superior  
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# INGENIERÍA DE LA EDIFICACIÓN

## PROYECTO FINAL DE GRADO

### PROTECCIÓN DE LA MADERA FRENTE AL FUEGO MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE DIVERSOS PRODUCTOS

**Projectistas:** Sara Medina Durán  
Beatriz Zamora Mur

**Directores:** Laia Haurie Ibarra  
Joaquín Montón Lecumberri

**Convocatoria:** Enero 2012



## RESUMEN

El objeto de este proyecto final de carrera es estudiar y analizar las posibles mejoras del comportamiento de la madera frente al fuego, intentando que no se produzca la ignición en el material, que si se produce sea a temperaturas más elevadas, retardando la velocidad de propagación de la llama y pretendiendo así que la madera conserve sus propiedades iniciales y no se vean alteradas por la acción del fuego.

Para todo ello se han realizado impregnaciones en las muestras con tres productos diferentes (Borato de Sodio, Silicato de Sodio y Silicato de Potasio). Algunas de las variables a tener en cuenta han sido el estudio del comportamiento con la impregnación de un solo producto, la combinación de dos de ellos y la doble impregnación con el mismo producto.

Las pautas a seguir para el trabajo experimental han sido las siguientes:

- Seleccionar el tipo de madera a trabajar.
- Estudiar el método de impregnación más adecuado y realizar unas pruebas iniciales con las muestras de madera y una solución con colorante, con el objetivo de establecer los parámetros óptimos (tiempos de impregnación, de secado de las piezas y temperatura de las mismas) para conseguir que penetre el producto lo máximo posible.
- Impregnar las probetas para el trabajo una vez determinado el procedimiento a seguir.
- Verificar que las muestras han quedado impregnadas en su interior.
- Someter las probetas tratadas y sin tratar a los distintos ensayos de fuego.
- Analizar los resultados obtenidos y hacer una relación de los mismos con el fin de poder conocer de forma adecuada los datos en función del producto/s utilizado/s, el método y el corte de la madera.
- Realizar un estudio comparativo de los resultados experimentales para poder obtener unas conclusiones finales.

Una vez finalizada la parte experimental del proyecto y extraídas las conclusiones a partir de la misma, se ha redactado la memoria y se han descrito las mejoras obtenidas mediante las aplicaciones de las distintas soluciones químicas.

## ÍNDICE

<b>GLOSARIO .....</b>	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
1.1 Presentación .....	7
1.2 Objetivo .....	7
<b>CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>8</b>
2.1 Introducción .....	8
2.2 Características y aplicaciones de la madera .....	8
2.3 Comportamiento de la madera frente al fuego.....	14
2.4 La ignifugación de la madera .....	16
2.4.1 Caracterización de los sistemas de tratamiento contra el fuego.....	16
2.4.2 Clasificación de ignifugantes .....	20
2.4.3 Clasificación de reacción y resistencia al fuego .....	25
2.5 Secado de la madera .....	28
2.5.1 Humedad de la madera.....	29
2.5.2. Movimiento del agua en la madera.....	31
2.6. Sistemas de verificación de la impregnación.....	33
2.6.1 Reactivos .....	33
2.6.2 Colorantes .....	34
2.6.3 Microscopio .....	35
2.7 Ensayos de fuego.....	39
2.7.1 Ensayo de reacción al fuego de los materiales de construcción.....	39
2.7.2. Determinación del comportamiento al fuego mediante el índice de oxígeno.....	43

2.8 Lixiviación .....	49
<b>CAPÍTULO 3: PREPARACIÓN DEL MATERIAL.....</b>	<b>50</b>
3.1 Introducción .....	50
3.2 Materiales empleados .....	50
3.2.1 Muestras de madera.....	50
3.2.2 Tratamientos para la impregnación .....	51
3.3 Impregnación mediante vacío .....	53
3.3.1 Preparación de los productos .....	53
3.3.2 Preparación de las muestras en vacío e impregnación .....	55
<b>CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN DE LA IMPREGNACIÓN .....</b>	<b>58</b>
4.3 Colorantes .....	59
4.4 Microscopio electrónico de barrido (SEM) .....	60
<b>CAPÍTULO 5: ENSAYOS DE COMPORTAMIENTO AL FUEGO .....</b>	<b>81</b>
5.1 Introducción .....	81
5.2 Ensayo de goteo .....	83
5.2.1 Equipo necesario .....	83
5.2.2 Método de ensayo.....	85
5.3 Ensayo de índice de oxígeno (LOI) .....	88
5.3.1 Equipo necesario .....	88
5.3.2 Método de ensayo.....	91
<b>CAPÍTULO 6: LIXIVIACIÓN .....</b>	<b>93</b>
6.1 Procedimiento.....	93
6.2 Resultados.....	96

<b>CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>99</b>
7.1 Introducción .....	99
7.2 Estudios comparativos.....	100
7.2.1 Muestras ensayadas en Goteo .....	100
7.2.2 Muestras ensayadas en L.O.I.....	107
<b>CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES .....</b>	<b>109</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>111</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>112</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>115</b>

## GLOSARIO

**Carbonizar:** reducir a carbón, más o menos puro, un cuerpo orgánico por la acción de una combustión incompleta.

**Combustión:** reacción exotérmica de una sustancia, llamada combustible, con un oxidante, llamado comburente; el fenómeno viene acompañado generalmente por una emisión lumínica en forma de llamas o incandescencia con desprendimiento de productos volátiles y/o humos, y que puede dejar un residuo de cenizas.

**Combustible:** sustancia susceptible de arder, requiere calentamiento previo para desprender vapores para llegar a la combustión; bajo condiciones de ensayo determinadas.

**Comportamiento al fuego:** conjunto de las transformaciones físicas y químicas de un material o de un elemento de construcción sometido a la acción destructiva del fuego.

**Concentración de la solución:** cantidad de una sustancia disuelta en un volumen definido de solventes, se expresa generalmente en %, porcentajes de masa por volumen.

**Curva temperatura-tiempo:** variación convencional de la temperatura en relación con el tiempo durante los ensayos experimentales de resistencia al fuego.

**Deflagración:** onda de combustión que se propaga a velocidad subsónica.

**Encender:** iniciar una combustión.

**Estabilidad al fuego:** aptitud de un elemento de construcción, portante o no, de permanecer inalterado en su función mecánica bajo la acción del fuego por un determinado período de tiempo.

**Fenda:** Separación de las fibras en el sentido longitudinal, generalmente debida a las pérdidas de humedad de la madera, pero en ocasiones originadas por otras causas como heladas, o el apeo de los árboles.

**Humo:** conjunto visible de partículas sólidas y líquidas en suspensión en el aire, o en los productos volátiles, resultantes de una combustión o pirólisis.

**Ignífugo:** sustancia que tiene la cualidad de suprimir, disminuir o retardar la combustión de ciertos materiales.

**Ignifugación:** aplicación de un tratamiento a un material haciendo uso de sustancias ignífugas.

**Incombustible:** no susceptible de arder, requiere temperaturas muy elevadas para poderse quemar; bajo condiciones de ensayo determinadas.

**Índice de oxígeno:** es la cantidad mínima de oxígeno expresada en tanto por ciento en volumen, de una mezcla de oxígeno y nitrógeno que mantienen la combustión de una probeta bajo condiciones de ensayo determinadas.

**Inflamable:** Toda sustancia capaz de producir vapores inflamables en temperaturas inferiores a 38°C.

**KSil:** Silicato de Potasio, sustancia inorgánica que se encuentra en solución acuosa.

**Nasil:** Silicato de Sodio, sustancia inorgánica que se encuentra en solución acuosa.

**Nudo:** Anomalía local de la estructura de la madera que se manifiesta en los puntos de inserción de las ramas en el tronco y que va quedando englobada en esta a medida que se producen los sucesivos crecimientos.

**Parallamas:** propiedad de un elemento de construcción, componente, equipo o estructura, de asegurar simultáneamente la estabilidad, la estanquidad y la no emisión de gases inflamables, por su cara no expuesta al fuego.

**Pirólisis:** descomposición química irreversible de un material debida exclusivamente al calor, generalmente en ausencia de oxígeno.

**Resistencia al fuego:** aptitud de un elemento de construcción, componente, equipo o estructura, de conservar durante un tiempo determinado la estabilidad, la estanquidad, el aislamiento térmico requerido y la no emisión de gases inflamables, especificados en los ensayos de resistencia al fuego.

**Retardador de llama:** producto o tratamiento aplicado a un material que tiene la propiedad de retardar la propagación de la llama.

**Solubor:** Borato de Sodio soluble, concentrado y en polvo que contiene un 67,5% de Boro.



## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Presentación**

El proyecto realizado surge de la propuesta que nos ofrecen Laia Haurie y Joaquín Montón de continuar con un estudio anterior de Javier Ferrer Sánchez sobre tratamientos protectores de la madera: *Estudio experimental de tratamientos protectores para la madera contra el fuego*. Línea de trabajo que está en marcha entre la sección de materiales y el laboratorio del fuego.

Desde el primer momento estuvimos interesadas en la realización de un trabajo práctico sobre el que pudiéramos investigar y poner todo nuestro empeño para tratar de cumplir los objetivos que se nos marcaban desde el inicio. Por eso, una vez reunidas con los tutores para comentar en profundidad los parámetros de trabajo que se iban a llevar a cabo, decidimos adentrarnos en este estudio.

### **1.2 Objetivo**

Tras documentarse y familiarizarse con los materiales y ensayos que se deben emplear en el proceso, se decide realizar el estudio en madera de pino; teniendo en cuenta que responde mejor a los tratamientos ignífugos.

El objetivo que se pretende es estudiar y analizar los beneficios aportados a la madera por la impregnación en vacío con diversos productos retardantes como son el Borato de Sodio, el Silicato de Sodio y el Silicato de Potasio; sometiéndola a diversos ensayos de fuego.

Además del estudio de las mejoras frente al fuego y del comportamiento que muestra con cada uno de los productos, también se debe evaluar y comparar la sinergia entre productos. Para optimizar el proceso y lograr los resultados deseados, se debe ser riguroso en la fase de impregnación de las muestras; controlando el tiempo de obtención del vacío dentro de la campana, el tiempo que se debe dejar la bomba de vacío en marcha y las piezas sumergidas en la solución una vez deshecho el vacío. Es importante también realizar un secado progresivo de las muestras para evitar alterar las dimensiones, la forma y la estructura de las mismas. Todos estos aspectos se tienen en cuenta con el fin de cuantificar, en la medida de lo posible, la cantidad de producto que penetra en la madera y así poder comparar las distintas reacciones y comportamientos según el tratamiento empleado.

## **CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

### **2.1 Introducción**

La madera, al estar constituida por carbono, es un material combustible y susceptible de ser degradada por el fuego. La degradación por combustión se produce mediante reacciones químicas que disminuyen paulatinamente su sección y pueden provocar su total destrucción, dependiendo del tiempo de exposición al fuego.[2]

Muchos de los materiales que se emplean en la construcción no son combustibles (no aportan alimento al incendio), sin embargo, ninguno es a prueba de fuego. En efecto, las estructuras metálicas se dilatan y retuercen rápidamente en un incendio con altas temperaturas, produciendo el colapso del edificio al perder su resistencia. El hormigón armado se resquebraja con el calor y más aún cuando se enfría rápidamente al ser mojado por el agua de las mangueras de los extintores. [2]

A pesar de que la madera sea un material inflamable a temperaturas relativamente bajas, en relación con las que se producen en un incendio, es un material muy seguro:

- su baja conductividad térmica hace que la temperatura sea menor hacia el interior conservando más tiempo sus propiedades resistentes.
- la carbonización superficial que se produce inicialmente impide tanto la salida de gases como la penetración del calor, lo que retrasa el proceso de combustión.
- finalmente, al ser despreciable su dilatación térmica no actúa sobre las estructuras y no las deforma. [2]

### **2.2 Características y aplicaciones de la madera**

#### Composición

Es una sustancia fibrosa, organizada, esencialmente heterogénea, producida por un organismo vivo que es el árbol.

Sus propiedades y posibilidades de empleo son, en definitiva, la consecuencia de los caracteres, organización y composición química de las células que la constituyen.

El origen vegetal de la madera, hace de ella un material con unas características peculiares que la diferencia de otros de origen mineral.

Elementos orgánicos de que se componen:

- Celulosa: 40-50%
- Lignina: 25-30%
- Hemicelulosa: 20-25% (Hidratos de carbono)
- Resina, tanino, grasas: % restante

Estos elementos están compuestos de:

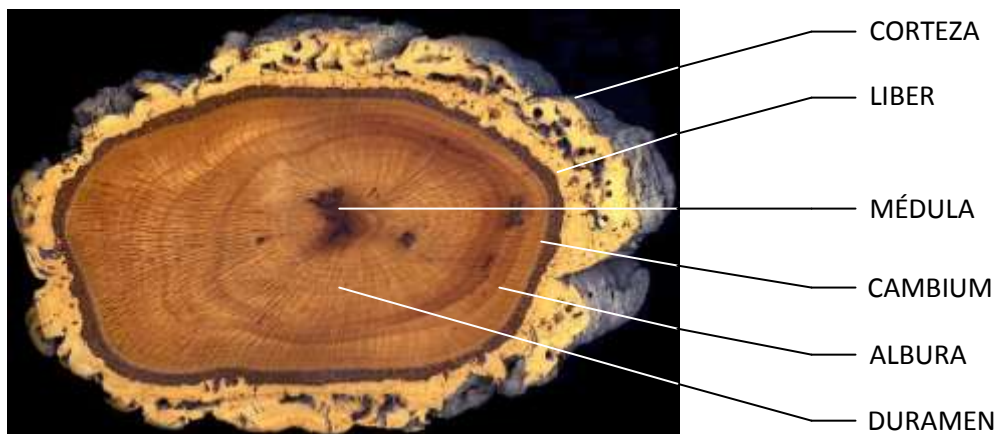
- Elementos esenciales (90%):
  - Carbono: 46-50%
  - Oxígeno: 38-42%
  - Hidrógeno: 6%
  - Nitrógeno: 1%
- Otros elementos (10%):
  - Cuerpos simples (Fósforo y azufre)
  - Compuestos minerales (Potasa, calcio, sodio).

### Estructura macroscópica

Entre la madera y la corteza existe una capa generatriz, llamada cambium, que produce madera hacia el interior y corteza hacia el exterior. En cada período vegetativo se forma una nueva capa (anillo) que cubre la anterior.

Dentro de cada capa se observan dos zonas bien diferenciadas, la formada al principio del período vegetativo con células de paredes delgadas y grandes lúmenes que se denomina madera de primavera, y la formada durante el verano, con células de paredes gruesas y lúmenes pequeños, llamada madera de verano.

Esta diferencia entre las dos zonas, hace fácilmente distinguible en la sección transversal, una serie de anillos concéntricos llamados anillos de crecimiento, cada uno de los cuales corresponde a un período vegetativo de la vida del árbol y que en nuestro clima, representa el crecimiento anual, por lo que su número indica la edad del árbol.



*Figura 2.1* Sección de un tronco. Imagen extraída de la página web [www.quimicasthai.wordpress.com](http://www.quimicasthai.wordpress.com)

**Médula:** Parte central del árbol. Constituida por tejido flojo y poroso. Tiene un diámetro muy pequeño. Madera vieja y normalmente agrietada. Se suele desechar en los procesos de elaboración de la madera.

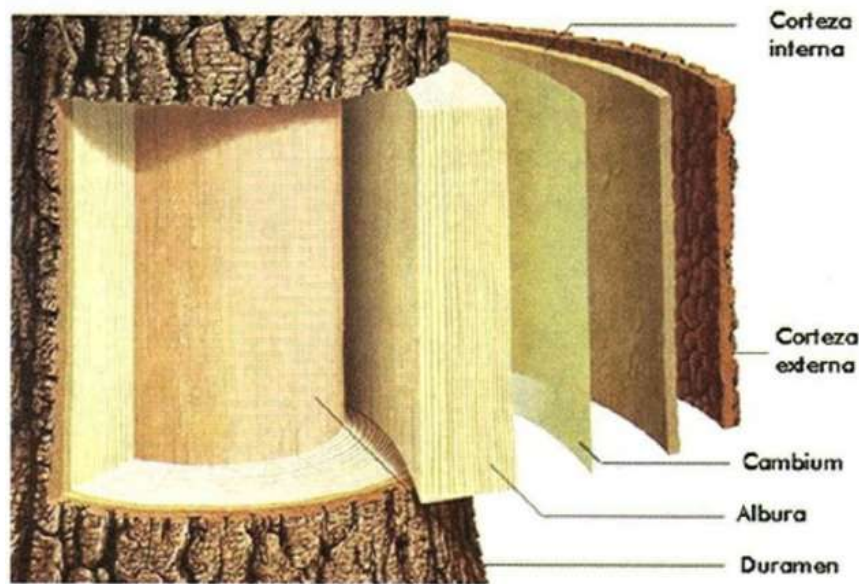


Figura 2.2 Partes del tronco. Foto extraída de la página web [www.quimicasthai.wordpress.com](http://www.quimicasthai.wordpress.com)

**Duramen:** Madera de la parte interior del tronco. Constituido por tejidos que han llegado a su máximo desarrollo y resistencia (debido al proceso de lignificación.) De coloración, a veces, más oscura que la exterior. Madera adulta y compacta. Es aprovechable. La duraminización (transformación de albura a duramen) de la madera se caracteriza por una serie de modificaciones anatómicas y químicas, oscurecimiento, aumento de densidad y mayor resistencia frente a los ataques de los insectos.

**Albura:** Se encuentra en la parte externa del tronco, bajo la corteza. Constituida por tejidos jóvenes en período de crecimiento (zona viva). Contiene mucha savia y materias orgánicas. De coloración más clara que el duramen, mas porosa y más ligera, con mayor riesgo frente a los ataques bióticos.

**Cambium:** Capa existente entre la albura y la corteza, constituye la base del crecimiento en especial del tronco, generando dos tipos de células:

Hacia el interior: Madera (albura)

Hacia el exterior: Liber

**Liber:** Parte interna de la corteza. Es filamentosa y poco resistente. Madera embrionaria viva.

**Corteza:** Capa exterior del tronco. Tejido impermeable que recubre el liber y protege al árbol.

**Radios leñosos:** Bandas o láminas delgadas de un tejido, cuyas células se desarrollan en dirección radial, o sea, perpendicular a los anillos de crecimiento. Ejercen una función de

trabazón. Almacenan y difunden las materias nutritivas que aporta la savia descendente (igual que las células de parénquima). Contribuyen a que la deformación de la madera sea menor en dirección radial que en la tangencial. Son más blandos que el resto de la masa leñosa. Por ello constituyen las zonas de rotura a compresión, cuando se ejerce el esfuerzo paralelamente a las fibras.

*Anillos anuales:* Cada anillo corresponde al crecimiento anual, consta de dos zonas claramente diferenciadas:

- Una formada en primavera: Predominan en ella los vasos gruesos que conducen la savia bruta hasta las hojas (tejido vascular). Color claro, pared delgada y fibras huecas y blandas.
- Otro formado en verano: Tienen los vasos más pequeños y apretados. Sus fibras forman el tejido de sostén. Color oscuro denso y fibras de paredes gruesas. En zonas tropicales (o en las zonas donde no se producen, prácticamente, variaciones climáticas con los cambios de estación, y la actividad vital del árbol es continua), no se aprecian diferencias entre las distintas zonas de anillos de crecimiento anual. Su suma, son los años de vida del árbol. Debido a la forma tronco-cónica del árbol, los anillos anuales se deben contar en el tronco, en zona más próxima a las raíces.

#### Estructura microscópica.

La variedad de tipos de células y la forma de unirse, definen la infinidad de especies diferentes de madera que existen.

En el sentido **axial** distinguimos:

- Fibras alargadas, de pared gruesa formadas por células que se han prolongado afinándose en las puntas, constituyendo los tejidos de sostén, es decir, la estructura y la parte resistente de la madera (tejido fibroso). En las coníferas estas células son las mismas que sirven para permitir la circulación de los fluidos.
- Vasos y poros de pared delgada (tejido vascular), formando los órganos de conducción o vehículo de la savia ascendente o bruta; los poros de la madera aparecen en sección transversal (pequeños agujeros), y en sección longitudinal (pequeñas estrías).
- Células de parénquima, son cortas y poco abundantes. Difunden y almacenan en todo el espesor del árbol la savia descendente o elaborada. El parénquima constituye una especie de tejido conjuntivo (tegumental o de defensa), que vincula entre sí a los otros tejidos y que está formado por células poliédricas de paredes celulósicas delgadas y esponjosas.

Esta especialización entre estructura y función sólo existe en los árboles frondosos; en los resinosos, todas las fibras son de carácter especial, llamadas traqueidas, de paredes más o menos espesas según la época del año en que se han formado.

En el sentido **radial** hay menos células, y estas se disponen por bandas o láminas delgadas (radios medulares), intercaladas entre las fibras y los vasos, a los que cruzan en ángulo recto, dirigiéndose desde la corteza hasta el centro del árbol.

En esas bandas de células llamadas radios celulares o mallas, almacenan y difunden, como las células del parénquima, las materias nutritivas que arrastra la savia descendente.

En ciertas especies se encuentran en ambos sentidos, axial y radial, unos canales secretores de resina.

De lo dicho anteriormente se desprende que la madera es un material heterogéneo y anisótropo, por tanto, sus propiedades variarán según la dirección que se considere.

### Aplicaciones:

A continuación, se hace una enumeración de los productos existentes transformados de la madera y sus respectivos usos en construcción:

- Tableros de madera maciza
  - Tableros ensamblados
  - Tableros de alma enlistonada
  - Tablero alistonado
- Tableros aglomerados
  - Tableros aglomerados de fibras
  - Se designa a este tablero, comercialmente, con las siglas MDF o DM
  - Tableros aglomerados de partículas
  - Tableros aglomerados de madera cemento
  - Paneles acústicos de madera aglomerada de partículas, fabricados por extrusión
  - Tableros de aglomerado con recubrimiento fenólico
- Tableros aglomerados de virutas
  - Tableros de virutas osb y waferboard
    - Tablero de grandes partículas orientadas (osb oriented strand board)
    - Tablero de grandes partículas no orientadas (waferboard)
  - Tableros acústicos de madera cemento (u otro aglomerante mineral)
- Tableros contrachapados
  - Tableros de madera contrachapada prensada
  - Tableros de madera contrachapada prensada para pavimentos
  - Tableros de madera contrachapada prensada antibala
  - Tableros de madera contrachapada prensada para usos marinos

Tableros de madera contrachapada de gran espesor

- Madera microlaminada (lvl: laminated veneer lumber)
- Madera laminada encolada.
- Viguetas perfabricadas (i-joist ).
- Parallam® psl. Tiras de chapas de madera laminadas y encoladas (parallel strand lumber)
- Tableros compuestos.
- Productos reciclados.
  - El paper board o tablero de papel
  - Tetrapack board

## 2.3 Comportamiento de la madera frente al fuego

La madera, pese a ser considerada un material combustible, resulta un producto valioso cuando se le utiliza en estructuras resistentes al fuego. Al quedar la superficie de una pieza de madera expuesta a temperaturas elevadas durante períodos de tiempo prolongados a la acción del fuego experimenta una descomposición química o pirolisis que genera gases inflamables, que comenzarán a arder, resultando una carbonización superficial. [22]

La conductividad térmica de la madera es de por sí baja, y la del carbón considerablemente menor, por lo que hacia el interior de la madera no carbonizada los incrementos de temperatura, y consecuentemente las reducciones de las propiedades mecánicas, serán moderadas. El carbón genera por su parte un estrato que limita, tanto la conducción del calor hacia la madera del interior, como también el paso de los gases inflamables que constituyen el combustible del fuego desde el interior hacia el exterior. [22]

De esta forma, pese a ser combustible, cuando se le utiliza, empleando piezas de dimensiones transversales suficientemente grandes, la madera puede ser considerada como un material de construcción resistente al fuego. [22]

Cuando la madera se expone a un foco de calor, su contenido de humedad disminuye en la zona directamente afectada al alcanzarse el punto de ebullición del agua. Este hecho es detectable por la sudoración que aparece en su superficie. Si el aporte de calor se mantiene hasta llegar a una temperatura aproximada de 270 °C, comienza el desprendimiento de vapores que, en caso de seguir aumentando la temperatura, son susceptibles de arder. Este proceso, llamado pirólisis de la madera, produce su descomposición en gases según las temperaturas alcanzadas. [2]

La madera y sus productos derivados están formados, principalmente, por celulosa y lignina, que, al ser compuestos de carbono, hidrógeno y oxígeno, hacen de ella un material combustible. A pesar de su combustibilidad, si la madera no se somete a llama directa, ésta no comenzará a arder hasta que no alcance aproximadamente los 400 °C. Aun siendo expuesta a llama directa, no se producirá la ignición hasta que no llegue a temperaturas en torno a los 300 °C. [2]

Puede considerarse que la madera presenta un buen comportamiento sometida a un incendio en fase de pleno desarrollo debido a que su conductividad térmica es muy baja. Esto lleva a que la combustión, alimentada por el oxígeno, se desarrolle únicamente en la superficie de la pieza. Tras la combustión de la superficie se origina una capa exterior carbonizada, que protege a otra capa interior contigua en la que se produce la pirólisis. Por último, en el interior de la pieza, queda la madera sin afectar por el fuego. [2]



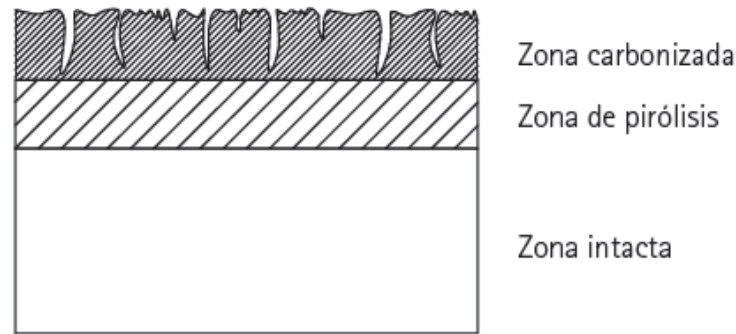


Figura 2.3 Cambios en la madera por la acción del fuego. [2]

La alta capacidad aislante de la capa carbonizada, del orden de unas seis veces superior a la de la madera a temperatura ambiente, permite que el interior de la pieza se mantenga a una temperatura mucho menor y con sus propiedades físico-mecánicas constantes. Así, la pérdida de capacidad portante del elemento se debe, principalmente, a la reducción de su sección y no tanto al deterioro de las propiedades del material. [2]

El comportamiento de la madera en caso de incendio puede variar dependiendo de factores como los que se apuntan a continuación:

- La relación entre la superficie y el volumen de la pieza. Las secciones estrechas y con aristas vivas aumentan esta relación, conduciendo a un comportamiento frente al fuego menos favorable. Por ejemplo, en piezas de pequeña escuadría resulta más fácil la ignición y la propagación de la llama.
- La existencia de fendas. Las hendiduras en el sentido de las fibras de la madera incrementan los efectos del fuego. La madera laminada, que apenas contiene fendas, presenta una velocidad de carbonización menor que la madera maciza.
- La densidad de la madera. Las diferentes especies de madera se comportan frente al fuego de forma diferente en función de su densidad. Si la densidad es alta, comienza a arder con menos facilidad y la combustión es más lenta.
- El contenido de humedad. En edificación, la mayoría de las estructuras de madera presentan un contenido de humedad que varía entre el 8% y el 15% aproximadamente, lo que implica que por cada tonelada de madera deben evaporarse entre 80 y 150 Kg de agua antes de que entre en combustión. No obstante, este factor no se considera en la velocidad de carbonización debido a la poca variación del contenido de humedad que se da en la práctica.[2]

## **2.4 La ignifugación de la madera**

En relación a la acción de incendio, la reglamentación actual limita tanto la contribución al incendio y la inflamabilidad de los materiales de construcción como su capacidad de desprender humo o partículas de material incandescentes cuando dichos materiales arden. Estos factores determinan su clasificación de reacción al fuego. [5]

La madera y los productos derivados de la madera sin tratar van a tener normalmente una clasificación de reacción al fuego D-s2,d0, dependiendo del tipo de madera, la densidad, el grosor y las condiciones de uso final del producto. Esto significa que se trata de un material o producto combustible con una inflamabilidad y una contribución al fuego relativamente altas (D), que produce una cantidad moderada de humo cuando arde (s2) y que no desprende gotas o partículas inflamadas en una fase inicial del incendio (d0). [5]

Esta clasificación no es suficiente en muchos casos para cumplir los requisitos del CTE mediante la aplicación del DB SI, dependiendo de la situación del material en el edificio (en techos, paredes o suelos de zonas ocupables, vías de evacuación protegidas, espacios ocultos, en fachadas...). [5]

Sin embargo, mediante la aplicación de tratamientos ignifugantes puede mejorarse la clasificación de reacción al fuego de la madera, puesto que al retrasarse el proceso de combustión se reducen la inflamabilidad y la emisión de calor del material en caso de incendio. No obstante, esta mejora en la clasificación principal puede no corresponderse con la cantidad de humo producida que, al ralentizarse el proceso de combustión, tiende a ser mayor. [5]

Por otro lado, y de manera indirecta, al ralentizarse el proceso de combustión, la aplicación de tratamientos ignifugantes también puede incidir en el aumento del tiempo de resistencia al fuego de los elementos constructivos de madera, si bien este valor no parece modificarse significativamente y su incremento sólo podría cuantificarse mediante ensayo. La aplicación de ignifugantes no evita la descomposición y carbonización de la madera, siendo el espesor de la zona carbonizada muy similar en piezas tratadas y sin tratar. La mejora está asociada, como ya se ha comentado, a la reducción de la inflamabilidad y de la emisión de calor. [5]

### **2.4.1 Caracterización de los sistemas de tratamiento contra el fuego**

Se pueden distinguir dos formas o procedimientos para tratar la madera. La primera se podría denominar pasiva, ya que se basa en la capacidad natural de la madera para recibir o absorber el protector, siendo la cantidad de producto absorbida irregular y no controlable. En este primer sistema se incluye el pincelado, la pulverización y la inmersión breve. [1]

La segunda se podría denominar activa, ya que se basa en métodos artificiales (fundamentalmente técnicas de vacío-presión), siendo controlable la cantidad de producto absorbida por la madera con mayor precisión. Este sistema incluye todo los sistemas que utilizan el autoclave. [1]

Para facilitar la introducción del protector en algunas maderas poco impregnables se recomienda practicar incisiones en las piezas, haciéndolas pasar entre dos rodillos dentados.

Haremos una breve enumeración de los procedimientos sin presión (tratamientos pasivos), los cuales son utilizados principalmente, y en función del tipo de protector utilizado, para conseguir una protección superficial contra la acción de agentes bióticos y fotodegradación:

- *Pincelado*: El protector se aplica mediante brocha, pincel o rodillo y el líquido penetra por capilaridad.
- *Pulverización*: El protector se aplica con un pulverizador mecánico o manual y se suele equiparar a 3 manos de pincelado, por lo que es más eficaz que éste.
- *Inmersión breve*: Se sumerge totalmente la madera en el protector hidrosoluble alrededor de 10 minutos como máximo. El protector se introduce por capilaridad desde la superficie hacia el interior.
- *Inmersión prolongada* (protección media): Se sumerge la madera en el protector hidrosoluble durante 10 minutos como mínimo. [1]

Un método de tratamiento especial es el de *difusión*, el cual consiste en aplicar el protector a la superficie de la madera húmeda, en forma de pasta o solución concentrada, difundándose a través de ésta, debido a la fuerza del gradiente de la concentración. Por su valor histórico dentro de este apartado se menciona el *sistema Boucherie*, que consistía en la sustitución de la savia por la solución protectora aprovechando la fuerza de la gravedad. [1]

Se utilizaba principalmente para proteger postes de madera húmedos, a los que se le colocaba un capuchón herméticamente cerrado en uno de sus extremos dejando el otro extremo libre. El poste se colocaba ligeramente inclinado para favorecer la salida de la savia. El capuchón estaba conectado a un depósito de la solución protectora situado a una considerable altura, la acción provocaba que la solución protectora fuera desplazando a la savia. [1]

#### Tratamientos con presión

Cualquier tratamiento que se realiza sobre madera con una humedad inferior al 28% en el que se hace penetrar el protector de manera forzada aplicando presión en un autoclave (cilindro metálico cerrado).

Los autoclaves suelen tener diámetros de 2 a 3 metros y una gran variedad de longitudes pudiendo llegar hasta 45 metros. Con estos tratamientos se consigue una protección

profunda y se pueden utilizar todo tipo de protectores. Dependiendo de la distribución del protector en el interior de la madera se diferencian los sistemas de célula llena y de célula vacía. Estas denominaciones no quieren decir que el de célula llena llene totalmente el interior de las células con el producto protector mientras que el de célula vacía deje el interior de la célula sin producto. Se diferencian en que con el sistema de célula llena se consiguen mayores retenciones de producto (se deja mayor cantidad de producto en el interior de la madera) y con el de célula vacía se consiguen mayores penetraciones con menores retenciones de producto. [1]

El objetivo del **sistema de célula llena** es conseguir la máxima retención del protector en la madera tratada. La característica fundamental de este sistema es la realización de un vacío inicial, que extrae el aire del interior de la madera y que facilita que entre más producto. El *sistema Bethell* es el típico sistema de célula llena, que consta de las siguientes fases:

- Vacío previo, para extraer parte del aire de la madera.
- Inyección del protector, que ocupará el lugar del aire extraído.
- Vacío final para regular la cantidad de protector introducida.

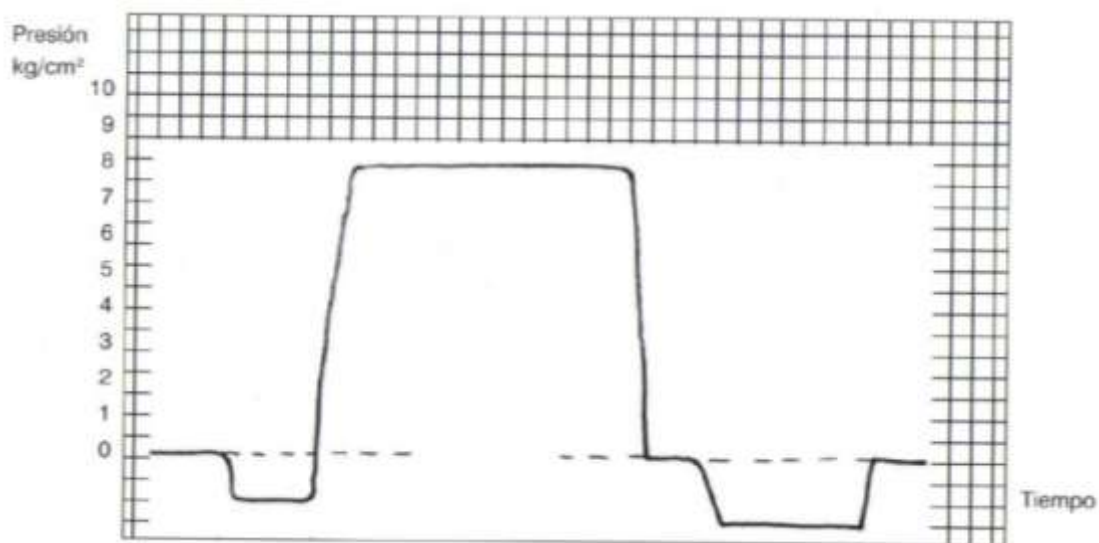


Figura 2.4 Sistema Bethell (Célula llena). Peraza [1]

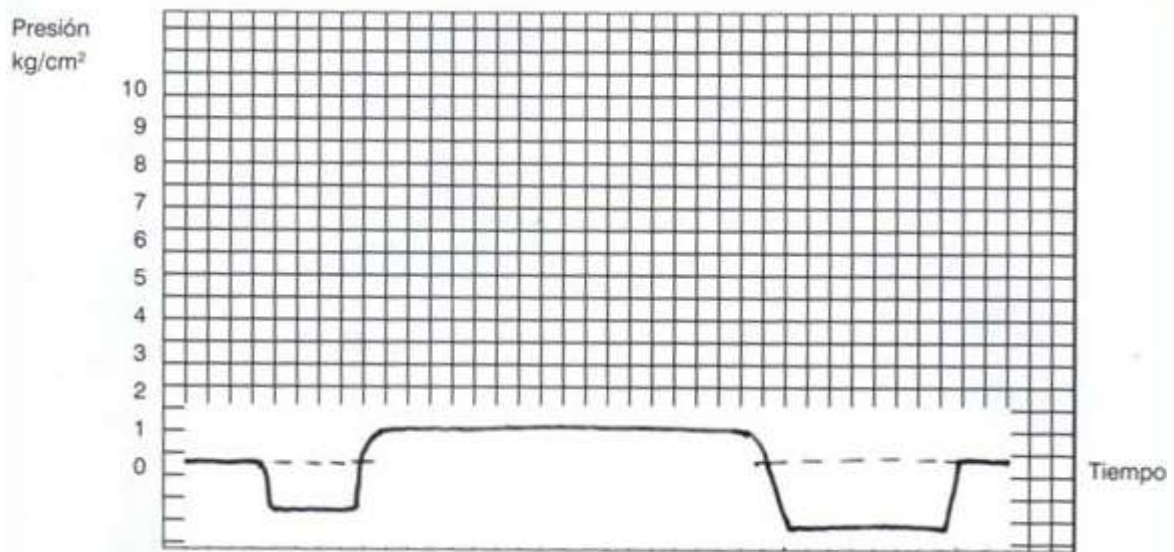


Figura 2.5 Sistema Vacío-Vacío (Célula Llena). Peraza [1]

El objetivo del **sistema de célula vacía** es conseguir que el producto protector penetre profundamente en la madera retirando posteriormente el excedente de producto. Los típicos sistemas de célula vacía son los sistemas Lowry, alternativo, Rüpíng y oscilante. Estos sistemas constan de las siguientes fases:

- La madera se somete a una presión ligeramente superior a la atmosférica antes de la inyección del protector.
- Vacío final con objetivo de regular la cantidad de protector introducida en la madera. [1]

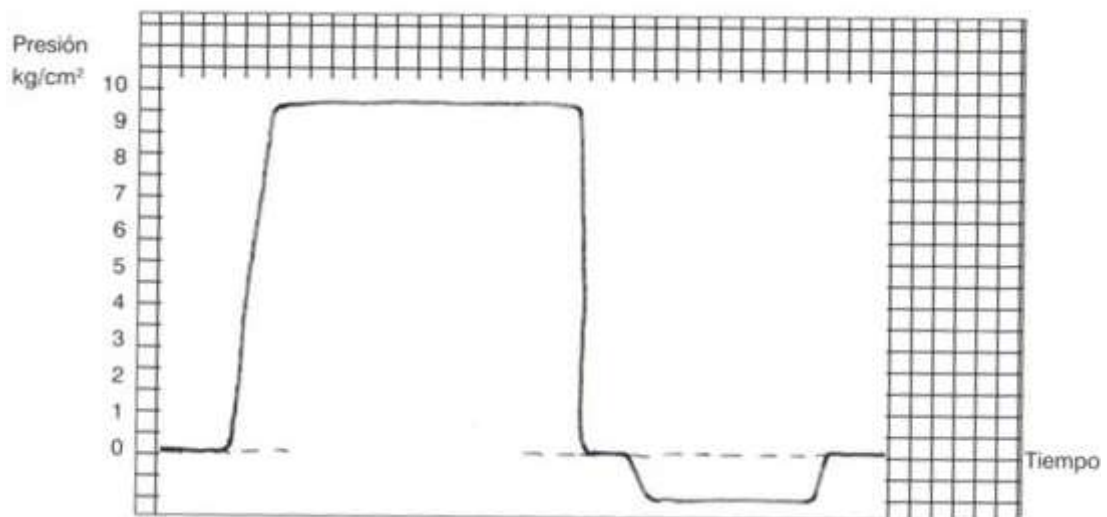


Figura 2.6 Sistema Lowry (Célula vacía). Peraza [1]

Los distintos sistemas vienen definidos por la duración e intensidad de las presiones y de los vacíos aplicados, que a su vez dependen de la resistencia a la impregnación que tenga la especie de madera, el grado de protección requerida y el tipo de protector utilizado.

Una vez realizado el tratamiento por autoclave es necesario apilar las piezas de madera tratadas en lugares protegidos para que los productos se fijen y se evapore el solvente (agua). [1]

#### Doble Vacío

Tratamiento que consigue realizar una protección perimetral de la pared celular sin rellenar totalmente el lumen de las células. Este tratamiento consta de las siguientes fases:

- Vacío inicial, para extraer parte del aire de la madera
- Introducción del protector a presión atmosférica y a veces a una presión ligeramente superior.
- Vacío final, para regular la cantidad de producto introducido.

Este tratamiento se aplica a madera de construcción previamente elaborada, principalmente para carpintería de exterior. Se consigue protección contra agentes bióticos y normalmente sólo se utilizan protectores en disolvente orgánico. [1]

### **2.4.2 Clasificación de ignifugantes**

**Según su mecanismo de actuación** los productos ignifugantes, con carácter general, pueden agruparse en los siguientes tipos:

· Se funden y recubren las partículas de madera

Estos ignifugantes, generalmente obtenidos a partir de boratos y silicatos, tienen temperaturas de fusión inferiores a la de la combustión de la madera. Al alcanzarlas, se adhieren a la pieza rellenando sus poros, evitando así la penetración del oxígeno hacia las capas interiores y la formación de gases inflamables. [5]

· Se descomponen liberando sustancias que reducen la inflamabilidad

Dependiendo de la sustancia liberada durante el proceso de combustión, pueden diferenciarse los siguientes tipos de productos ignifugantes:

- *liberan agua*

Ciertos productos ignifugantes se caracterizan por la higroscopicidad de sus componentes, es decir, por su capacidad para absorber la humedad del ambiente. Ante el efecto de las altas temperaturas alcanzadas durante un posible incendio, se liberará el agua previamente absorbida junto con el agua de cristalización propia del producto. Así, la capacidad del ignifugante para disminuir la emisión de gases inflamables durante el proceso de combustión dependerá de su capacidad de absorción.

- *liberan compuestos orgánicos*

Existen productos que, mediante la reacción de sus componentes con la madera, generan compuestos orgánicos. Éstos, al ser lo suficientemente estables a altas temperaturas, retrasan el proceso de combustión de la madera.

- *liberan gases no combustibles*

Son productos que sometidos a altas temperaturas producen gases no combustibles. La presencia de estos gases no combustibles hace que, durante el proceso de combustión, disminuya la concentración de gases combustibles y, como consecuencia, la inflamabilidad. Estos ignifugantes suelen contener elementos halógenos como flúor, cloro, bromo y yodo. [5]

• Forman espuma

Las pinturas y barnices intumescentes aumentan su volumen expuestos a altas temperaturas, generando una capa aislante en la superficie de la pieza. Durante el proceso de combustión, como ocurre con otros tipos de ignifugantes, estos productos liberan gases no combustibles, lo que hace disminuir la inflamabilidad. [5]

• Colaboran en la carbonización de la madera

Algunos ignifugantes potencian la carbonización del material con objeto de incrementar el aislamiento que proporciona la capa carbonizada a las capas interiores de la pieza. Durante este proceso, el agente ignifugante puede aumentar la emisión de vapor de agua, disminuyendo la formación de gases combustibles y el riesgo de inflamabilidad. [5]

• Forman película en la superficie de la madera

Son pinturas cuya capacidad ignifugante consiste en evitar el contacto de la capa externa de la pieza con el oxígeno, retardando así el proceso de combustión. La aplicación de estos tratamientos a los elementos de madera no sólo puede mejorar su clasificación de reacción al fuego sino también incrementar su resistencia. [5]

**Según su composición** puede decirse que los ignifugantes más utilizados para el tratamiento de la madera, utilizada como acabado en espacios interiores, son los compuestos a base de **sales inorgánicas** solubles en agua y obtenidas, generalmente, a base de fósforo, boro o cloro. Estos productos no son igual de efectivos cuando se aplican a madera expuesta al exterior, ya que pueden perder parte de su concentración en sales por deslavado. [5]

Tratada con ignifugantes a base de sales inorgánicas, la madera presenta una mayor higroscopicidad que sin tratar, es decir, su capacidad para acumular agua extraída del ambiente aumenta. Este incremento en el índice de humedad dependerá del tipo de madera, la sección de la pieza, los componentes químicos del ignifugante utilizado y la concentración de estos agentes químicos en el material. [5]

La capacidad del elemento ignifugado para acumular agua se acusa especialmente si se encuentra en un entorno con humedad relativa alta. Cuando se prevea el uso de la madera en estas condiciones, será conveniente que la higroscopicidad del producto aplicado sea baja, con objeto de evitar posibles efectos adversos tales como formación de manchas, alteraciones en barnices aplicados con posterioridad, etc. [5]

Los productos compuestos por sales inorgánicas también pueden reaccionar con los elementos metálicos no inoxidable integrados en la construcción, por lo que deberá tenerse especial cuidado en el diseño y protección de fijaciones y anclajes. [5]

Por otro lado, los ignifugantes que contienen elementos halógenos desprenden gases especialmente tóxicos durante la combustión, lo que obliga a utilizar en su composición sustancias que rebajen la toxicidad. [5]

Otros ignifugantes, como los obtenidos a partir de **compuestos orgánicos**, al ser insolubles en agua, presentan un mejor comportamiento aplicados a la madera expuesta a un ambiente exterior. La resistencia de estos productos al deslavado es superior a la que ofrecen otros tratamientos. Ello no quita que también puedan producirse deslavados cuando la exposición a la intemperie del elemento ignifugado sea total o muy prolongada, aunque su efectividad seguirá siendo mejor que la de los productos compuestos por sales inorgánicas. [5]

La aplicación de ignifugantes a partir de compuestos orgánicos, por su baja higroscopicidad, es recomendable en zonas con índices de humedad altos. Dentro de estos productos se encuentran, por ejemplo, las resinas obtenidas a partir de urea. [5]

Con carácter general, algunos tratamientos ignifugantes, además de aportar sus propiedades retardantes, pueden ofrecer cierta protección ante el ataque de hongos e insectos. [5]

**Según el procedimiento de aplicación** del tratamiento ignifugante a la madera se pueden establecer los siguientes métodos:

- Ignifugación en profundidad

La porosidad de la **madera maciza** facilita la introducción de productos ignífugos en forma de soluciones acuosas, generalmente calientes y con una determinada concentración. En la mayoría de los casos una simple inmersión no es suficiente, ya que el aire contenido en la madera se opone a esta penetración. Se consiguen unas profundidades de penetración del orden de 10 a 20mm, que son inferiores a las que se alcanzan con el procedimiento de autoclave. [5]



En todo caso, la penetración de los agentes ignifugantes dependerá, además del sistema utilizado, del tipo de madera, de su estructura interna de la madera y del contenido de humedad de la pieza. [5]

El tratamiento tradicional de ignifugación en autoclave no se recomienda para su aplicación a determinados productos de madera como **tableros de partículas**, al valorarse los siguientes aspectos:

- Los agentes químicos del compuesto ignifugante pueden no ser compatibles con las características de los adhesivos utilizados como conglomerantes del tablero.
- El comportamiento estructural del tablero puede empeorar, tanto por la presión a la que es sometido durante el tratamiento como por la acción de los propios agentes químicos del compuesto. [5]

Por esta razón, para la utilización de tratamientos retardantes en los tableros de partículas, el diseñador debería verificar los efectos de los mismos antes de su inclusión en el proyecto.

Con el fin de evitar las posibles incompatibilidades que se han mencionado anteriormente, en los tableros de partículas los productos ignifugantes suelen añadirse a las partículas que lo conforman o, al igual que en los tableros de fibras de densidad media, al adhesivo. [5]

En **tableros contrachapados**, así como en piezas de madera laminada, la ignifugación profunda puede hacerse de varias formas:

- Tablero: después de haber fabricado el tablero se introduce en el autoclave para comunicar el tratamiento ignífugo.
- Chapas: las chapas se impregnan con el producto ignífugo antes del encolado. Debido a que el espesor de las chapas es pequeño, la impregnación puede realizarse por inmersión aunque también puede realizarse el autoclave. Una vez impregnadas las chapas se procede a su encolado, armado y prensado.
- Adhesivo: añadiendo aditivos ignífugos al adhesivo que se utiliza para la fabricación de los tableros. [5]

Cabe señalar que se están desarrollando nuevos sistemas de autoclave, como los prismáticos de carga superior, con objeto de mejorar el procedimiento utilizado tradicionalmente. Los avances introducidos podrían hacer que este método resultase adecuado para la aplicación de tratamientos ignifugantes a un mayor número de productos de madera. [5]

• Ignifugación superficial

El tratamiento superficial de la madera puede realizarse mediante la aplicación de barnices y pinturas intumescentes, de sales inorgánicas disueltas en agua y de enlucidos y revestimientos de cierto grosor. [1]

Los **productos intumescentes** se hinchan ante la acción del fuego formando una capa aislante que protege el elemento retrasando su combustión. La durabilidad de estos sistemas sólo puede garantizarse por un plazo de 5 a 10 años, transcurrido el cual deben renovarse. Existen barnices intumescentes transparentes que pueden utilizarse para proteger la madera manteniendo las características estéticas naturales del material. [1]

La utilización de **sales inorgánicas** disueltas en agua y aplicadas a la madera mediante inmersión de la pieza o pulverizado es otra posibilidad de tratamiento superficial, aunque su eficacia no es muy elevada al ser reducida la cantidad de sales depositadas. Este tratamiento no debe aplicarse en madera expuesta al exterior ya que las sales son lavables. [1]

Los **enlucidos o revestimientos** se pueden utilizar en forma de planchas que se unen a la madera o proyectándolas mediante su pulverización sobre la superficie de la madera. Uno de los materiales más empleados para este tipo de protección es el yeso en forma de placas o proyectado a pistola sobre una armadura metálica colocada sobre la superficie de la madera para mejorar su adherencia.

Otros materiales de revestimiento que desempeñan la misma función que el yeso y que se pueden aplicar sobre la madera son las planchas de fibrocemento, la lana de vidrio, la fibra cerámica, la vermiculita (silicatos alcalinos), la perlita (mezclas de óxidos metálicos con silicatos de calcio y de metales alcalinos), protecciones calcáreas (cal, escorias de altos hornos, etc.), etc.

Sin embargo, al igual que los productos intumescentes y las soluciones salinas, su aplicación se limita a la madera instalada en interiores, no siendo adecuada para su aplicación en exteriores y en interiores donde la humedad relativa del aire pueda superar el 60%.

Otra gran desventaja de estas protecciones es que al colocarse sobre la madera, no permiten ver el aspecto de la misma, con lo que perdemos visibilidad de cualquier patología que le pueda ocurrir y en algunos casos, también, cierta estética. [1]

### 2.4.3 Clasificación de reacción y resistencia al fuego

**UNE-EN 13501-1:2002.** “Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego.” [21]

Las nuevas clases son **A1, A2, B, C, D, E, F** que se corresponden conceptualmente con las siguientes definiciones:

**A1:** No Combustible. Sin contribución en grado máximo al fuego

**A2:** No Combustible. Sin contribución en grado menor al fuego

**B:** Combustible. Contribución muy limitada al fuego

**C:** Combustible. Contribución limitada al fuego

**D:** Combustible. Contribución media al fuego

**E:** Combustible. Contribución alta al fuego

**F:** Sin clasificar

Asimismo, en los ensayos también cabe considerar las clasificaciones adicionales siguientes, que son de carácter obligatorio en la mayoría de clases a pesar de que alguna de ellas pueda quedar exenta de clasificación adicional. Los conceptos a considerar son:

- *opacidad de los humos, s* (smoke) con denominación **s1, s2, s3**, para baja, media o alta opacidad de humos (incorpora los conceptos de velocidad de propagación y producción total de humos).

- *caída de gotas o partículas inflamadas, d* (drop) con denominación **d0, d1, d2**, para nula, media o alta caída de gotas o partículas inflamadas. [21]

Por último, la clasificación no sólo depende del comportamiento ante el fuego de los materiales, sino también de la forma en que éstos se colocan sobre los soportes ya que los ensayos de un mismo material sobre diferentes aplicaciones finales puede dar distintas clasificaciones. [21]

Consecuentemente, los materiales deben clasificarse según **su aplicación final**. La clasificación de los materiales para paredes y techos irán sin subíndice, para los suelos llevarán el subíndice **FL** (floor) y la de los productos lineales para aislamientos de tuberías llevarán el subíndice **L** (line). [21]

Se muestra la siguiente clasificación europea según las propiedades de reacción y resistencia al fuego de los elementos de construcción:

**UNE-EN 13501-2:2002.** “Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 2: Clasificación a partir de datos obtenidos de los ensayos de resistencia al fuego excluidas las instalaciones de ventilación.” [21]

Las principales nuevas clases son:

**R:** Capacidad portante (*resistance*)

**E:** Integridad (*integrity*)

**I:** Aislamiento (*insulation*)

Y también se contemplan las siguientes clasificaciones para algunos casos concretos:

**W:** Radiación

**M:** Acción mecánica

**C:** Cierre automático

**S:** Estanquidad al paso de los humos

**P o HP:** Continuidad de la alimentación eléctrica o de la transmisión de la señal

**G:** Resistencia a la combustión de hollines

**K:** Capacidad de protección contra incendios

**D:** Duración de la estabilidad a temperatura constante

**DH:** Duración de la estabilidad considerando la curva normalizada tiempo-temperatura

**F:** Funcionalidad de los extractores mecánicos de humo y calor

**B:** Funcionalidad de los extractores pasivos de humo y calor

La escala de tiempo normalizada según esta norma UNE es 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180 y 240 minutos. [21]

Con esta nueva clasificación, las clases se indican de la siguiente forma:

**R (t):** tiempo que se cumple la estabilidad al fuego o capacidad portante (*similar al concepto de estabilidad al fuego, EF*)

**RE (t):** tiempo que se cumple la estabilidad y la integridad al paso de las llamas y gases calientes (*similar al concepto de parallamas, PF*)

**REI (t):** tiempo que se cumple la estabilidad, la integridad y el aislamiento térmico (*similar al concepto de resistencia al fuego, RF*) [21]

En este apartado se exponen todos los ensayos que contempla la normativa clasificados según el sistema de euroclases de reacción al fuego. [1]

**Tabla 2.1 Sistema de Euroclases de reacción al fuego**

Sistema de Euroclases de reacción al fuego			
Materiales de construcción excepto revestimientos de suelo		Revestimientos de suelo	
Clases	Ensayos a realizar	Clases	Ensayos a realizar
A1	Ensayo de no combustibilidad EN ISO 1182 (+) Determinación del poder calorífico superior EN ISO 1716	A1 <sub>FL</sub>	Ensayo de no combustibilidad EN ISO 1182 (+) Determinación del poder calorífico superior EN ISO 1716
A2	Opción (1) Solo ensayo de no combustibilidad EN ISO 1182	A2 <sub>FL</sub>	Opción (1) Solo ensayo de no combustibilidad EN ISO 1182
	Opción (2) Determinación del poder calorífico superior EN ISO 1716 (+) Ensayo SBI Pr EN 13823		Opción (2) Determinación del poder calorífico superior EN ISO 1716 (+) Ensayo de panel radiante EN ISO 9239-1
B C D	Ensayo SBI pr EN 13823 (+) Ensayo de inflamabilidad EN ISO 11925-2	B <sub>FL</sub> C <sub>FL</sub> D <sub>FL</sub>	Ensayo SBI pr EN 13823 (+) Ensayo de inflamabilidad EN ISO 11925-2
E	Ensayo de inflamabilidad EN ISO 11925-2	E <sub>FL</sub>	Ensayo de inflamabilidad EN ISO 11925-2
F	Sin requisitos	F <sub>FL</sub>	Sin requisitos

## 2.5 Secado de la madera

Secar quiere decir eliminar el agua que está en exceso. Por tanto secar consistirá en reducir la humedad de la madera hasta un valor compatible con el uso previsto. Para conseguir este fin lo más rápidamente posible son necesarias las tres acciones siguientes:

- Suministrar el calor necesario para producir la evaporación del agua.
- Provocar el desplazamiento de la humedad desde el interior de la pieza hasta la superficie.
- Arrastrar de la superficie de la pieza el vapor de agua resultante de la evaporación.

Dentro del flujo de humedad que se pone en movimiento en el interior de la madera como consecuencia del secado, hay que distinguir entre el flujo de agua libre, el de la difusión del vapor de agua y del agua ligada.

Respecto del movimiento del agua libre, las punteaduras de paso (comunicaciones microscópicas entre células adyacentes) y, más en concreto, el tamaño y el número de los poros de sus membranas (a modo de tela que poseen las punteaduras) que cierran el orificio son las que definen la mayor o menor facilidad del flujo. [3]

Por otra parte, dado que las punteaduras de paso se disponen mayoritariamente en las caras radiales de los elementos longitudinales (fibras, traqueidas, etc.), a circulación interna será más acusada en la dirección tangencial que en la radial. Es necesario también tomar en consideración que la circulación radial viene especialmente favorecida por la presencia de los radios leñosos y, en especial, por la presencia en estos últimos de los canales resiníferos radiales (coníferas), lo que puede hacer que la permeabilidad radial resulte, en ocasiones, más acusada que la tangencial. A este respecto no existe una clara opinión entre los expertos ya que en función de la estructura anatómica de la madera pueden darse resultados completamente distintos. [3]

Extraemos de lo anterior y de otros diversos fundamentos no expuestos las siguientes conclusiones interesantes para el proyecto que se va a realizar:

- Que el secado es más rápido en las maderas ligeras que en las pesadas.
- Que las coníferas (pinos, abetos, alerces, etc.) de crecimiento rápido secan más rápidamente que las de crecimiento lento (incluso para la misma especie).
- Que el tipo de aserrado tiene, sin duda, también efecto sobre la velocidad del secado, si bien este efecto no sigue una pauta fija, dependiendo de la especie de madera de que se trate. En general las tablas de aserrado tangencial parecen secar más rápidamente que las de aserrado radial.

- Que el duramen, pese a tener menor contenido de humedad (40-50%) seca más lentamente que la albura (100-200% de humedad), ya que en muchos casos las punteaduras quedan bloqueadas, bien por la aspiración del torus, bien por la acumulación de sustancias impregnantes sobre el margo.
- Que la madera rehumedecida tras un tratamiento con sales o con productos hidrodispersables seca más lentamente que la madera verde. Este comportamiento suele ser debido a la aspiración del toro de las punteaduras (coníferas) o al depósito de sustancias impermeables sobre el margo. Esto explica también porqué la madera rehumedecida posee una permeabilidad menor que la madera verde. [3]

### 2.5.1 Humedad de la madera

La humedad de la madera o contenido de humedad de la madera se define como el cociente entre la masa de agua presente y la masa anhidra de la madera, expresado en tanto por ciento.

$$H(\%) = (M_h - M_0) / M_0 \times 100$$

H: Humedad de la madera (%)

$M_h$ : Masa de la madera húmeda

$M_0$ : Masa de la madera totalmente seca (anhidra)

La humedad de la madera en estado completamente verde presenta grandes variaciones de unas especies a otras y también según la posición dentro del árbol y de la época de corta. Por ejemplo, en la albura de las coníferas es habitual considerar valores del 150 al 160%, del 200% en el chopo y pino radiata y del 80 al 90% en la mayoría de las frondosas europeas. El duramen contiene notablemente menos humedad, considerándose valores máximos del 70 al 80%. [3]

El agua está presente en la madera como vapor de agua, como agua libre y como agua ligada.

El **agua libre** está presente en la madera de forma líquida rellenando el interior de las cavidades celulares (lúmenes). Está presente cuando la madera tiene un contenido de humedad superior al Punto de Saturación de las Fibras (que como media se considera un valor del 30%), pero desaparece cuando está por debajo de este umbral. [3]

El proceso de secado elimina en primer lugar todo el agua libre y a continuación empieza a eliminar una parte del agua ligada. La eliminación del agua libre superficial se realiza rápidamente y el consumo específico (kWh/l) de energía que requiere es relativamente bajo, ya que el agua libre está muy débilmente ligada a la madera. Una vez perdido esta agua

superficial el proceso se va interiorizando adentrándose en el interior de la estructura de la madera. Cuando esto ocurre es cuando realmente comienza el proceso del secado de la madera. [3]

Durante el secado, la madera va perdiendo su agua libre interior hasta que llega al PSF en el que ya no tiene más agua libre que perder. Durante esta fase no se producen cambios dimensionales en la madera, ya que se ha eliminado el agua que se encontraba en el interior del lumen de las células pero todavía no la contenida en el interior de la pared celular. [3]

El **agua ligada** está fijada en las paredes celulares mediante fuerzas de gran intensidad de tipo físico o químico. Su eliminación es más lenta y según el secado avanza. Tanto el tiempo como la cantidad de energía que es necesario aportar aumentan, ya que el agua remanente está cada vez más ligada a las paredes celulares de las células de la madera. Durante esta fase la pérdida de humedad conlleva cambios dimensionales (mermas o contracciones). [3]

En la tabla adjunta a continuación se expone la terminología utilizada para referirse a los distintos grados de humedad de la madera:

**Tabla 2.2 Estados de la madera según su humedad**

Estado de la madera	Humedad (%)	Comentarios
Verde	>30	En pie o recién cortada
Saturada (PSF)	30	Expuesta al aire saturado
Semi-seca	23-30	Presecada u oreada
Comercialmente seca (Shipping-dry)	18-22	Lista para el transporte. Humedad de equilibrio en transporte marítimo
Seca al aire	13-17	Seca al aire (humedad límite en secado al aire)
Seca en cámara	<13	Secada artificialmente (en cámara o secadero)
Anhidra	0	Secada en estufa (Laboratorio)

### Medida de la humedad

Los métodos más empleados para medir la humedad de la madera son el de pesadas (método de estufa) y el de xilohigrómetro. Ambos métodos se encuentran actualmente perfectamente descritos, de acuerdo con lo establecido en las normas (europeas) UNE-EN 13183-1, 2 Y 3.



- **Por pesadas (método de estufa).**

Se trata de un método lento y destructivo pero muy exacto, que consiste en extraer una muestra de madera representativa (suficientemente alejada de bordes, testas y sin defectos significativos como nudos o bolsas de resina) de la pieza a la que se le quiere calcular la humedad. Extraída la muestra es pesada en una balanza, determinándose de esta forma su masa húmeda ( $M_h$ ). Posteriormente la muestra es introducida en una estufa a  $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$  hasta que alcanza una masa constante (normalmente en 24-48 horas, según tamaño de probeta), momento en el que se vuelve a pesar determinando su masa anhidra ( $M_0$ ).

- **Mediante xilohigrómetro.**

Existen dos tipos de xilohigrómetro: de resistencia y de capacitancia. Ambos son métodos instantáneos, no destructivos y menos exactos que el anterior (de estufa), pero de precisión suficiente para la industria en el intervalo 7-27%. El método de resistencia es el más extendido, siendo además el habitualmente empleado para monitorizar a distancia la evolución de la humedad de la madera durante el secado industrial. [3]

### 2.5.2. Movimiento del agua en la madera

El secado de la madera es un fenómeno consistente en la eliminación superficial del agua, a la vez que esta migra desde el interior hacia el exterior de la madera. Conforme avanza el secado, el frente de evaporación, que al principio estaba en la superficie, se interioriza dentro de la madera por lo que el proceso de evaporación se efectuará en su seno, migrando el agua, en forma de vapor y de agua ligada, mediante un fenómeno que sigue las leyes de la difusión, desde el frente de evaporación hasta la superficie exterior de la madera. El fenómeno termina cuando la pieza de madera alcanza en su conjunto la humedad de equilibrio higroscópico (HEH). [3]

Cuando la madera se encuentra en estado verde, el agua líquida rellena todas las cavidades celulares, existiendo normalmente burbujas de aire en su seno. El proceso de circulación del agua libre desde el interior hacia el frente de evaporación, donde pasa a estado gaseoso, se efectúa por la acción de fuerzas de tipo capilar, generadas por la existencia de meniscos en las interfases aire-agua de los poros de las membranas de las punteaduras. El proceso en esta fase es altamente dependiente del tamaño de los capilares donde se generan los citados meniscos, siendo las fuerzas tanto mayores conforme estos capilares son más estrechos. [3]

La presencia de burbujas de aire en el interior del agua líquida presente en el interior de la célula ayuda en el proceso ya que el calentamiento del aire interior, por acción de la

temperatura, obliga a su dilatación, empujando al agua hacia el exterior a través de los capilares citados. [3]

Evaporada el agua líquida ésta tiene que migrar, por difusión, desde el frente de evaporación hasta la superficie de la pieza, donde es eliminada por el aire que circula dentro del secadero. Este fenómeno regirá el proceso de secado desde su principio si la madera es introducida ya presecada (contenido de humedad inferior al 30%) en el secadero. [3]

La difusión es un fenómeno conocido que sigue unas leyes determinadas y que puede ser debido a la existencia de gradientes de humedad (la humedad migra de las zonas de alta concentración a las de baja concentración), de temperatura (la humedad migra de las zonas calientes a las frías), a su combinación o a causas algo más complejas, actualmente en estudio. En estas circunstancias, una buena práctica de secado tratará de conseguir que los gradientes de temperatura y humedad actúen en el mismo sentido, o que su balance sea positivo hacia el exterior, de forma que la humedad migre desde el interior hacia el exterior de la forma más rápida posible. [3]

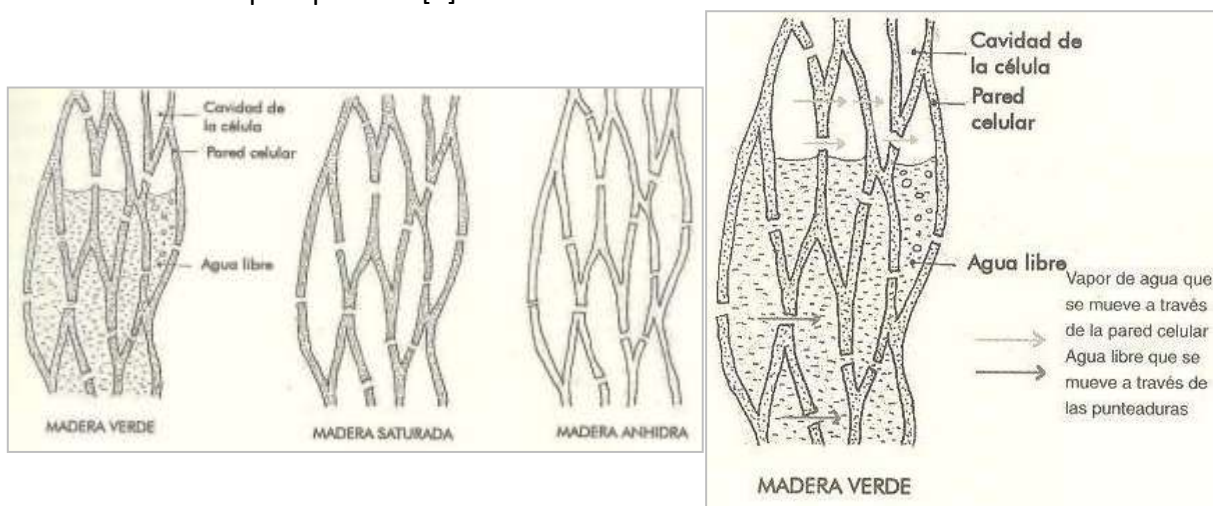


Figura 2.7 Esquema del movimiento del agua líquida y del vapor de agua dentro de la madera. [3]

El proceso de la difusión depende de la temperatura. El valor del coeficiente de difusión aumenta exponencialmente con la temperatura, motivo por lo cual por debajo del PSF el secado es más rápido conforme mayor sea la temperatura de la madera. Es por esta razón por la cual al ir disminuyendo el contenido de humedad e ir ralentizándose el proceso de la difusión, es necesario aumentar la temperatura gradualmente para conseguir que el ritmo de la difusión se mantenga constante. Esta es la causa de que los programas de secado hagan uso de temperaturas cada vez más altas y humedades relativas cada vez más bajas en el secadero conforme el contenido de humedad disminuye. [3]

## 2.6. Sistemas de verificación de la impregnación

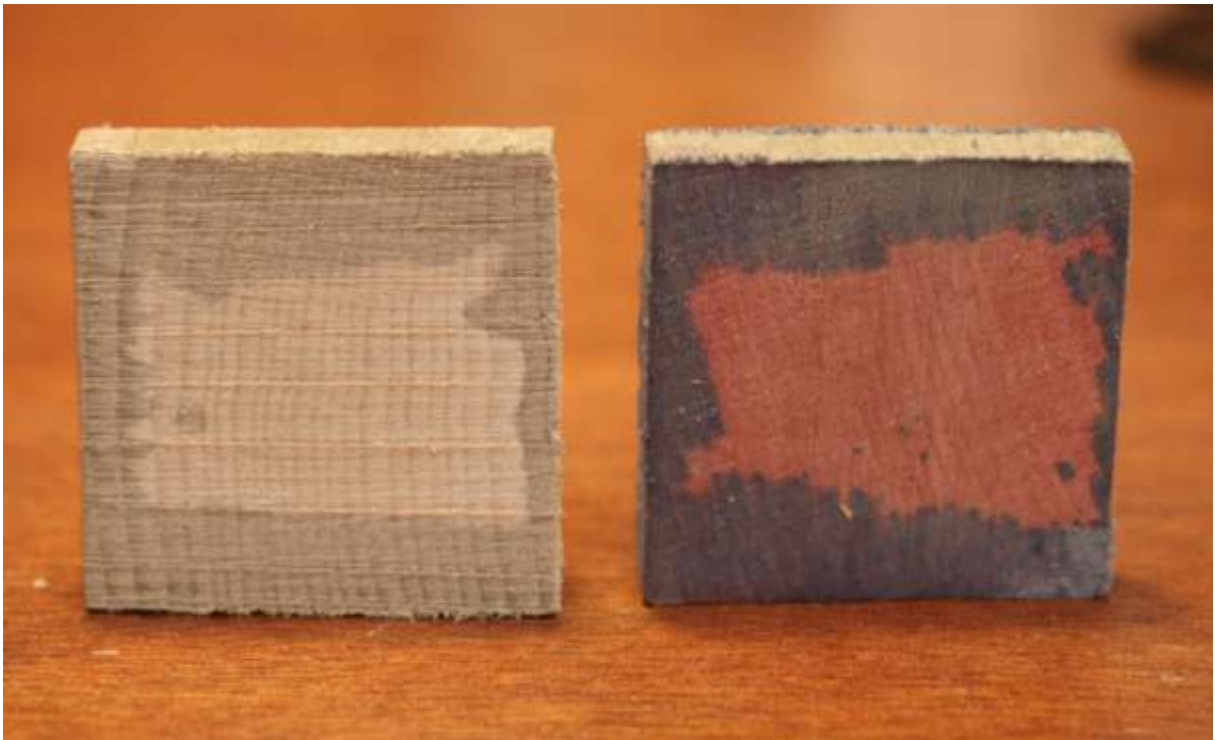
Con motivo de poder comprobar que los tratamientos de impregnación se han ejecutado o se van a ejecutar correctamente, existen diversos métodos para analizarlos y validarlos, y algunos de los cuales están explicados a continuación.

### 2.6.1 Reactivos

Un método para controlar la profundidad de penetración de un producto protector puede ser el de buscar los reactivos que lo hagan visible, es decir, combinar el reactivo con el producto protector para que reaccionen y se produzca una coloración de la madera, dejando la parte que no está impregnada con el color original y tiñendo, obviamente, sólo donde haya ignífugo. Se puede ver un ejemplo del resultado de la reacción en la foto adjunta en este mismo apartado.

Lo primero, es necesario conocer el producto o principio activo para poder buscar un reactivo que lo haga visible y esta información normalmente la facilita el fabricante del producto protector.

En cuanto a reglamentación de este tipo de ensayo, no se conoce, hasta ahora, ninguna norma que regule esta metodología.



*Figura 2.8 Verificación de la profundidad de impregnación mediante reactivos. Fotografía cedida por los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes (Madrid)*

### 2.6.2 Colorantes

Una alternativa al método explicado en el apartado anterior es el uso de colorantes junto con el producto protector, y tampoco existe normativa alguna que regule este ensayo. Se basa en la teoría de mezclar un colorante comercial (que sea compatible con el ignifugante y que contraste con el color original de la madera) con el producto protector que se desee utilizar, antes de la impregnación. Al tratar la pieza con la mezcla ya realizada, la profundidad a la que llegue el colorante será la misma a la que llegue el ignifugante.

Un colorante es una sustancia que es capaz de teñir las fibras vegetales y animales. Los colorantes se han usado desde los tiempos más remotos, empleándose para ello diversas materias procedentes de vegetales (cúrcuma, índigo natural, etc.) y de animales (cochinilla, moluscos, etc.) así como distintos minerales. [28]

En química, se llama colorante a la sustancia capaz de absorber determinadas longitudes de onda de espectro visible. Los colorantes son sustancias que se fijan en otras sustancias y las dotan de color de manera estable ante factores físicos/químicos como por ejemplo: luz, lavados, agentes oxidantes, etc. [28]

Existen muchas marcas comerciales en el mercado, unas diseñadas para ropa, otras para la madera, etc. Actualmente lo más utilizados son los sintéticos y se podrían clasificar de la siguiente manera:

- *Colorantes ácidos*: su proceso de tinción está fundado en la formación de una sal constituida por un grupo NH<sub>2</sub> de una proteína y grupos ácidos HSO<sub>3</sub> y COOH del colorante. Los ácidos más utilizados son el ácido sulfúrico, el ácido fórmico, el ácido tartárico o el ácido acético. Se emplean como colorantes de algodón, seda, lana, cuero y poliamidas.
- *Colorantes básicos*: son colorantes con grupos nitrógeno básicos, que se encuentran en solución, entre ellos destacan las sales clorhídricas, fosfóricas, sulfúricas o acéticas. Poseen unas tonalidades vivas y fuertes. Son inestables a la luz por lo que no se emplean en artículos que requieran una gran fijeza del color. Se utilizan en cueros, papel, algodón, seda viscosa y lana celulósica. Los colorantes básicos no se fijan directamente a las fibras por lo que requieren el empleo de un mordiente.
- *Colorantes de alquitrán*: son colorantes orgánicos que se obtienen por el fraccionamiento del alquitrán de la hulla. Tiñen tanto la fibra vegetal como la animal.
- *Colorantes a la grasa*: son los colorantes de la anilina. Se disuelven en aceites, grasas e hidrocarburos. Se utilizan como colorantes de cueros, lacas, alimentos, calzado, etc.
- *Colorantes de tina*: colorantes insolubles en agua. Se obtienen por reducción alcalina de leuco-derivados hidrosolubles de carácter fenólico y por oxidación de éstos ante la acción del aire. Todo el proceso se realiza sobre la fibra, de forma que el polvo fino conseguido quede fijado sobre el tejido por absorción. [28]

### 2.6.3 Microscopio

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de materiales inorgánicos y orgánicos, entregando información morfológica del material analizado. A partir de él se producen distintos tipos de señal que se generan desde la muestra y se utilizan para examinar muchas de sus características. Con él se pueden realizar estudios de los aspectos morfológicos de zonas microscópicas de los distintos materiales con los que trabajan los investigadores de la comunidad científica y las empresas privadas, además del procesamiento y análisis de las imágenes obtenidas. Las principales utilidades del SEM son:

- Observación a altos aumentos. La resolución de imagen conseguida por un microscopio electrónico de barrido es muy superior a la que se puede obtener mediante un microscopio óptico, ya que se emplean electrones (de mucha menor longitud de onda) en lugar de luz para formar la imagen.
- Estudios fractográficos. Gracias a la profundidad de campo que se consigue con este tipo de microscopios, es posible la observación de superficies de fractura a altos aumentos.
- Realización de análisis químicos en pequeñas áreas: fases intermetálicas, precipitados, partículas contaminantes, etc. [27]

El equipo empleado, ESEM Quanta 200 FEI, XTE 325/D83.95 permite trabajar en tres modos:

- Alto vacío. Es el modo en que trabajan los microscopios electrónicos convencionales, con una alta resolución de imagen y microanálisis. Presenta el inconveniente de que las muestras deben ser conductoras, por lo que si no lo son (o se encuentran embutidas en resina para observación metalográfica) deben recubrirse con películas conductoras como el oro o el grafito.
- Bajo vacío, hasta 1 Torr (133,32 Pa) aproximadamente. Permite observar muestras no conductoras sin recubrir, como puede ser el caso de pinturas o materiales cerámicos.
- Presión ambiental (ESEM), hasta 20 Torr (2.667 Pa). En este modo, además de muestras no conductoras, se pueden observar muestras orgánicas o muestras altamente hidratadas. [27]

El tamaño de la cámara de muestra de este equipo permite introducir muestras de hasta 280 mm de diámetro, y dispone de monitorización en cinco ejes. Posee una resolución de 3,5 nm ( $1 \times 10^{-6}$  mm) en todos los modos de trabajo.

Está equipado con los siguientes detectores:

- Detector convencional para la adquisición de imágenes de electrones secundarios en condiciones de alto vacío.

- Detector LFD (Large Fiel Detector), para la adquisición de imágenes en condiciones de bajo vacío.
- Detector ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope), para la adquisición en condiciones de muy bajo vacío.
- Detector EBSD (Electron Backscatter Diffraction), para la adquisición de patrones de difracción de electrones retrodifusos en alto y bajo vacío.
- Detector EDS (Energy Dispersive Spectrometer), permite coleccionar los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis e imágenes de distribución de elementos en superficies pulidas. [27]



*Figura 2.9* Microscopio electrónico de barrido

La imagen en el microscopio electrónico de barrido se forma al incidir un haz de electrones sobre una muestra determinada. Al incidir los electrones sobre la muestra, esta emite una serie de señales que permiten ser transformadas en imagen o que proporcionan información acerca de su composición química.



*Figura 2.10* Cámara de muestra

El haz de electrones o electrones primarios, al incidir en la superficie de la muestra genera electrones secundarios, los cuales se originan del espécimen y son colectados por un detector de electrones. Además de electrones secundarios, también se producen Rayos X, infrarrojos y ultravioleta.

El espécimen es colocado en una platina portaobjeto y puede ser desplazado o rotado en varias direcciones, permitiendo un amplio rango de posibilidades de observación.

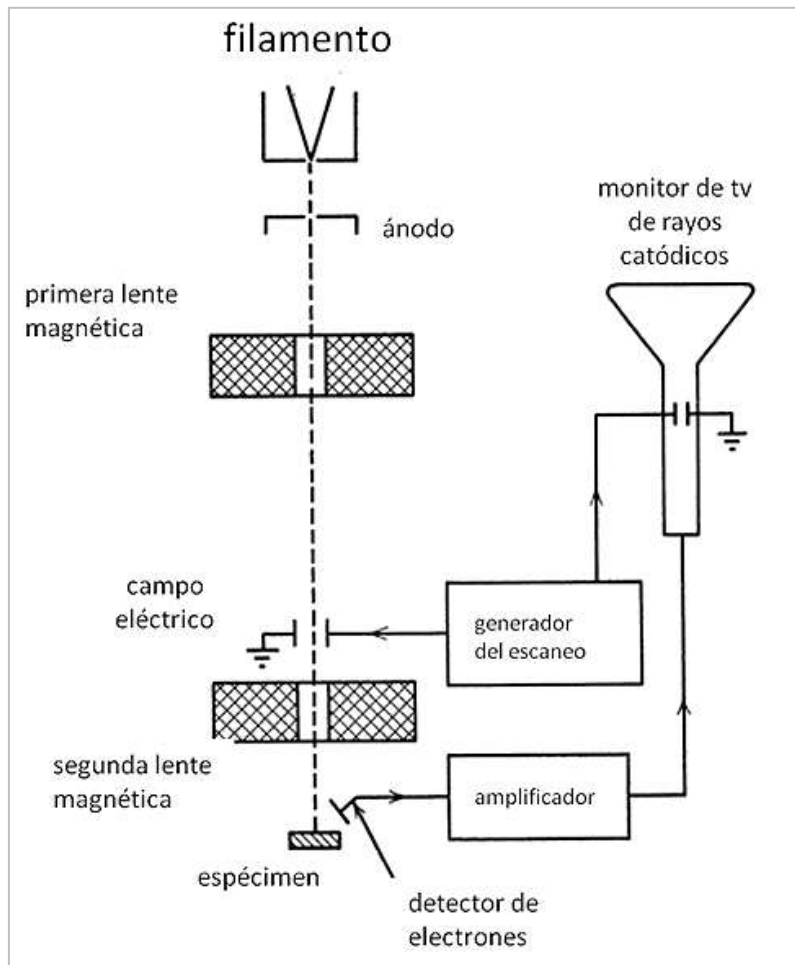


Figura 2.11 Diagrama esquemático que muestra los componentes fundamentales del microscopio electrónico de barrido.



## 2.7 Ensayos de fuego

### 2.7.1 Ensayo de reacción al fuego de los materiales de construcción

*Ensayo de goteo aplicable a los materiales fusibles*

Ensayo Complementario. **UNE 23-725-90**

#### Principio del método

El ensayo consiste en someter las probetas, en las condiciones que se indican más adelante, a la radiación de una fuente de calor constante y provocar eventualmente la inflamación de los gases desprendidos y la caída de gotas, inflamadas o no. [17]

#### Aparatos necesarios

El equipo comprende:

- Un radiador de una potencia nominal de 500 W cuya superficie radiante es un disco de cuarzo transparente de 100 mm  $\pm$ 5 mm de diámetro. El radiador se calibrará de forma que la energía radiada sobre una superficie paralela situada a 30mm de distancia sea de aproximadamente 3W/cm<sup>2</sup>.
- Un soporte de probeta formado por un anillo metálico movable, horizontal, de 118 mm de diámetro, sobre el que se sitúa una tela metálica inoxidable, la cual tiene una luz de malla de 2,10 mm x 2,10 mm y un diámetro de 0,7 mm.
- Un receptáculo de gotas en forma de cuba cilíndrica cuyo diámetro es de 118 mm y su profundidad es de 12 mm y va relleno de guata de celulosa (algodón hidrófilo 100% tipo sanitario).
- Una columna vertical soporta estos tres elementos.
- El radiador se coloca en la parte superior, con el disco radiante horizontal y hacia abajo. Puede elevarse ligeramente y girar horizontalmente. Un tope permite volverlo a su posición normal de trabajo. En posición normal de trabajo los ejes verticales del radiador, del portaprobetas y del receptáculo de gotas deben coincidir.
- Un vatímetro y un regulador de tensión
- Un cronómetro
- Una campana. El equipo de ensayo se coloca en el interior de una campana en la que el sistema de ventilación no esté en funcionamiento durante el ensayo. [17]

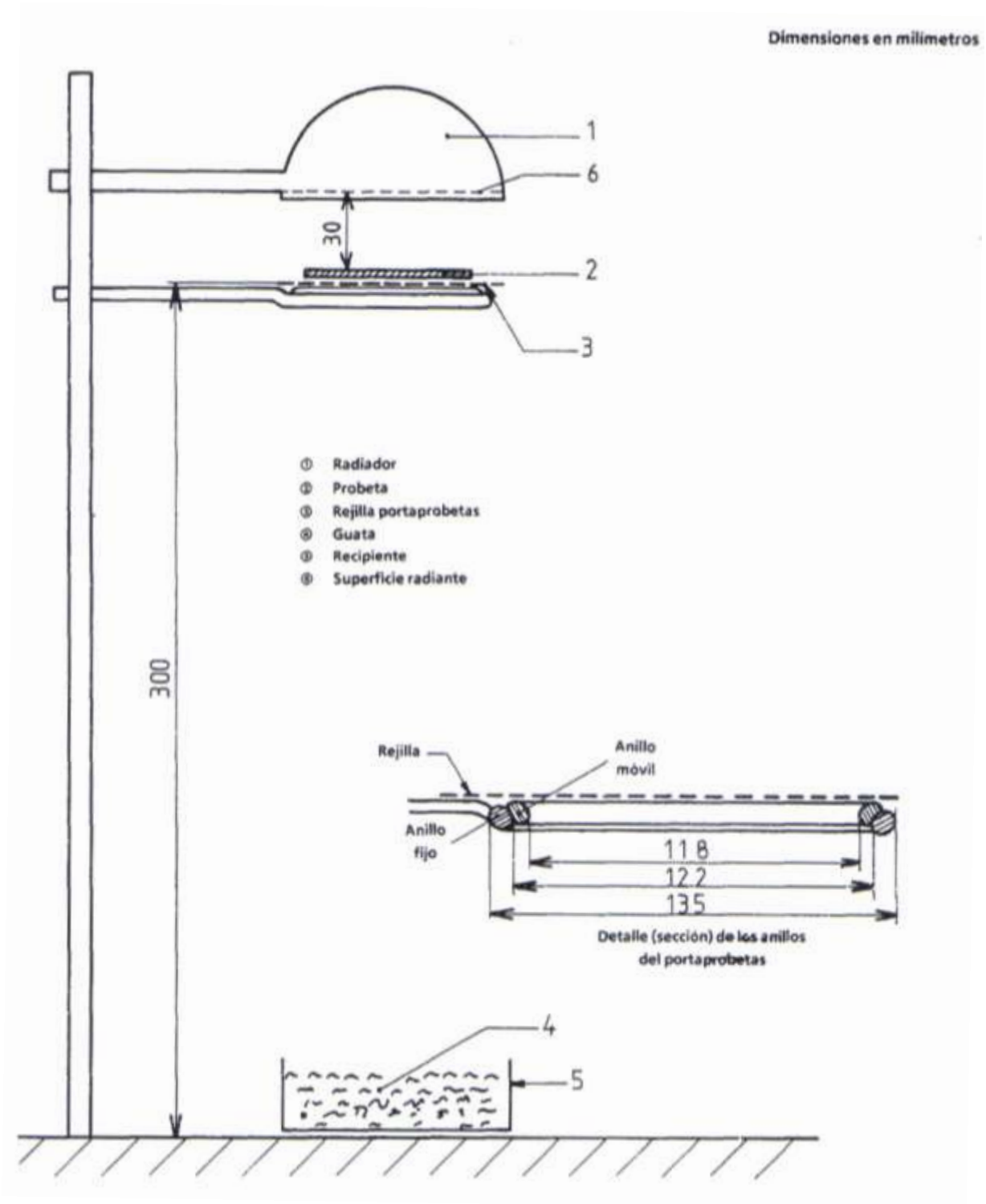


Figura 2.12 Ensayo complementario para materiales fusibles [17]

### Probetas

Se cortarán de las muestras cuadrados de 70 mm de lado para formar, por apilamiento de cuadrados si es necesario, probetas de una masa, como mínimo igual a 2g.

Al menos, cuatro probetas por muestra y ocho probetas para las muestras a ensayar sobre sus dos caras. Las probetas y la guata de celulosa se acondicionan antes del ensayo en un recinto mantenido a  $23^{\circ}\text{C}\pm 3^{\circ}\text{C}$  y  $50\%\pm 10\%$  de humedad relativa, hasta la obtención de un peso constante ( $\pm 2\%$ ). [17]

### Método operatorio

Se procede al calibrado del radiador cada vez que sea necesario, con una tolerancia respecto a la curva de +5,0 %.

Se pone una probeta (de 2 g como mínimo) sobre el portaprobetas en el que la rejilla debe estar perfectamente limpia. Se montan sobre la columna vertical el radiador, el portaprobetas y el receptáculo de las gotas, de manera que:

- La superficie radiante del radiador se encuentre exactamente a 30 mm de la cara superior de la probeta.
- El receptáculo de gotas, relleno de guata de celulosa, se encuentre a 300 mm debajo de la rejilla del portaprobetas. La guata se reemplaza en cada ensayo.
- Se coloca el radiador de manera que no radie a la probeta y se conecta. [17]

### Ensayo propiamente dicho

Después de esperar hasta que el radiador esté en régimen estacionario, aproximadamente 45 min, se dispone el radiador en la posición de ensayo y se conecta el cronómetro (tiempo 0 de ensayo).

Si el material funde, se encoge o se expande, se modificará la altura del radiador de modo que la distancia entre la superficie radiante y la cara superior de la probeta se mantenga lo más próxima posible a 30mm.

Si la probeta se inflama, se aparta el radiador pasados 3 s. Se vuelve a poner en su sitio cuando aquella se apague y se repite el mismo proceso tantas veces como sea necesario durante los 5 primeros minutos del ensayo.

A partir de este momento, si la probeta está apagada, se deja el radiador en la posición de ensayo aun cuando se produzca una inflamación posterior. Y si la probeta está encendida, se espera hasta su extinción y se vuelve a poner el radiador en la posición de ensayo definitivamente. [17]

En ambos casos se continúa el ensayo durante 5 minutos suplementarios:

- a) Se efectúa el ensayo 4 veces en las mismas condiciones con las 4 probetas correspondientes a la muestra.
- b) Cuando la muestra deba ser ensayada sobre sus dos caras, el ensayo se hará sobre 8 probetas (4 probetas por cara expuesta).

En caso de comportamiento contradictorio entre las series a) y b), se repetirá el ensayo sobre un número igual de probetas.

La serie de ensayos más desfavorable será la escogida para la clasificación. [17]

#### Expresión de resultados

Se deben anotar los fenómenos siguientes:

- La eventual caída de gotas, inflamadas o no.
- La eventual inflamación de la guata de celulosa.
- Los tiempos en los que se producen las diversas inflamaciones, la duración de éstas y la longitud de las llamas. Las inflamaciones no son consideradas como efectivas si no persisten durante al menos 3 s.
- La emisión y características de los humos.
- El aspecto y la cantidad del residuo. [17]

#### Informe del ensayo

El informe del ensayo debe mencionar los aspectos siguientes:

- Nombre del fabricante del material.
- Naturaleza, tipo y referencia comercial del material.
- Fecha de recepción del material y fecha de ensayo.
- Referencia a esta norma.
- Espesor de las probetas.
- Fenómenos observados.
- Resultados obtenidos. [17]

## 2.7.2. Determinación del comportamiento al fuego mediante el índice de oxígeno

*Parte 2: Ensayo a temperatura ambiente*

**(ISO 4589-2:1996)**

Esta parte de la Norma ISO 4589 especifica métodos para determinar la concentración mínima de oxígeno, mezclado con nitrógeno que soportará la combustión de probetas pequeñas en posición vertical en las condiciones de ensayo especificadas. Los resultados se definen como los valores del índice de oxígeno. [16]

Los métodos se definen para los materiales de ensayo rígidos en forma de barras verticales u hojas de un espesor máximo de 10,5 mm. Estos métodos son adecuados para materiales sólidos, laminados o celulares caracterizados por una densidad aparente superior a 100 Kg/m<sup>3</sup>. Los métodos también pueden aplicarse a algunos materiales celulares que tengan una densidad aparente inferior a 100 Kg/m<sup>3</sup>. Se proporciona un método para ensayar materiales en forma de hoja o película flexible siempre que estos se suspendan en posición vertical. [16]

### Definición

Índice de oxígeno: Mínima concentración de oxígeno, expresada en porcentaje en volumen, en una mezcla de oxígeno y nitrógeno introducido a 23°C±2°C que soportará la combustión de un material en las condiciones de ensayo especificadas. [16]

### Principio del método

Una probeta pequeña se somete, verticalmente, a una mezcla de oxígeno y nitrógeno que fluye hacia arriba a través de una chimenea transparente. Se enciende el extremo superior de la probeta y se observa el comportamiento de combustión de la probeta para comparar el período durante el cual continúa la combustión. Mediante el ensayo de una serie de probetas a diferentes concentraciones de oxígeno se estima la concentración de oxígeno mínima. [16]

Alternativamente, para la comparación con un valor del índice de oxígeno mínimo especificado, se ensayan tres probetas empleando la concentración correspondiente de oxígeno, se requiere que, al menos, dos de ellas se apaguen antes de que se sobrepase el criterio correspondiente de combustión. [16]

### Aparatos

- *Chimenea de ensayo*, que consta de un tubo de vidrio resistente al calor soportado verticalmente sobre una base a través de la cual pueden introducirse las mezclas de gases que contienen oxígeno.

Las dimensiones recomendadas de la chimenea son, como mínimo, 450 mm de altura y, como mínimo, 95 mm de diámetro. El suelo de la chimenea o la base sobre la cual se sujeta la chimenea, debe incorporar un dispositivo para distribuir por igual la mezcla de gases que entra en la chimenea. El dispositivo recomendado comprende un difusor adecuado y una cámara de mezcla con un recubrimiento metálico. Puede montarse una pantalla porosa por debajo del nivel del soporte de las probetas, para evitar que caigan residuos de combustión y que ensucien la entrada de los gases y los canales de distribución.

- *Soporte de las probetas*, adecuado para mantener una probeta, verticalmente, en el centro de la chimenea.

Para materiales que se mantienen en posición vertical por sí mismos, la probeta debe sujetarse con la ayuda de una mordaza separada, como mínimo, unos 15 mm del punto más próximo en el cual la probeta puede arder antes de que se sobrepase el criterio correspondiente a la extensión de la combustión.

- *Suministros de gas*, que comprende fuentes presurizadas de oxígeno y/o nitrógeno de pureza no inferior al 98% (*m/m*) y/o aire limpio [que contiene 20,9% (*V/V*) oxígeno] según proceda.

Las líneas de alimentación del gas deben conectarse de manera que los gases estén bien mezclados antes de que entren en el dispositivo de distribución de gases en la base de la chimenea, de forma que la variación en la concentración de oxígeno en la mezcla de gases que asciende por la chimenea, por debajo del nivel de la probeta, sea  $< 0,2\%$  (*V/V*).

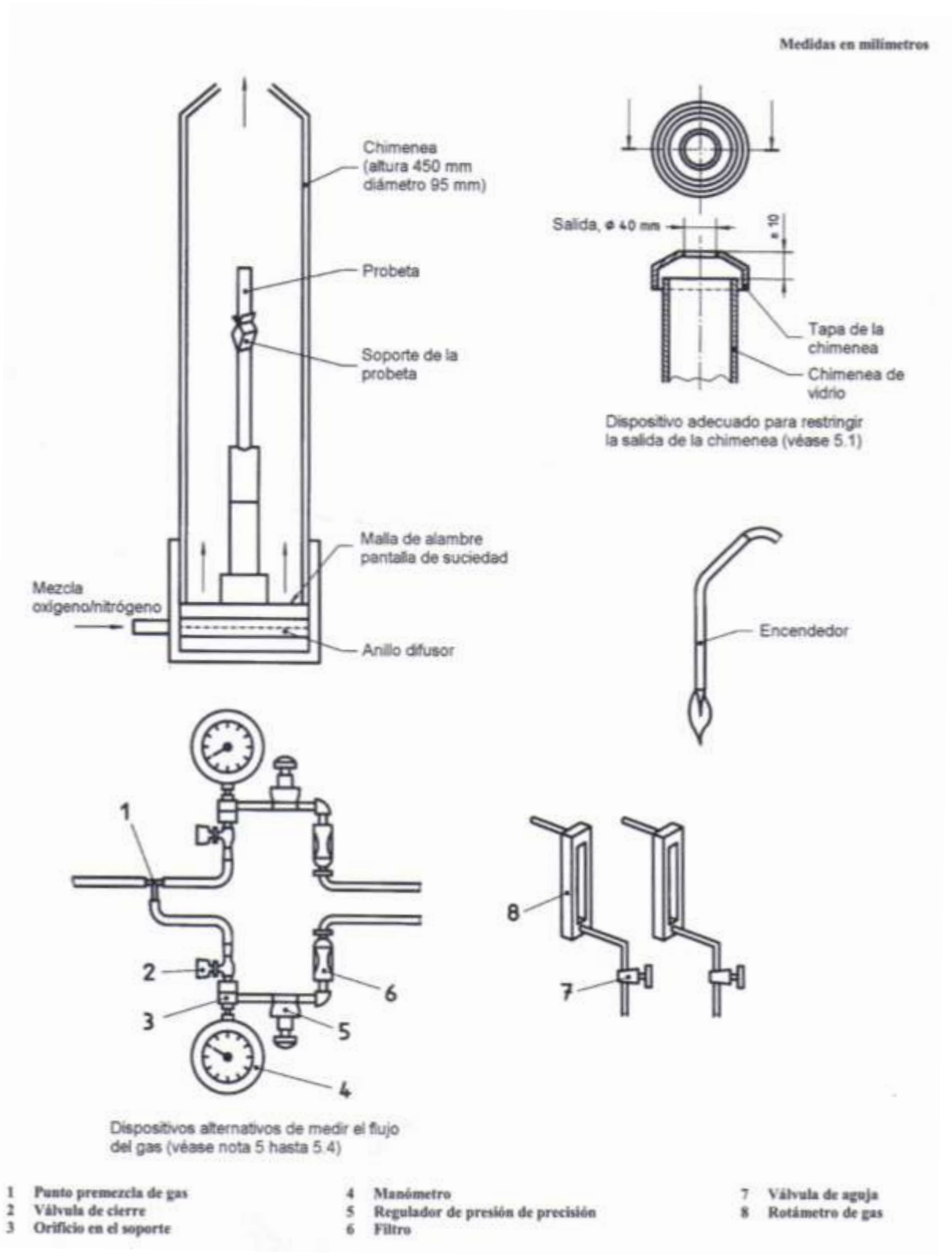


Figura 2.13 Diagrama del aparato típico para determinación del índice de oxígeno [16]

- *Encendedor de la llama*, que comprende un tubo que puede insertarse dentro de la chimenea para aplicar a las probetas una llama procedente de una salida de  $2\text{mm} \pm 1\text{mm}$  de diámetro en el extremo del tubo.  
El combustible de la llama debe ser propano, sin aire mezclado previamente. La alimentación de combustible debe regularse de forma que la llama se proyecte  $16\text{mm} \pm 4\text{mm}$ , verticalmente hacia abajo desde la salida, cuando el tubo esté vertical dentro de la chimenea, y la llama está ardiendo dentro de la atmósfera de la chimenea.
- *Cronómetro* capaz de medir períodos de hasta 5 min con una exactitud de  $\pm 0,5$  s.
- *Sistema de extracción de humos*, proporcionando suficiente ventilación o aspiración para eliminar los humos u hollín expulsados por la chimenea sin perturbar el flujo de gases o las temperaturas en la chimenea. [16]

#### Preparación de las probetas

Se obtiene una muestra suficiente para la preparación de, al menos, 15 probetas. Las dimensiones de las probetas con forma II (materiales celulares) deben tener las siguientes dimensiones:

- longitud: 80 a 150 mm
- anchura:  $10 \pm 0,5$  mm
- espesor:  $10 \pm 0,5$  mm

Debe comprobarse que las superficies de las probetas estén limpias y libres de defectos que podrían afectar el comportamiento frente al fuego, por ejemplo, ráfagas periféricas de moldeo o rebabas del mecanizado.

Se anota la posición y orientación de las probetas con respecto a cualquier asimetría en el material de la muestra.

Para calcular la distancia sobre la que una probeta arde, ésta puede marcarse con líneas transversales a uno o más niveles, que dependen de la forma de la probeta y del procedimiento de ignición a utilizar. Las probetas que se sujetan por sí mismas se marcan preferentemente en dos caras adyacentes, como mínimo. Si se utilizan tintas líquidas, las marcas deben estar secas antes de que se inicie la ignición de la probeta. Para el ensayo de ignición de la superficie superior deben marcarse las probetas a 50 mm del final del extremo donde se va a iniciar la ignición. [16]



A menos que se especifique lo contrario en otras normas establecidas, cada probeta debe acondicionarse, como mínimo, 88h a  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y  $(50 \pm 5) \%$  humedad relativa antes de su utilización. [16]

#### Procedimiento para la determinación del índice de oxígeno.

Se selecciona una concentración inicial del oxígeno a utilizar. Si es posible puede basarse en la experiencia de los resultados obtenidos para materiales similares. Alternativamente, se intenta encender una probeta en el aire y se anota el comportamiento de combustión. Si la probeta se quema rápidamente se selecciona una concentración inicial de, aproximadamente, el 18% (V/V) de oxígeno; si la probeta arde lentamente o de forma irregular, se selecciona una concentración inicial de oxígeno de, aproximadamente, el 21% (V/V); si la probeta no continua ardiendo en aire, se selecciona una concentración inicial de, al menos, el 25% (V/V), dependiendo de la dificultad de ignición o del período de combustión antes de apagarse en el aire. [16]

Debe comprobarse que la chimenea de ensayo esté vertical. Se monta una probeta verticalmente en el centro de la chimenea, de forma que la parte superior de la probeta esté, como mínimo, 100 mm por debajo de la parte superior abierta de la chimenea y la parte inferior expuesta de la probeta esté, como mínimo, 100 mm por encima del dispositivo de distribución de gases en la base de la chimenea. [16]

Se regulan los controles de mezcla y flujo de gases de forma que una mezcla de oxígeno/nitrógeno a  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , que contenga la concentración deseada de oxígeno fluya a través de la chimenea a  $40 \text{ mm/s} \pm 2 \text{ mm/s}$ . Se deja que el flujo de gases purgue la chimenea durante, al menos, 30 s antes de la ignición de cada probeta y se mantiene el flujo sin cambio durante la ignición y combustión de cada probeta. [16]

#### *Procedimiento A. Ignición de la superficie superior*

Para la ignición de la superficie superior, se utiliza un encendedor para iniciar la combustión sólo en la superficie superior del extremo del extremo superior de la probeta.

Se aplica la parte visible más baja de la llama a la parte superior de la probeta empleando un movimiento de barrido, si es necesario, para cubrir toda la superficie, pero teniendo cuidado de no mantener la llama contra las caras verticales o bordes de la probeta. Se aplica la llama durante 30 s, retirándola cada 5s para tener el tiempo suficiente de observar si la superficie superior entera de la probeta está ardiendo o no.

Considerando la probeta que ha de ser encendida, e iniciando la medición del período y de la distancia de combustión, tan pronto como se haya retirado el encendedor después del incremento del período de contacto de 5 s, se aprecia si toda la superficie superior de la probeta está ardiendo. [16]

**Tabla 2.3 Criterios para medición del índice de oxígeno**

Forma de las probetas	Procedimiento de ignición	Criterios alternativos	
		Duración de la combustión tras la ignición (s)	Extensión de la combustión
I, II, III y IV	A Ignición de la superficie superior	180	50 mm por debajo de la parte superior de la probeta

La medición del período de combustión se inicia inmediatamente después de que la probeta se haya encendido y se observa su comportamiento de combustión. Si cesa la combustión, pero ocurre una nueva ignición espontánea antes de que haya transcurrido 1 s se continúa con la observación y las mediciones.

Si ni la duración ni la extensión de la combustión exceden el límite correspondiente especificado en la tabla para la probeta aplicable, se anota la duración y la extensión de la combustión. Se indica como respuesta "O".

Alternativamente, si la duración o la extensión de la combustión exceden el límite correspondiente, se anota el comportamiento de combustión correspondiente y se apaga la llama. Se indica como respuesta "X".

Se anotan también las características de combustión del material, por ejemplo, goteo, carbonización, combustión irregular, combustión incandescente o incandescencia residual. [16]

Durante el ensayo, se selecciona la concentración de oxígeno a utilizar para ensayar la próxima probeta de la siguiente manera:

- a) Disminuir la concentración de oxígeno si el comportamiento de la probeta anterior dio una respuesta "X";
- b) Incrementar la concentración de oxígeno si la probeta anterior dio una respuesta "O".

Se repiten los procedimientos especificados anteriormente empleando cambios de concentración de oxígeno convenientemente elegidos hasta que se haya averiguado que las concentraciones de oxígeno, en porcentaje en volumen, difieren en  $\leq 1,0\%$  (V/V) y de las cuales una dio una respuesta "O" y la otra una respuesta "X".

De este par de concentraciones de oxígeno, se anota aquella que dio la respuesta "O" como nivel de concentración de oxígeno preliminar. [16]

## 2.8 Lixiviación

La lixiviación, o extracción sólido-líquido, es un proceso en el que un disolvente líquido pasa a través de un sólido pulverizado para que se produzca la elución de uno o más de los componentes solubles del sólido. Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos pueden difundirse desde el sólido a la fase líquida, lo que produce una separación de los componentes originales del sólido.

Con el fin de estudiar la aplicación de la madera en exteriores y los tratamientos realizados en ella, se ha considerado realizar un ensayo de lixiviación para comprobar si el producto impregnado en el sólido, es decir, en la madera, es extraído o no por el disolvente líquido.

De esta forma se comprueba si la protección frente al fuego que se le ha dado a la madera se mantiene a la intemperie o, por el contrario, lixiviana.

Este ensayo está regulado por la normativa vigente “UNE EN 12457: *Caracterización de residuos, lixiviación, ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos.*” [18]

Puesto que en el ensayo con maderas no se trata de un material granular, éste se ha tenido que adaptar con respecto a la norma citada anteriormente.

## **CAPÍTULO 3: PREPARACIÓN DEL MATERIAL**

### **3.1 Introducción**

En este capítulo se explica la primera fase del estudio experimental, que consiste en preparar las muestras y los distintos productos con los que se van a tratar, así como el método empleado para la impregnación.

De los métodos de impregnación explicados en el capítulo 2, se ha optado por la ignifugación en profundidad. Ya que permite tratar la madera manteniendo su estética y su resistencia contra el fuego por más tiempo.

Dada la imposibilidad de realizar el estudio en autoclave, se ha buscado una alternativa que combina la impregnación por vacío y el sistema de inmersión.

### **3.2 Materiales empleados**

En los siguientes apartados se hace una relación de todos aquellos productos que han sido necesarios para la realización de este proyecto.

#### **3.2.1 Muestras de madera**

Para poder limitar el estudio de los tratamientos de la madera a un número factible de ensayos, suficiente para poder determinar unos resultados, y partiendo del proyecto anterior que se basaba en el estudio de dos tipos de madera muy habituales en España: madera de pino y haya; se ha seleccionado la madera de pino (concretamente de pino radiata), dado que se obtuvieron mejores resultados en el comportamiento frente al fuego que con la madera de haya.

Las muestras seleccionadas de madera de pino se han obtenido de dos listones de madera maciza, sin encolar y sin ningún tratamiento previo. Uno de ellos cortado en la cara axial y el otro en la radial.

Inicialmente se cortaron un total de 100 muestras, de las cuales se han acabado empleando 91: 13 de ellas se han utilizado para hacer las pruebas con el colorante, 6 cortadas en la cara axial y 7 en la radial; 68 para impregnar con los distintos productos, 39 han sido cortadas en la cara axial y 29 en la cara radial. Con unas dimensiones de:

- Corte axial: 39 muestras de 10cm x 7cm x 2cm.
- Corte radial: 4 muestras de 8cm x 7cm x 2cm; y 25 muestras de 10cm x 10cm x 10cm.

La nomenclatura a seguir para llevar un control riguroso de la evolución de cada una ha sido de una "M" seguida de un número (del 1 al 100). Las primeras muestras se han usado para

probar el método de impregnación y conseguir llegar a unos parámetros que funcionen bien a la hora de impregnar; otras han sido descartadas por defectos notables en la madera como fendas, nudos o grietas.

Todas las muestras han sido pesadas y medidas a temperatura ambiente a su recepción en el laboratorio del fuego. Posteriormente se han sometido a un secado progresivo en horno para eliminar el agua libre y el agua de ligado y que la solución a impregnar pueda penetrar a través de los vasos. El proceso de secado se ha producido a 60 °C, a 75 °C y por último a 100 °C; tomando el peso y la humedad relativa en cada una de estas temperaturas. El proceso de secado ha durado 2 días.



*Figura 3.1* Horno de secado

### **3.2.2 Tratamientos para la impregnación**

La utilización de protectores para tratar la madera es muy antigua, aunque los grandes avances se han producido a mediados de este siglo, es conocido que en el año 86 antes de J.C., no fue posible quemar una torre de madera impregnada con alúmina (potasio de aluminio). Los egipcios sumergían la madera en una disolución de vinagre y alumbre, los romanos añadían a estos compuestos otras sustancias incombustibles como arcillas y limo, y posteriormente se han ido utilizando otras combinaciones. La mayoría de las combinaciones

utilizadas, eran productos basados en Fósforo, Nitrógeno, Boro, Sílice y otros como fosfatos de amonio, sulfato de amonio, bórax y ácido bórico.

Existen algunas técnicas antiguas muy llamativas de proteger la madera frente al fuego que además mejoran la protección de la misma frente a otros organismos destructores, por ejemplo, el Shou-sugi-ban. Técnica de procedencia japonesa, se basa en un quemado superficial de las tablas de madera (actualmente utilizando sopletes de temperatura controlada) para proceder a continuación a un cepillado superficial, un lavado con agua, su posterior secado y para acabar dándole un impregnación de aceites naturales tipo Penofin, que ha de ser renovado cada cierto tiempo (un año, básicamente). [11]



Figura 3.2 Madera protegida con la técnica Shou-sugi-ban [11]

En base a todo ello se ha creído conveniente estudiar la acción de los boratos y los silicatos en la madera, así como la sinergia entre ambos.

Buscando información sobre casas comerciales de los productos derivados de boratos y silicatos, se ha contactado con la empresa BRENNTAG Química S.A; la cual nos ha facilitado de forma gratuita los productos solicitados para poder llevar a cabo todas las soluciones necesarias para el proyecto.

Los productos comerciales que se han utilizado en la elaboración del estudio han sido:

- Tinte IBERIA (sal fijadora y colorante).
- PROCOTÍN (tinte de tipo hidroalcohólico, color roble).
- SOLUBOR (Octoborato Disódico Tetrahidratado,  $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ).
- NaSil (Silicato Sódico,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).
- KSil (Silicato Potásico,  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ).

En los anexos del proyecto se adjuntan las fichas técnicas y descriptivas de los tres productos empleados en los tratamientos de las maderas, así como del tinte PROCOTÍN.

### 3.3 Impregnación mediante vacío

El método de impregnación ha consistido en hacer que penetren las partículas de los productos en las muestras de madera hasta la saturación de las mismas.

Para llevar a cabo este proceso, se han determinado las muestras de madera, se han preparado las soluciones con las que se han tratado las piezas y los equipos necesarios para el desarrollo del estudio experimental.

En los sucesivos apartados se explica el proceso que se ha seguido, así como los aparatos y herramientas que han sido necesarios en cada fase.

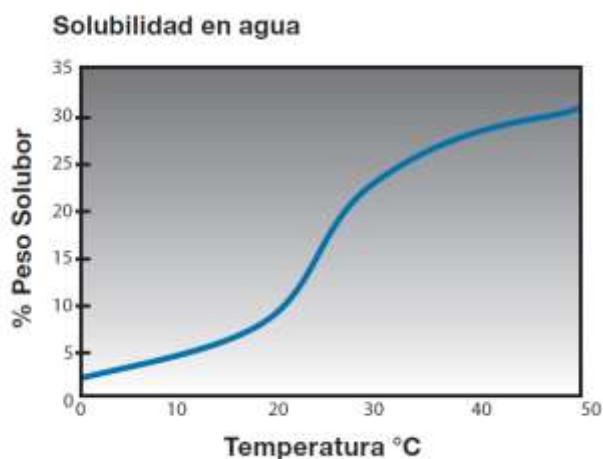
#### 3.3.1 Preparación de los productos

##### Solubor:

Para la obtención de las proporciones de la solución se ha tenido en cuenta las condiciones necesarias de temperatura y la solubilidad del producto. Teniendo en cuenta la gráfica siguiente de solubilidad del Borato de Sodio y la tabla de concentraciones, se ha conseguido una concentración de Solubor del 25%.

A la hora de realizar la solución, se han calentado los 3.000g de agua a 40°C siendo necesario para ello la utilización de una placa calefactable, un recipiente metálico, un termómetro, una báscula de precisión y un agitador para ayudar a mantener el líquido en movimiento y evitar la precipitación del soluto.

Por otro lado se han pesado 1.000g de Solubor en polvo y se han ido disolviendo poco a poco en el agua caliente.



Temperatura		% en peso de Solubor® en soluciones saturadas	% concentración de boro (B) en soluciones saturadas
°C	°F		
0	32	2.4	0.5
10	50	4.5	0.9
20	68	9.5	2.0
30	86	21.9	4.4
40	104	27.8	5.7
50	122	32.0	6.5

Figura 3.3 Solubilidad Borato de Sodio [24]

- De lo anterior resultan las cantidades siguientes:

3.000g H<sub>2</sub>O + 1.000g de Solubor = 4.000g de solución al 25%.



*Figura 3.4* 3.000g de H<sub>2</sub>O pesados en báscula digital



*Figura 3.5* 1.000g de Solubor pesados en báscula digital



· NaSil:

Para la preparación del Silicato de Sodio ha sido suficiente con verter una cantidad de producto suficiente para cubrir totalmente las maderas (3.212g) en el bol de aluminio, sin necesidad de aplicarle temperatura para hacer la solución ya que la sal se presenta en estado líquido.

· KSil:

Se ha seguido el mismo procedimiento para la sal potásica ya que, como el NaSil, se comercializa en estado líquido.

En todo momento se ha tomado la precaución de usar guantes de látex y una bata para evitar el contacto de los tres productos con la piel y alterar las muestras lo mínimo posible.



Figura 3.6 3.212g de NaSil

### 3.3.2 Preparación de las muestras en vacío e impregnación

Con la solución preparada que se ha utilizado en cada caso, se han seleccionado las muestras del horno a tratar, se han pesado con la báscula digital y tomado el porcentaje de humedad.

Las muestras se han colocado en una jaula metálica con diferentes compartimentos para poder mantener las piezas separadas las unas de las otras, para evitar que éstas salgan a la superficie se han colocado unos pesos encima de la jaula.

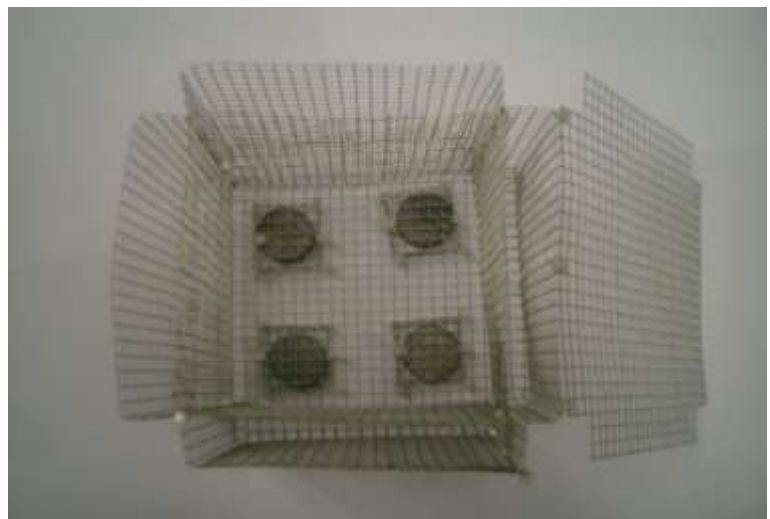


Figura 3.7 Jaula metálica para la colocación de las muestras

Para la impregnación de las muestras se ha montado un circuito de vacío simulando un autoclave, adaptándolo a los medios disponibles en el laboratorio.

Dicho circuito consiste en conseguir el vacío dentro de una campana que contiene la jaula con las muestras de madera, para así liberar el aire de los capilares de la madera y permitir después que el líquido pase a la campana y penetre entre las fibras de la madera.

Se coloca grasa sintética en las superficies de contacto entre las dos partes de la campana, para evitar la entrada de aire.



Figura 3.8 Campana con jaula, 6 muestras y pesos encima

Tras varias pruebas, se ha podido comprobar que mantener demasiado tiempo el vacío una vez se ha introducido la solución no aporta mejoras en la calidad de la impregnación. Es por ello que en cada impregnación se ha determinado dejar el vacío durante 25 minutos, una vez las maderas están completamente cubiertas con el producto. Pasado este tiempo, se ha ido recuperando presión poco a poco y se ha dejado la jaula con las muestras completamente sumergida durante 24 horas.

Después de 24 horas se han sacado las muestras de la campana y se han dejado secar al aire durante por lo menos 48 horas. Posteriormente se ha realizado otra vez el mismo proceso de secado que antes de tratar, se han introducido en el horno de secado aumentando la temperatura progresivamente a 60°C, 75°C y por último 100°C; anotando en cada momento los pesos para así controlar la cantidad de producto que ha penetrado en la muestra.

Con el fin de realizar combinaciones de dos productos, lo que se ha hecho es realizar una segunda impregnación siguiendo el mismo proceso que en la primera. Una vez completada se vuelven a anotar los pesos y se calcula la cantidad de líquido que ha penetrado en la segunda impregnación.

El sistema de vacío ha constado de:

- Un recipiente metálico para contener la solución (1).
- En el caso del Solubor, una placa calefactora y un agitador que mantiene la temperatura de la solución a 40°C para evitar precipitaciones (2).

- Unos conductos de goma que toleran altas temperaturas y dirigen la solución de un recipiente a otro (3).
- Una pipeta de vidrio para introducir el líquido (4).
- Una brida metálica que se cierra y se abre en función de si se quiere dejar pasar el líquido a la campana o no.
- Una campana de vidrio donde se produce el vacío y se realiza la impregnación (5).
- Una jaula de malla metálica con pesos, para contener las muestras de madera y evitar la flotación de las mismas.
- Un vacuómetro para medir la presión (6).
- Una bomba de extracción de aire que permite obtener un vacío de 8mbar (7).

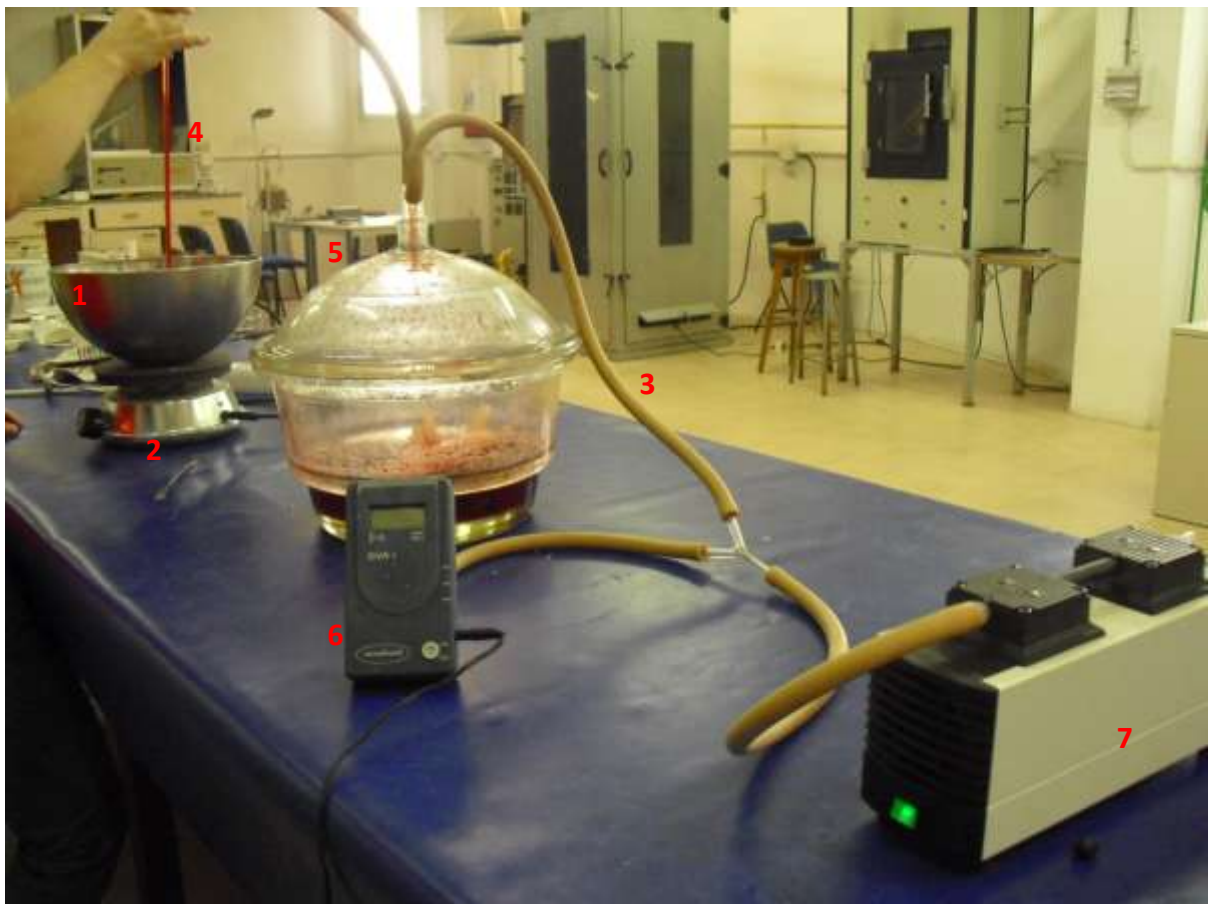


Figura 3.9 Detalles del equipo de vacío e impregnación

## CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN DE LA IMPREGNACIÓN

En 1.931 se alcanzó a obtener una resolución 1.000 veces mayor que la de un microscopio óptico y fue conocido como microscopio electrónico de barrido SEM (Scanning Electron Microscopy), inventado por los físicos Ernst Ruska y Max Knoll.

El desarrollo de la microscopía electrónica permitió, entre otras cosas, alcanzar el nivel de resolución espacial que muchos investigadores de diversas disciplinas demandaba, y fundar una rama de investigación que a pesar de ser relativamente joven, ha avanzado de una manera vertiginosa en la ciencia contemporánea. Esta técnica se ha convertido en una fuente inagotable de información y desarrollo, no solo por la resolución alcanzada, sino también por las capacidades de análisis de las técnicas asociadas a un microscopio electrónico moderno, como son la espectroscopía por dispersión de energía de rayos X (EDS de sus siglas en inglés "*Energy Dispersive Spectroscopy*"), la espectroscopia por dispersión de longitud de onda (WDS, del inglés "*Wavelength Dispersive Spectroscopy*") y la espectroscopia Auger, entre otras. Por su capacidad de proporcionar información morfológica, topográfica, química, cristalina, eléctrica y magnética de los materiales, la han convertido en herramientas indispensables en el dominio de la física del estado sólido, ciencia de materiales, electrónica, polímeros, metales, textiles, biología, medicina, etc. [26]

De los tres métodos de verificación de la impregnación, desarrollados en el apartado 2.6, se descartó el método de los reactivos por la complejidad a la hora de encontrar el reactivo adecuado para cada producto.

Por lo tanto, se decidió probar la solución con los colorantes para obtener el mismo resultado que con los reactivos.

Realizadas las pruebas necesarias con el colorante, se optó por corroborar la profundidad de impregnación con el microscopio electrónico de barrido, ya que se podían observar los elementos que habían quedado en la madera una vez impregnada y seca; descartando así la necesidad de teñir la madera para su observación.

### 4.3 Colorantes

Se utilizó en un primer momento el colorante PROCOTÍN color roble, haciendo una solución de agua con el colorante para, una vez realizado el vacío dentro de la campana, introducir la solución poco a poco en el recipiente. Pero viendo que era muy complicado distinguir hasta dónde había impregnado, se decidió utilizar el tinte IBERIA rojo mezclado con la solución de borato sódico para poder determinar si el método de impregnación empleado era válido para penetrar en la madera. También, gracias al pigmento de color en la madera, se pudo determinar el tiempo adecuado que tenían que estar las piezas sumergidas en la solución. El proceso para conseguir la solución deseada se ha explicado en detalle en el apartado 3.3.



Figura 4.1 Tinte PROCOTIN roble

La figura 4.3 muestra la penetración del colorante en una pieza con corte axial haciendo evidente al compararla con la figura 4.4, cortada radialmente, que en esta dirección se favorece la entrada de producto.

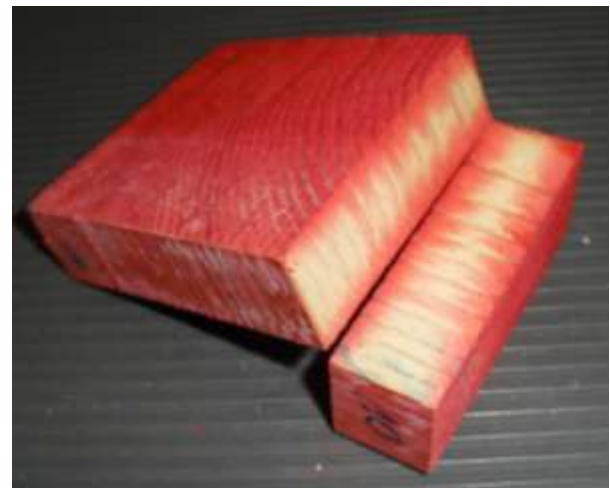


Figura 4.3 M10 Solubor + colorante



Figura 4.2 Solubor con tinte IBERIA rojo

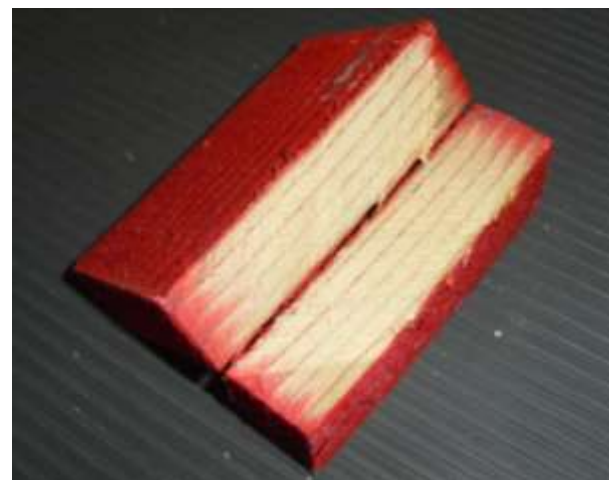


Figura 4.4 M18 Solubor + colorante

#### 4.4 Microscopio electrónico de barrido (SEM)

Con la intención de comprobar hasta dónde ha penetrado el producto en las maderas, se ha trabajado con el microscopio electrónico de barrido en bajo vacío que, como ya se ha comentado en el apartado 2.6, permite observar las muestras sin necesidad de recubrirlas con alguna película conductora.

La visualización de las muestras mediante SEM se ha llevado a cabo en la unidad de microscopía electrónica de barrido de los Servicios Científico-Técnicos de la Universidad de Barcelona.

Para ello se han preparado unas láminas con unas medidas aproximadas de 2cm x 2cm x 0,3cm; de diferentes sectores de las muestras para cerciorarse de la correcta penetración de los componentes de la solución en cada punto.

En el cuadro siguiente se hace una relación de las muestras con sus respectivos cortes y tratamientos empleados que se han seleccionado para la comprobación en el microscopio:

**Tabla 3.1 Muestras con una impregnación**

MUESTRAS CON UNA IMPREGNACIÓN		
MUESTRA	CORTE	IGNIFUGANTE
M13	AXIAL	SOLUBOR ( $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )
M16	RADIAL	SOLUBOR ( $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )

**Tabla 3.2 Muestras con doble impregnación**

MUESTRAS CON DOBLE IMPREGNACIÓN			
MUESTRA	CORTE	IGNIFUGANTE 1	IGNIFUGANTE 2
M12	AXIAL	SOLUBOR ( $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )	KSil ( $\text{K}_2\text{SiO}_3$ )
M44	AXIAL	SOLUBOR ( $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )	NaSil ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

En los siguientes puntos se explica con detenimiento los estudios y análisis efectuados en el servicio de microscopía, tomando como ejemplo para su explicación y correcta comprensión las muestras M13 y M16, de una sola impregnación; y M12 de doble impregnación.

El resto de las muestras observadas queda recogido en las fichas de trabajo anexadas al final de esta memoria.

##### • Muestra M13 (Solubor)

La pieza M13 ha sido impregnada con Borato de Sodio (Solubor), tal y como muestra la tabla anterior, incrementando su peso en un 24,5%.

En la figura 4.5 se presenta la muestra analizada, así como las láminas extraídas de la misma.

Dado que es una muestra de corte axial, se han ido analizando puntos de las láminas desde los extremos hasta el interior para observar a qué profundidad ha llegado el producto químico.

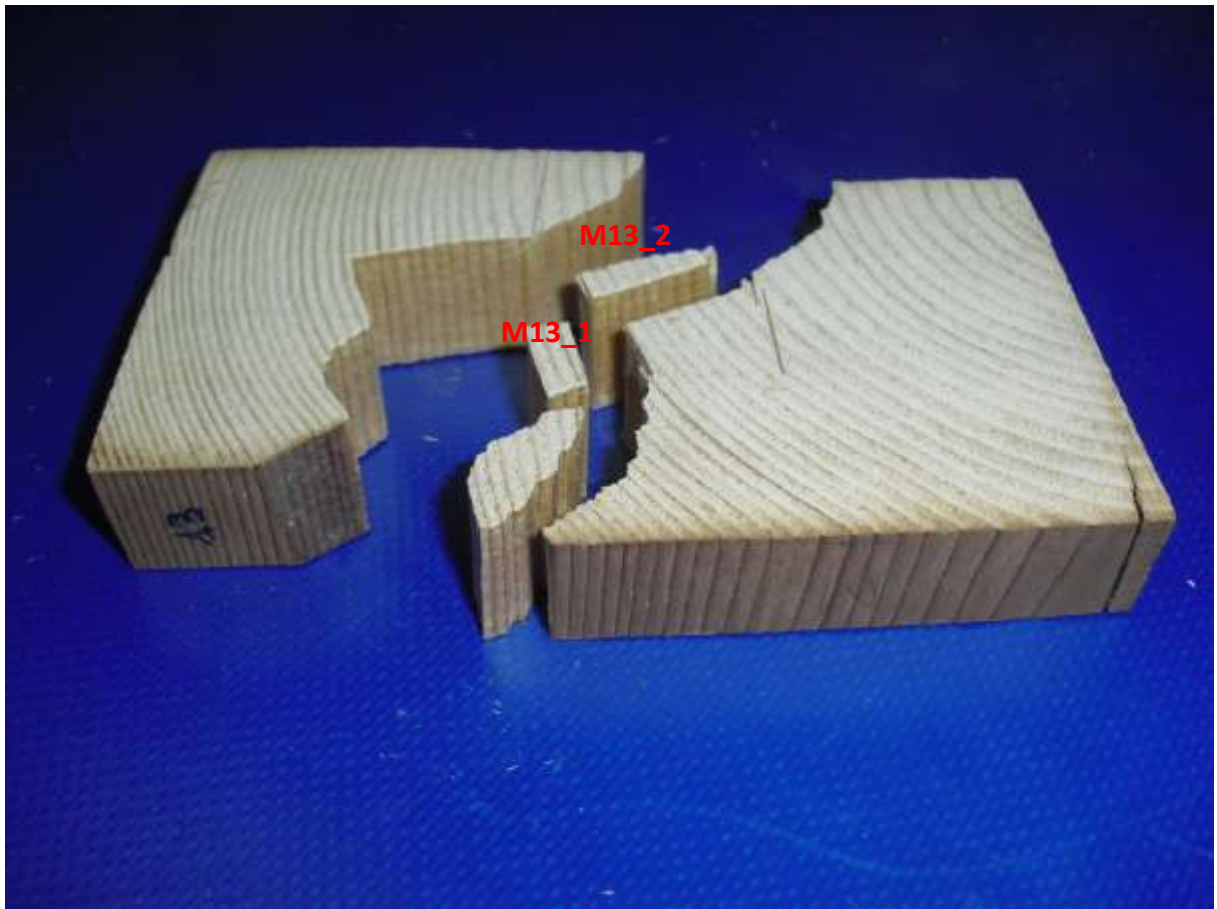
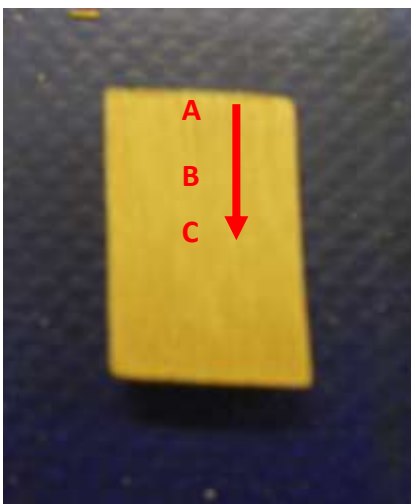


Figura 4.5 Muestra M13 impregnada con Solubor

**- Probeta M13\_1:**



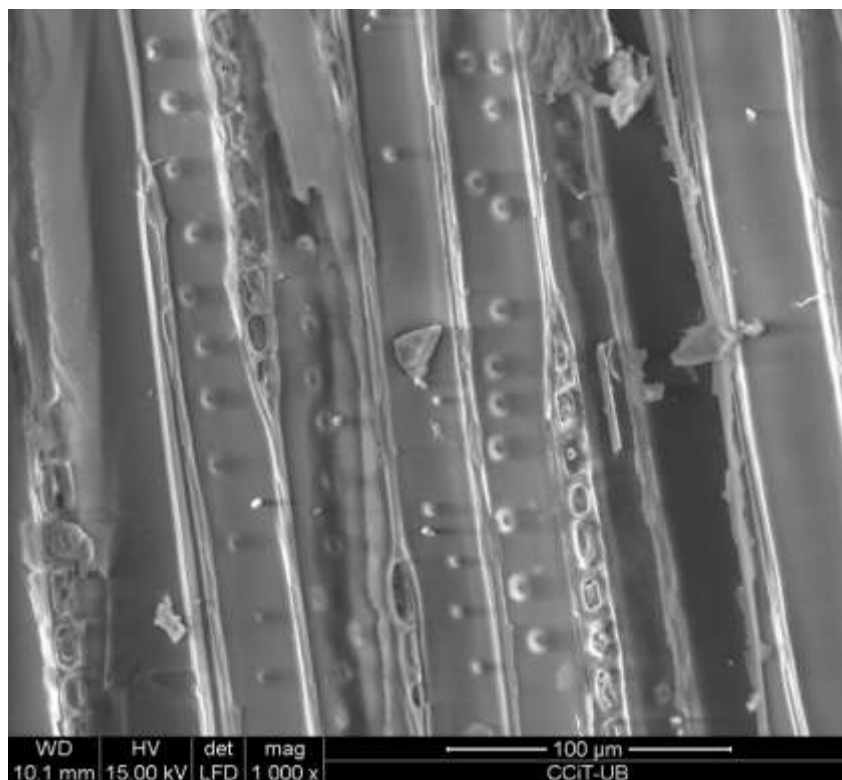
En la probeta M13\_1 se han estudiado 3 puntos:

- El punto A, justo en el extremo superior de la lámina.
- El punto B, a 7,5mm del extremo superior.
- El punto C, a 10mm del extremo superior.

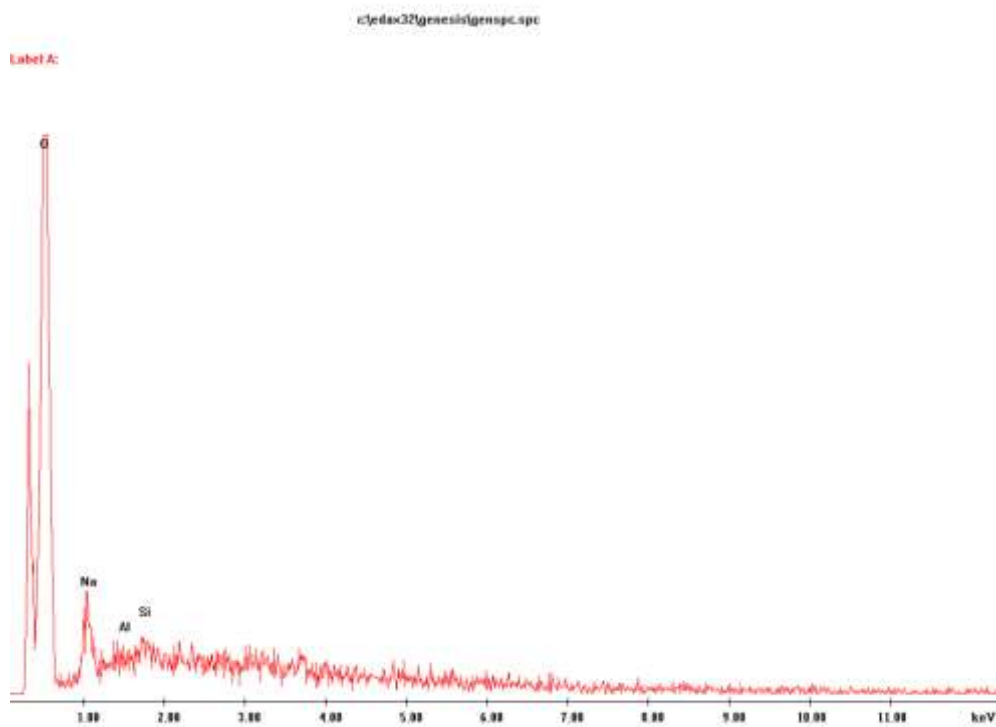
Tal y como está colocada la fotografía de la Figura 4.6, el sentido de las fibras es longitudinal.

Figura 4.6 Probeta M13\_1

**Imagen en el punto A:**

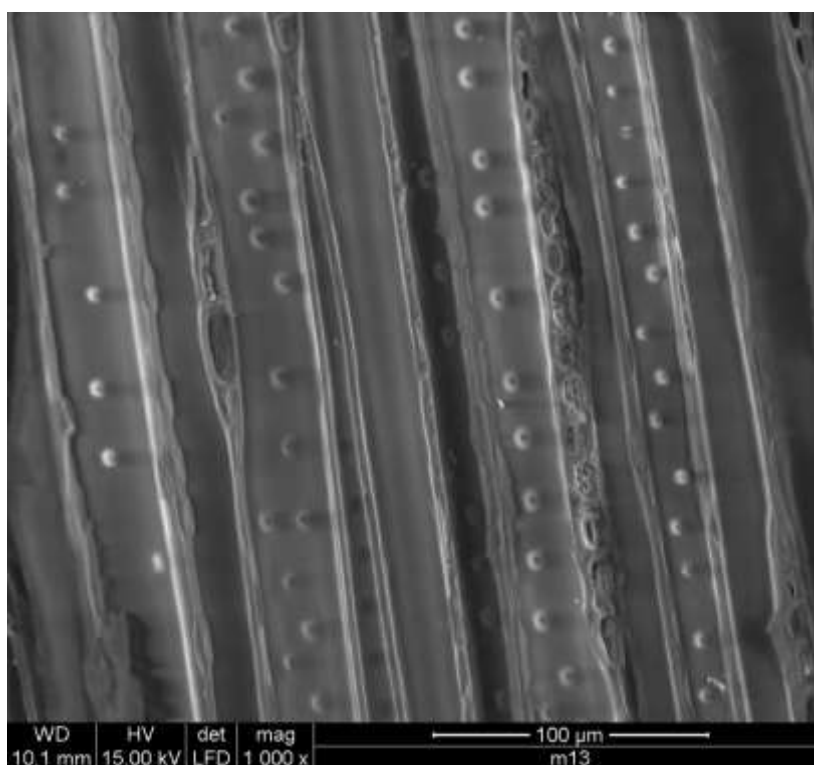


**Análisis químico en el punto A:**

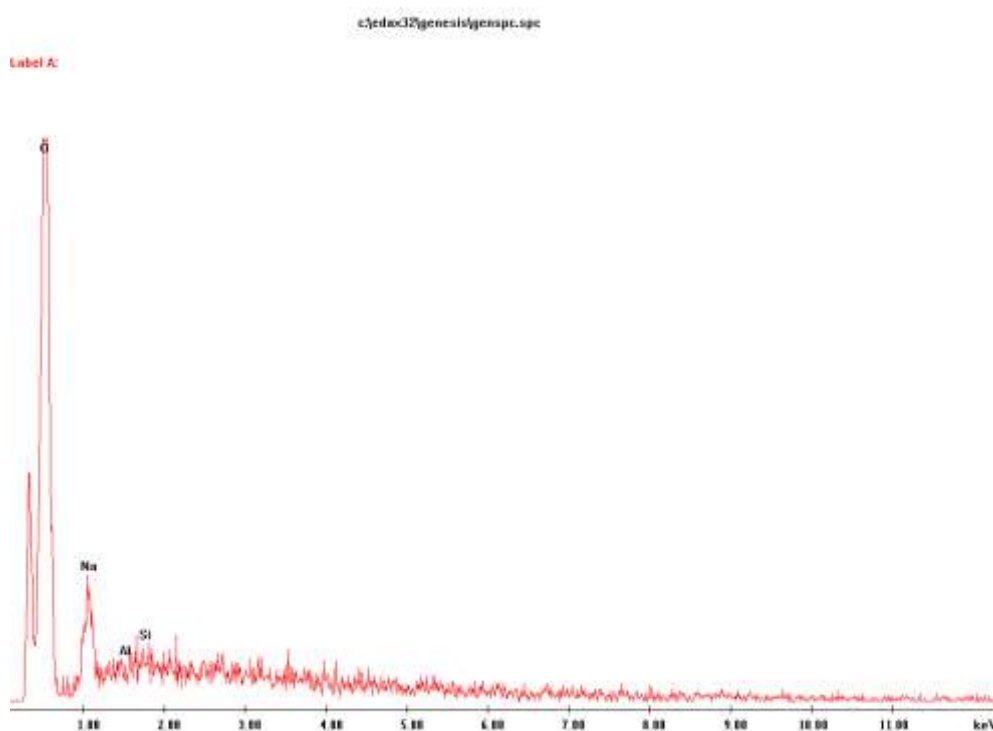




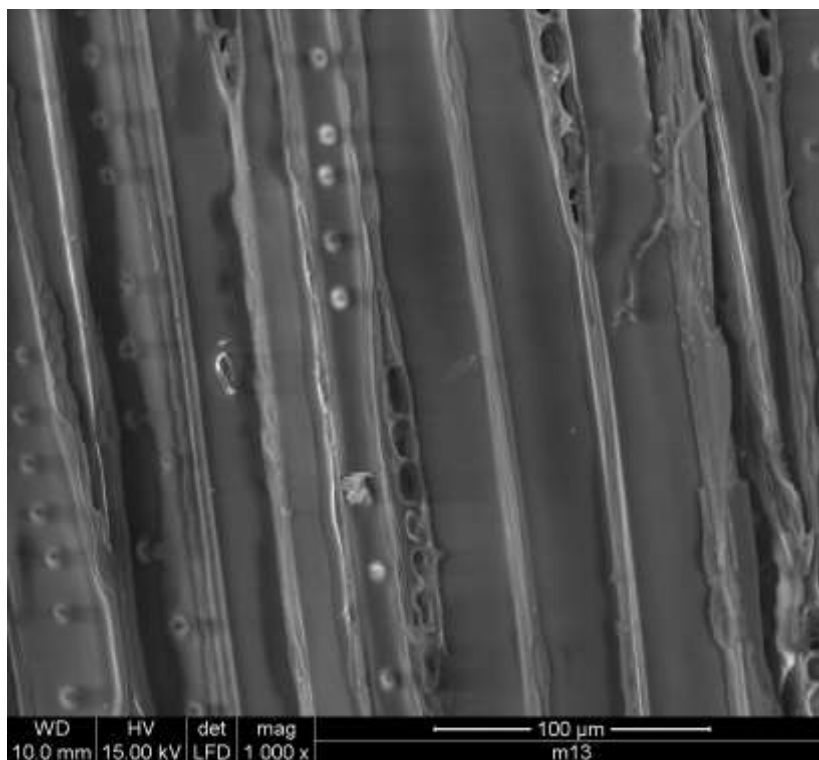
**Imagen en el punto B:**



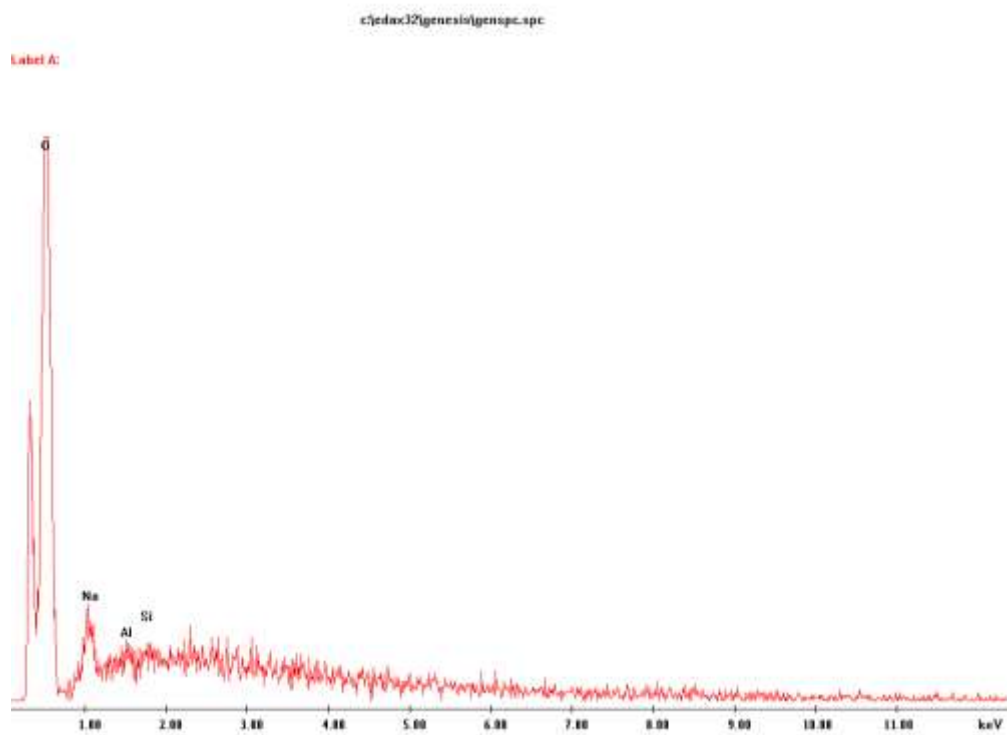
**Análisis químico en el punto B:**



**Imagen en el punto C:**



**Análisis químico en el punto C:**

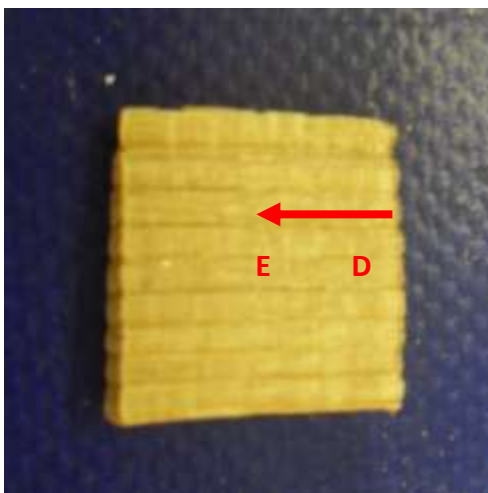


Examinando los resultados del análisis químico con el microscopio electrónico de barrido, se observa la presencia de Sodio (Na) en todos los puntos de la muestra estudiados.

Debido a que el grosor de la pieza original es de 20mm, se ha estudiado la probeta hasta una profundidad de 10mm, corroborando la existencia de Na a dicha profundidad.

Se extrae del estudio, por lo tanto, la impregnación satisfactoria de la muestra M13 en toda la pieza y, como consecuencia, la penetración de Solubor favorecida en el sentido de las fibras.

**- Probeta M13\_2:**



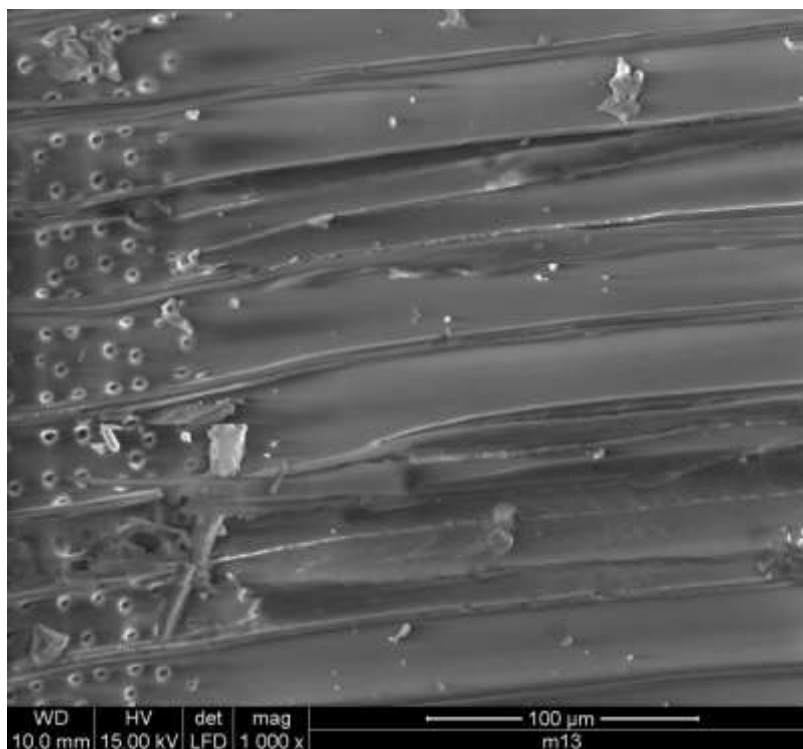
En la probeta M13\_2 se han estudiado 2 puntos:

- El punto D, en el extremo derecho de la lámina.
- El punto E, a 10mm del extremo derecho.

Tal y como está colocada la fotografía de la Figura 4.6, el sentido de las fibras es horizontal.

*Figura 4.7* Probeta M13\_2

**Imagen en el punto D:**



**Análisis químico en el punto D:**

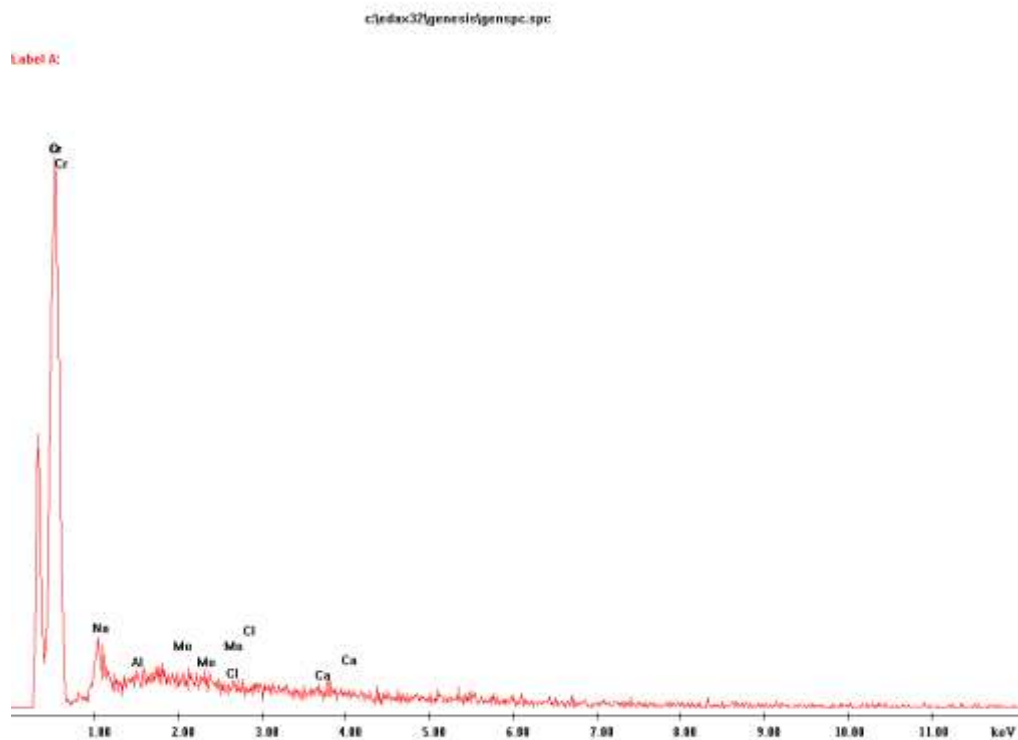
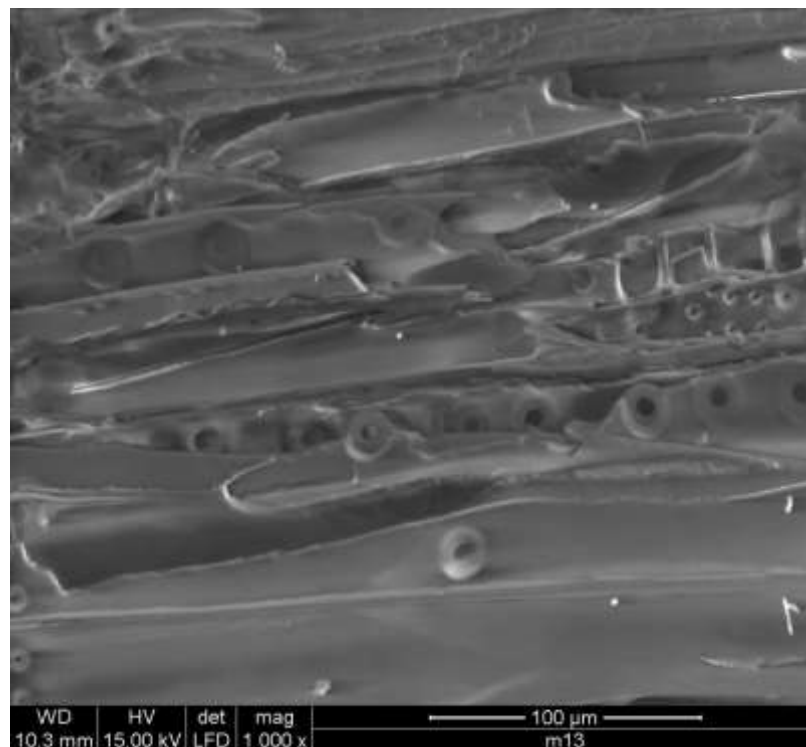
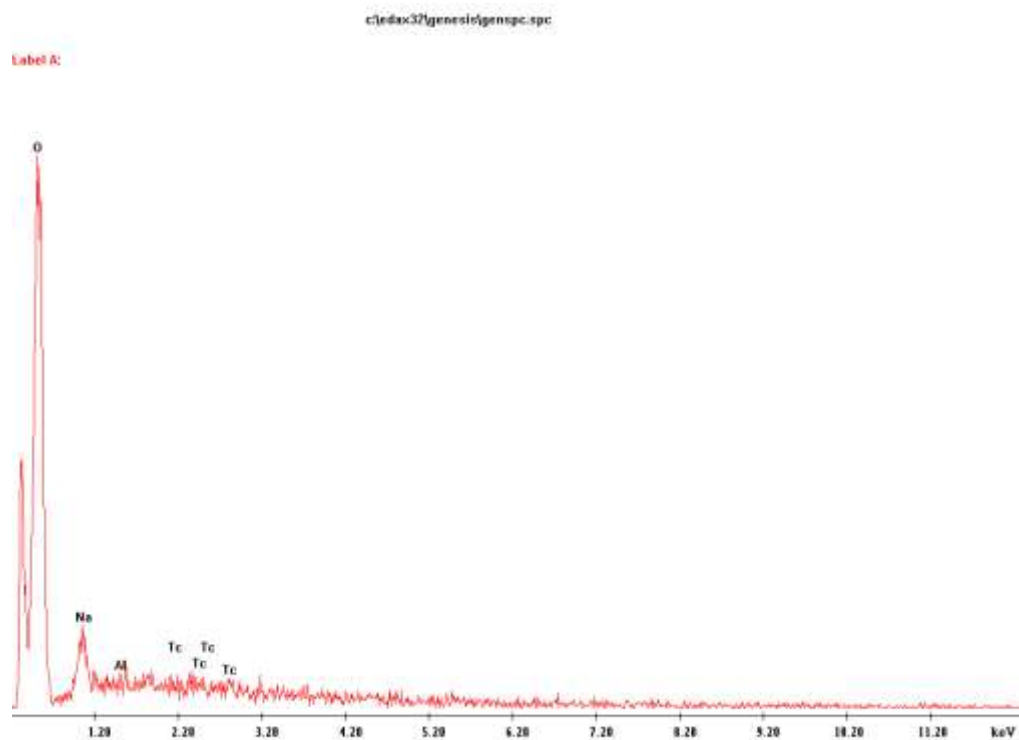


Imagen en el punto E:



Análisis químico en el punto E:



Como se puede observar en las gráficas de análisis químico de la segunda lámina, existe Sodio (Na) tanto en uno de los extremos de la cara axial de la pieza como a 10mm de ésta.

Se comprueba una vez más la impregnación satisfactoria de la muestra M13 en toda la pieza y, como consecuencia, la penetración de Solubor favorecida en el sentido de las fibras.

• **Muestra M16 (Solubor)**

La pieza M16 ha sido impregnada con Borato de Sodio (Solubor), tal y como muestra la tabla anterior, incrementando su peso en un 12,2%.

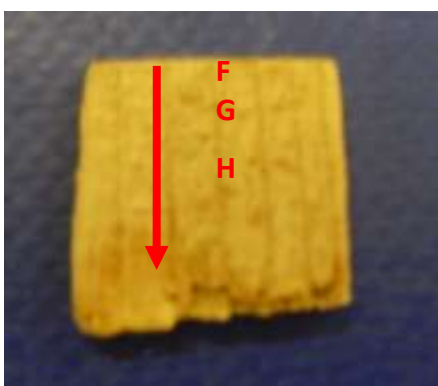
En la figura 4.7 se presenta la muestra analizada, así como las láminas extraídas de la misma.

Dado que es una muestra de corte radial, se ha analizado una lámina de un extremo de la pieza desde una de las caras axiales hacia el interior para observar a qué profundidad ha llegado el producto químico.



Figura 4.8 Muestra M16 impregnada con Solubor

- **Probeta M16\_1:**



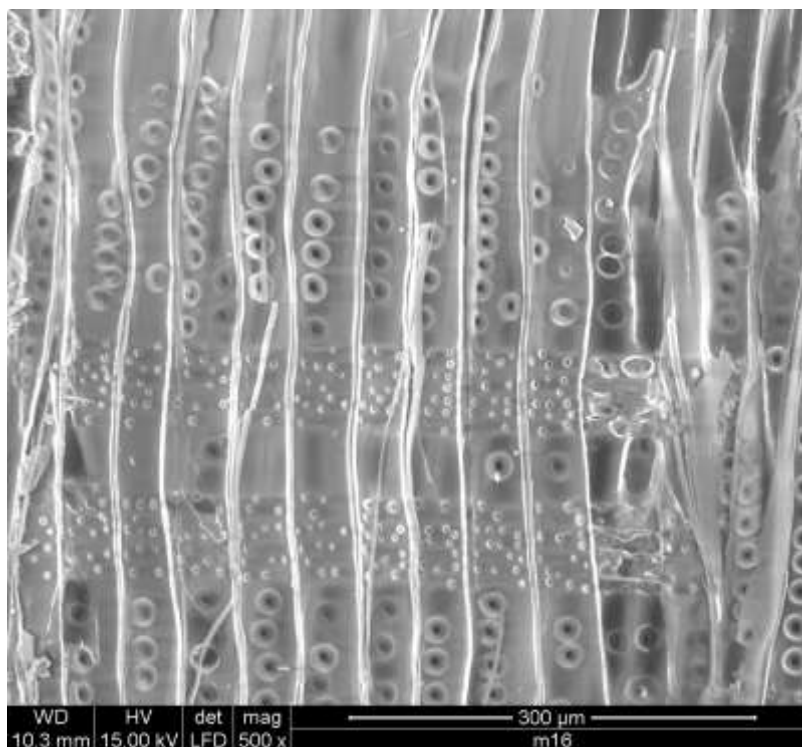
En la probeta M16\_1 se han estudiado 3 puntos:

- El punto F, en el extremo superior de la lámina.
- El punto G, a 4mm del extremo superior.
- El punto H, a 10'25mm del extremo superior.

Tal y como está colocada la fotografía de la Figura 4.8, el sentido de las fibras es vertical.

Figura 4.9 Probeta M16\_1

**Imagen en el punto F:**

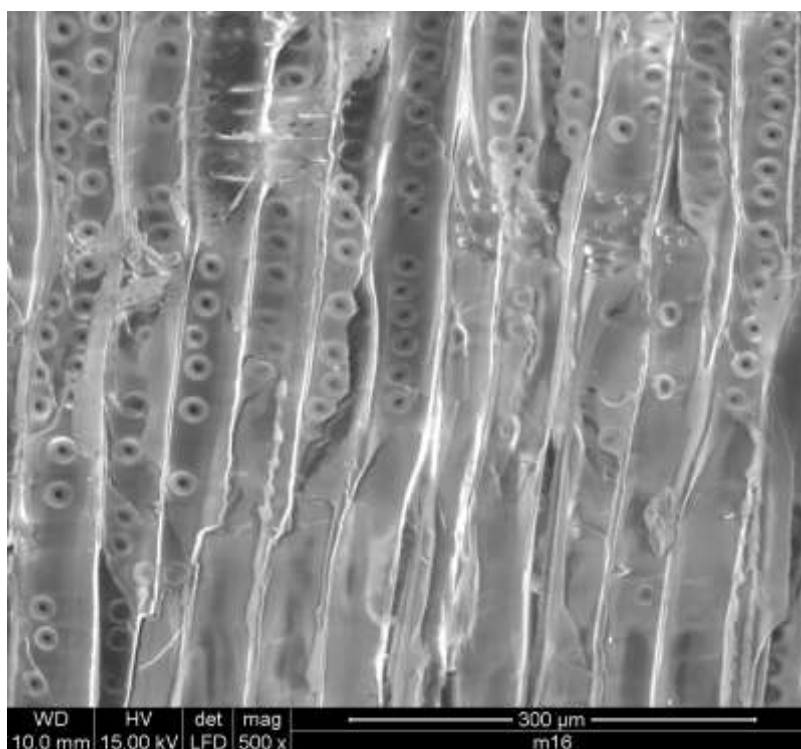


**Análisis químico en el punto F:**





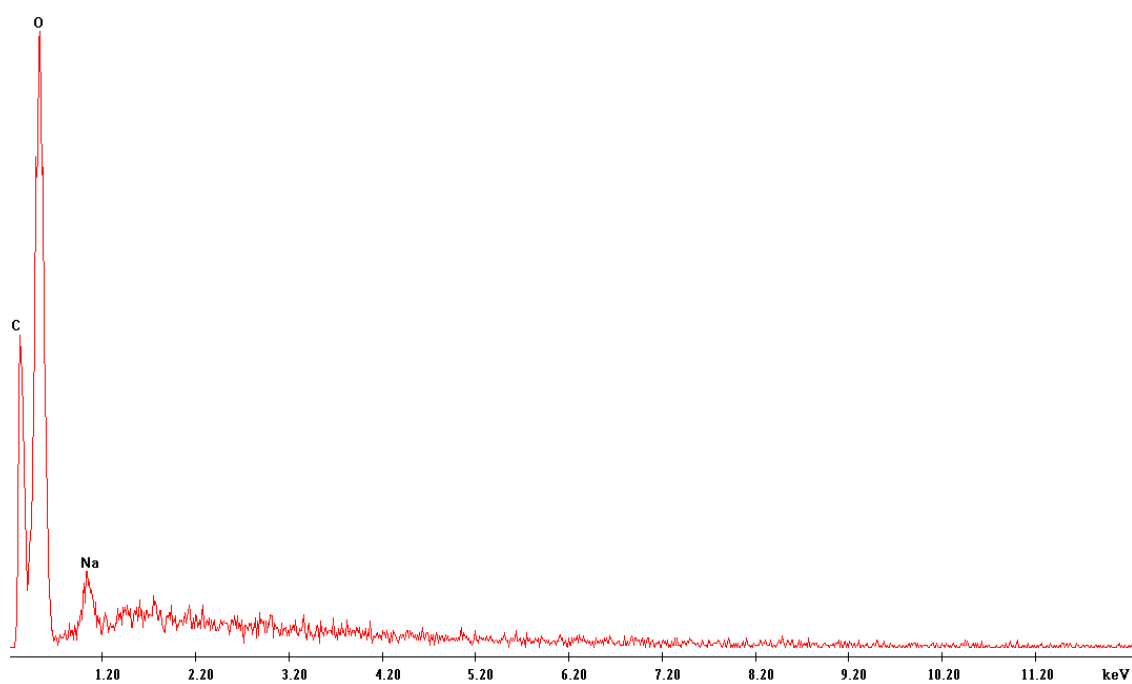
**Imagen en el punto G:**



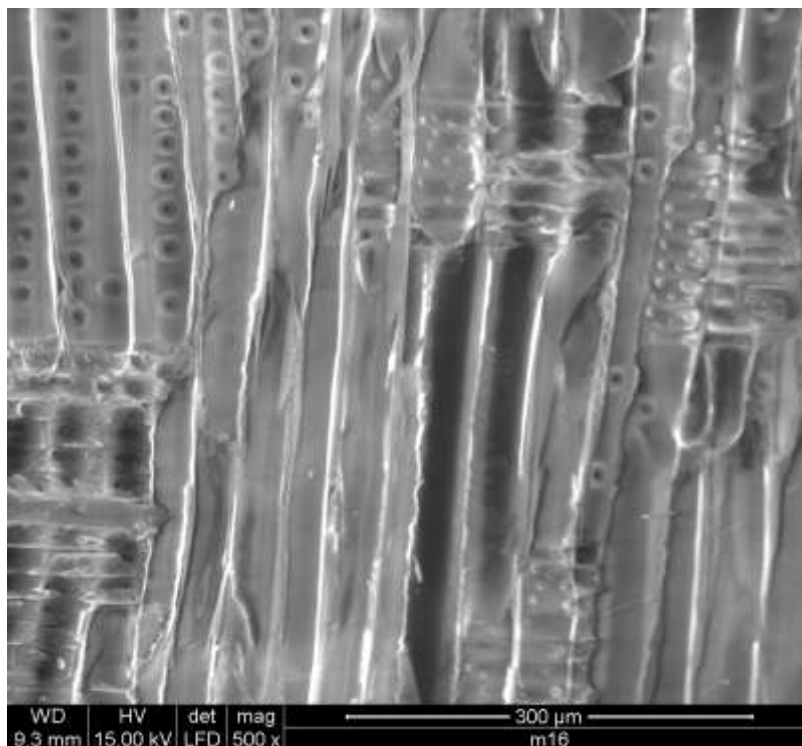
**Análisis químico en el punto G:**

c:\edax32\genesis\genspc.spc

Label A:



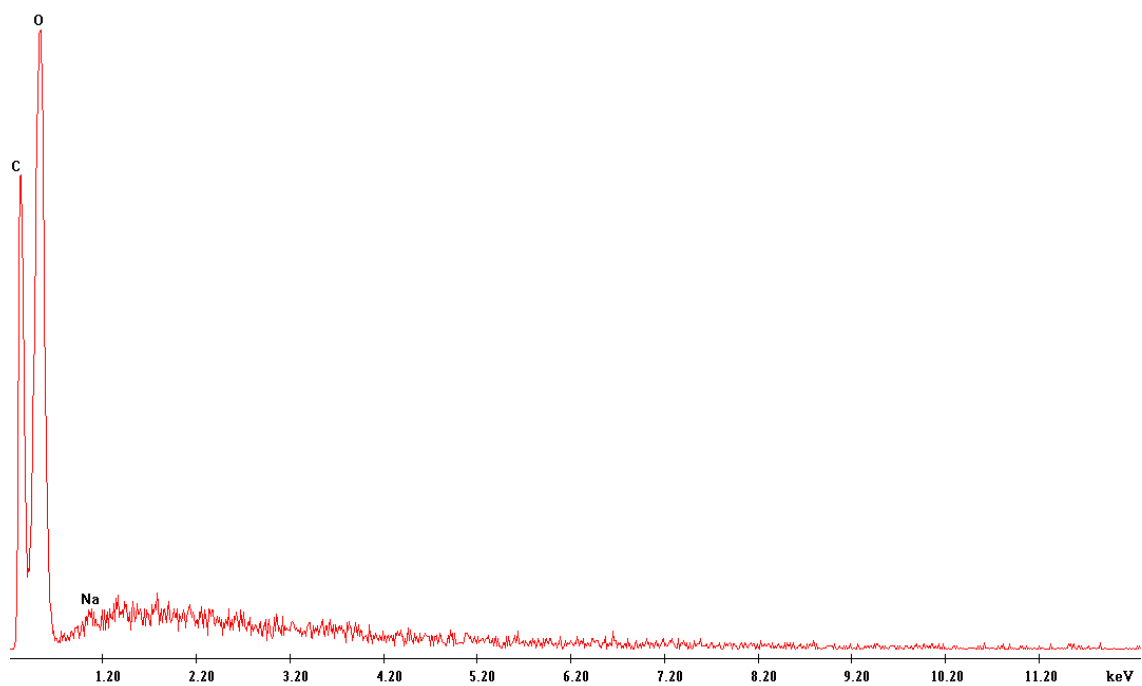
**Imagen en el punto H:**

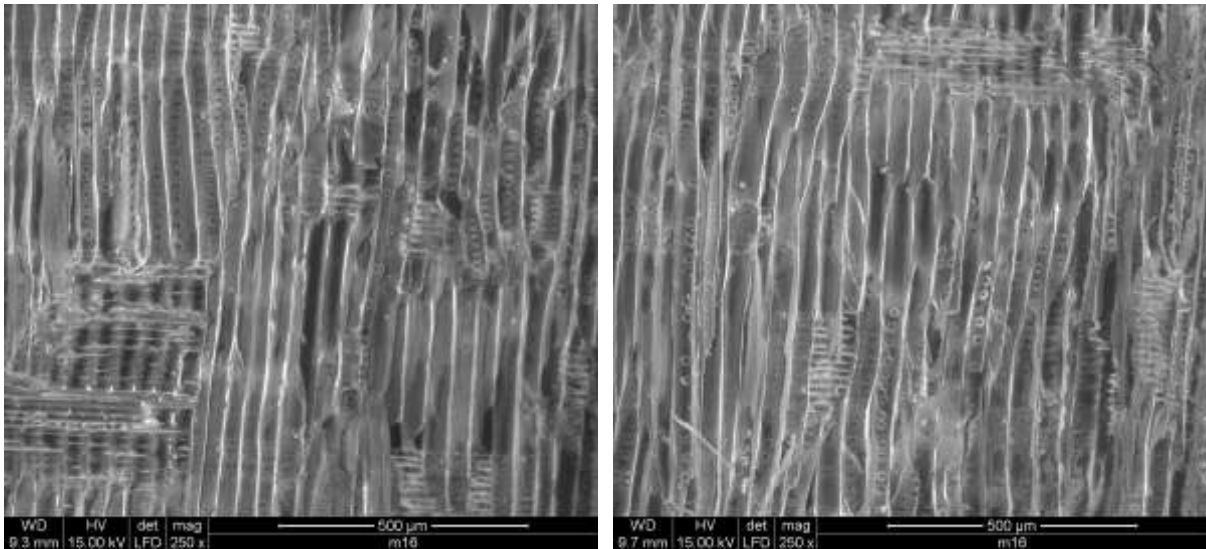


**Análisis químico en el punto H:**

c:\edax32\genesis\genspc.spc

Label A:



**Detalle de los radios en el punto H:**

Examinando los resultados del análisis químico con el microscopio electrónico de barrido, se observa la presencia de Sodio (Na) en los puntos F (extremo superior de la lámina) y G (a una profundidad de 4mm). Sin embargo, como muestra la gráfica en el punto H, a 10'25mm no se ve que haya penetrado el producto. Por lo tanto, se extrae de este análisis la presencia de Solubor hasta una profundidad de 4mm en las caras axiales y superficialmente en las radiales.

Nota: Se estudiaron otros puntos aleatorios de la muestra a una profundidad de 5mm, 6'65mm y 7'65mm sin resultado de Sodio en el análisis químico.

• **Muestra M12 (Solubor y KSil)**

La pieza M12 ha sido impregnada con Borato de Sodio (Solubor) y Silicato de Potasio (KSil), tal y como muestra la tabla anterior, incrementando su peso en un 31,1% en una primera impregnación y 29,5% en la segunda.

En la figura 4.9 se presenta la muestra analizada, así como la lámina extraída de la misma.

Dado que es una muestra de corte axial, se ha analizado una lámina de la parte central de la pieza desde una de las caras axiales hacia el interior para observar a qué profundidad ha llegado el producto químico.



Figura 4.10 Muestra M12 impregnada con Solubor y KSil

- **Probeta M12\_1:**



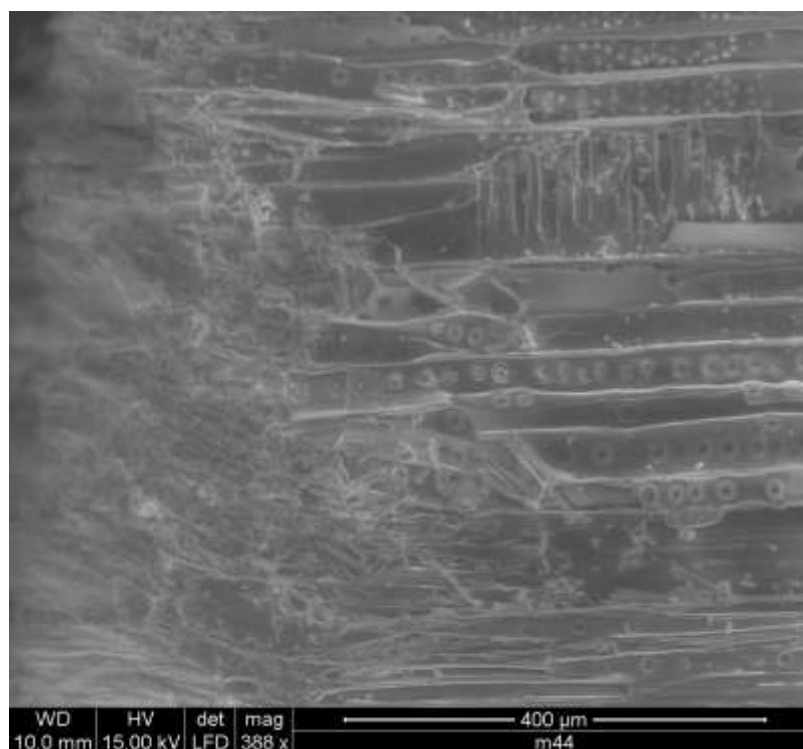
En la probeta M12\_1 se han estudiado 4 puntos:

- El punto I, en el extremo izquierdo de la lámina.
- El punto J, a 1mm de I y 5mm hacia arriba.
- El punto K, a 5mm de I y 2mm hacia arriba.
- El punto L, a 7mm de I y 2mm hacia arriba.

Tal y como está colocada la fotografía de la Figura 4.10, el sentido de las fibras es horizontal.

Figura 4.11 Probeta M12\_1

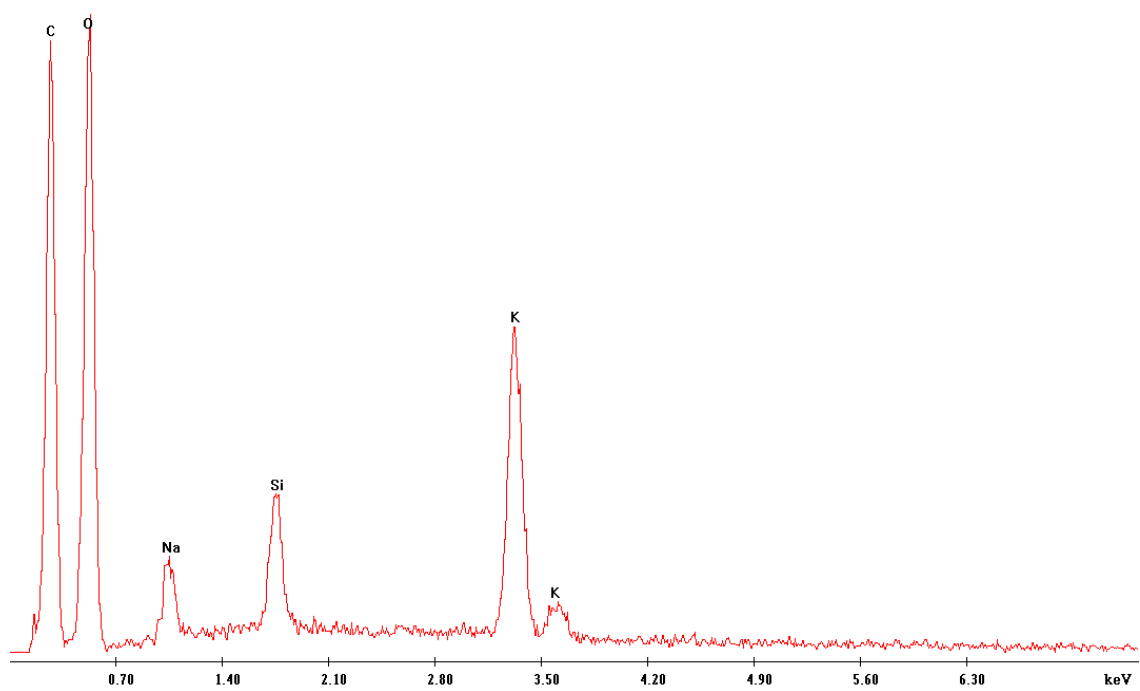
**Imagen en el punto I:**



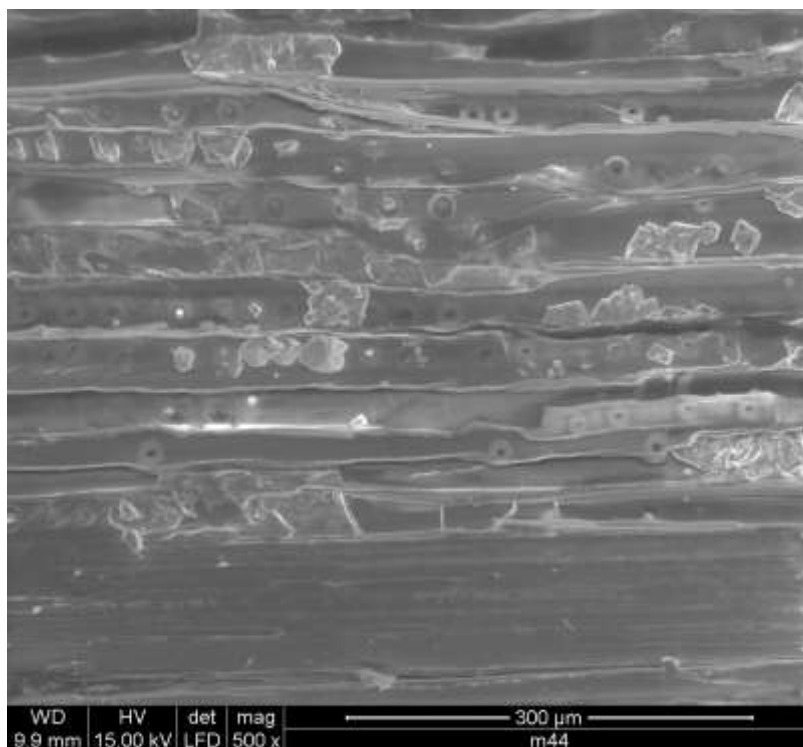
**Análisis químico en el punto I:**

c:\edax32\genesis\genspc.spc

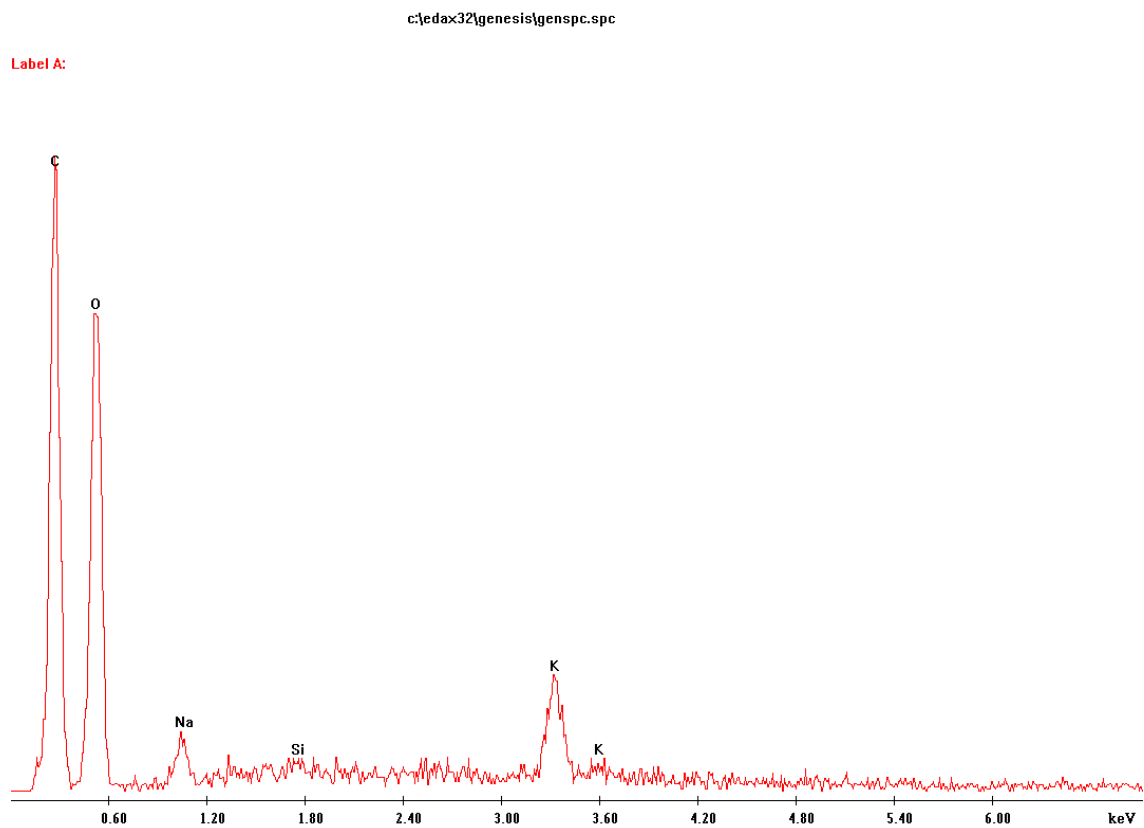
Label A:



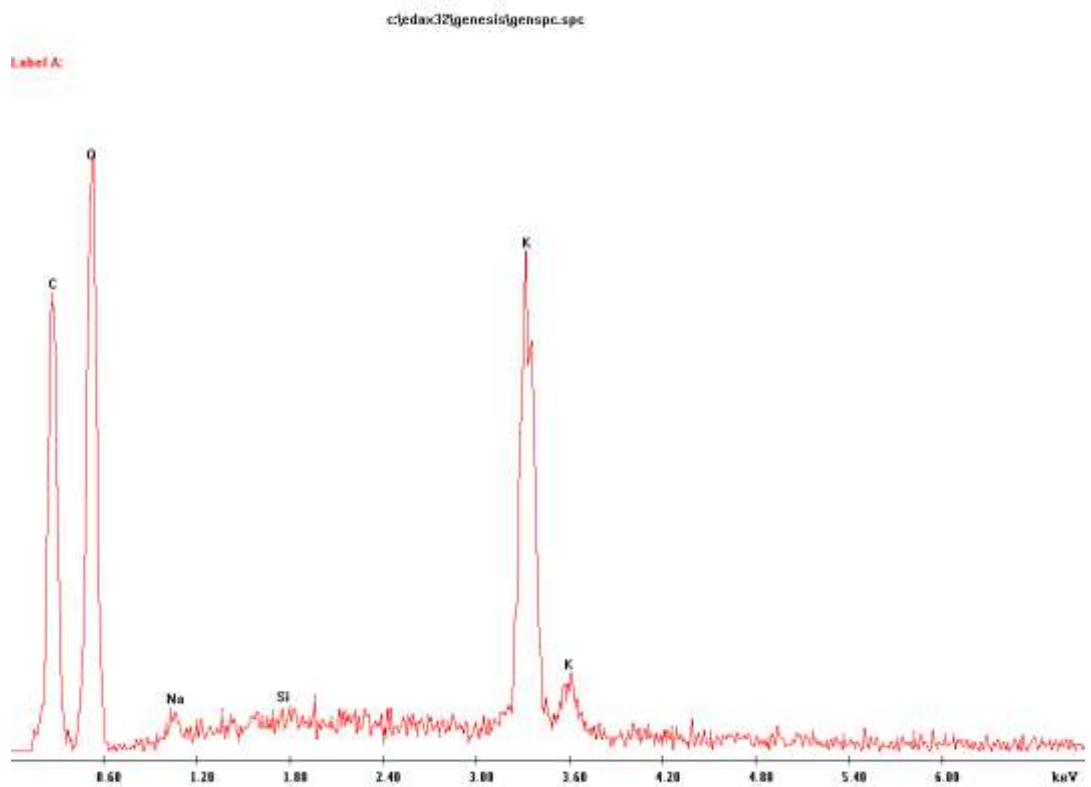
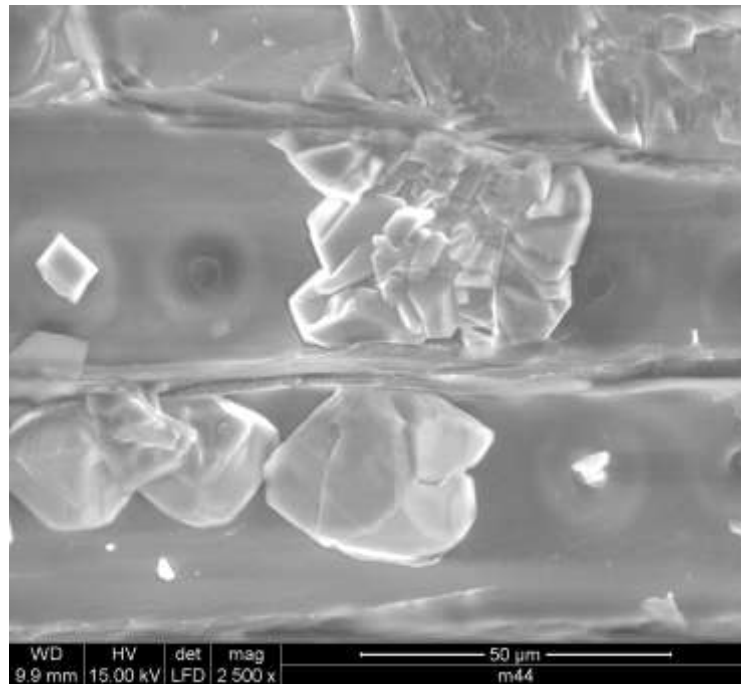
**Imagen en el punto J:**



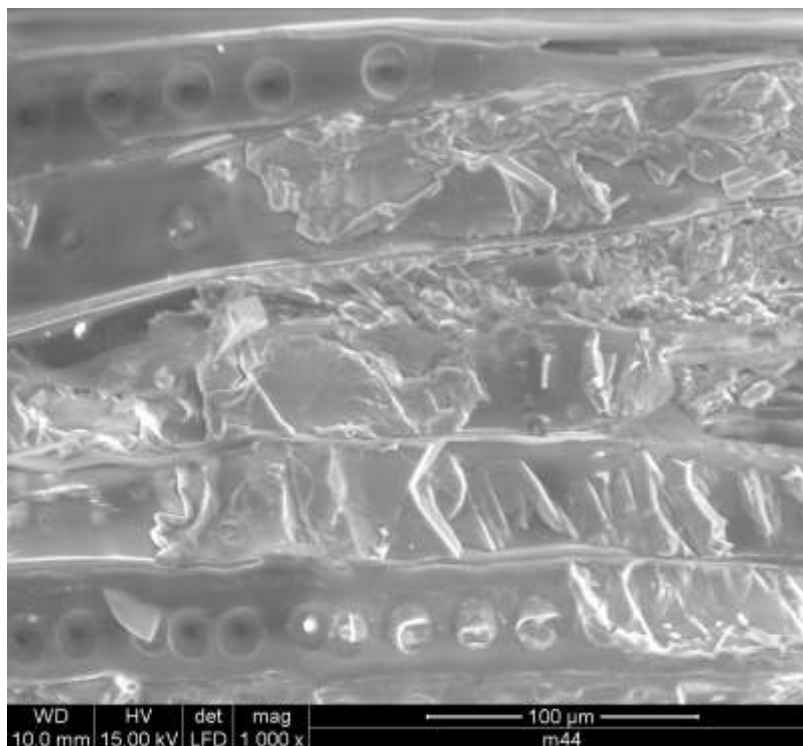
**Análisis químico en el punto J:**



Detalle de un punto de KSil en la zona J:



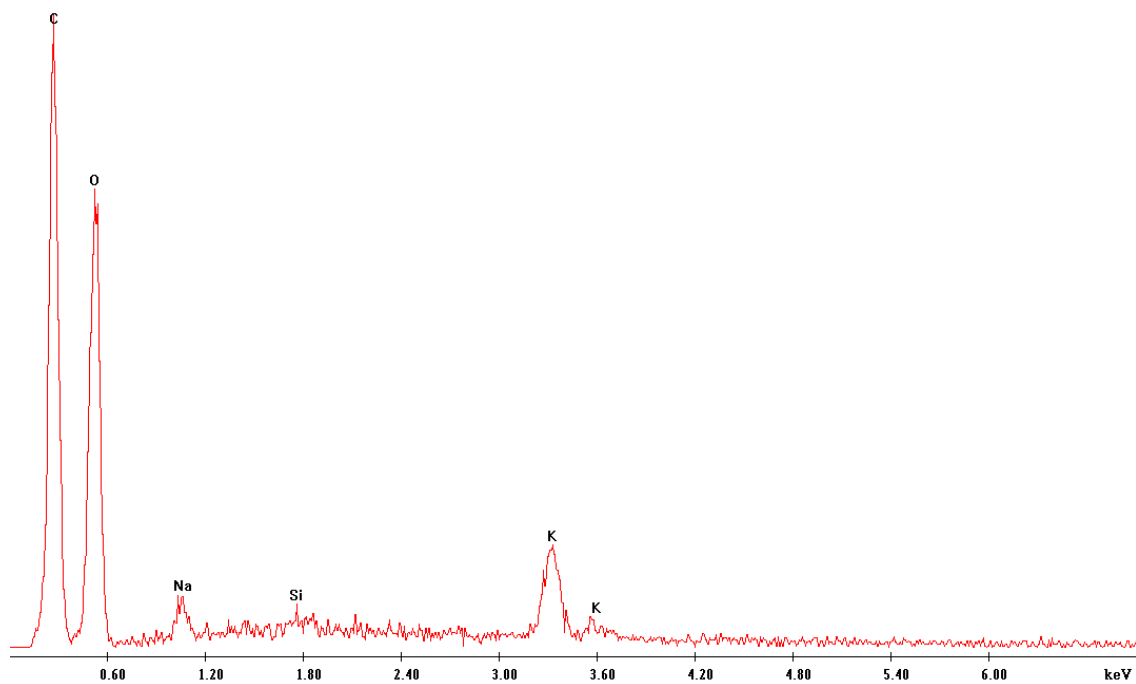
**Imagen en el punto K:**



**Análisis químico en el punto K:**

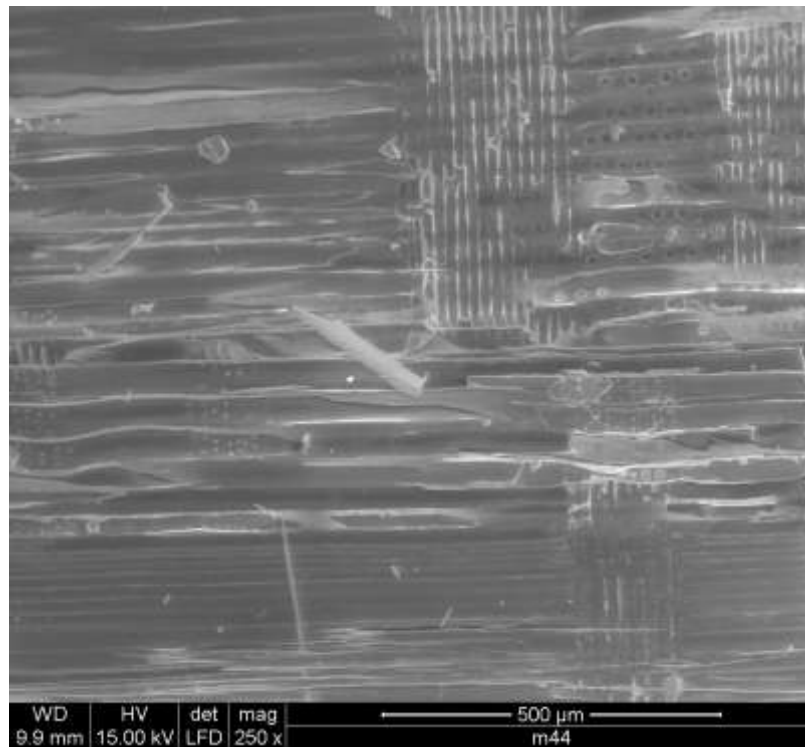
c:\edax32\genesis\genspc.spc

Label A:





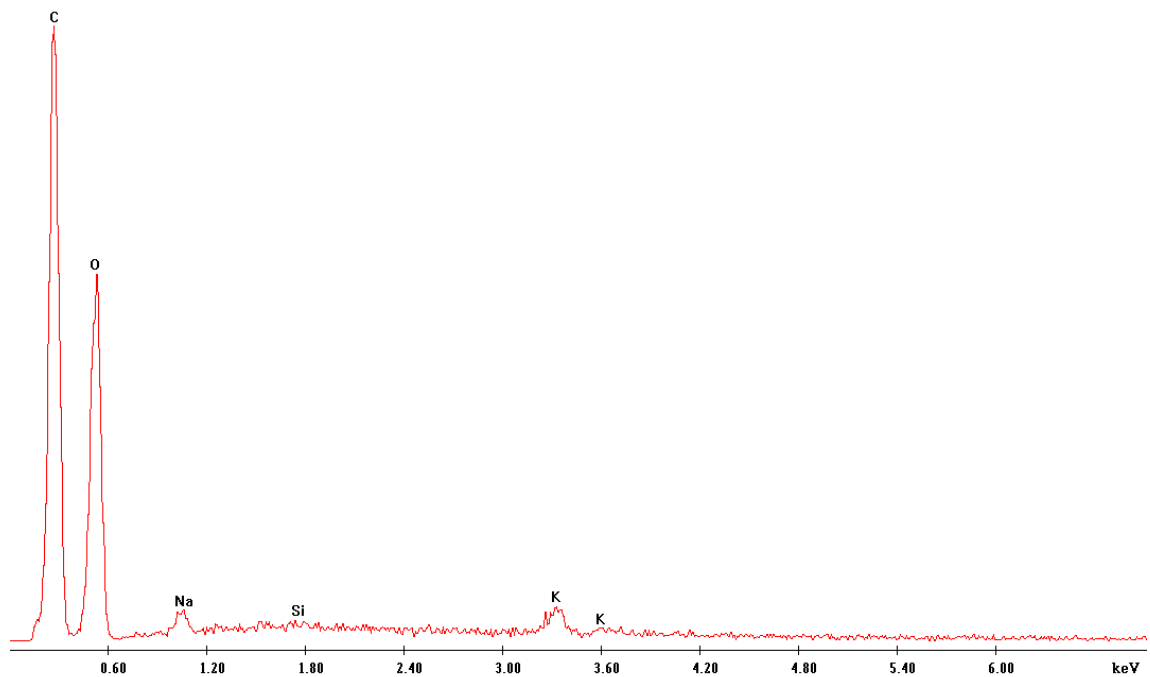
**Imagen en el punto L:**



**Análisis químico en el punto L:**

c:\edax32\genesis\genspc.spc

Label A:



Observando los resultados del análisis químico con el microscopio electrónico de barrido, se observa la presencia de Sodio (Na), Silicio (Si) y K (Potasio) en el punto I, predominando el K sobre los otros dos elementos químicos. A 1mm de profundidad disminuye la cantidad de los elementos, pero continúa habiendo producto; el Si es el que aparece en menor cantidad. En el punto K, a 5mm de profundidad, aún se observa la penetración de los productos. A 6mm y 7mm de profundidad se puede decir que no hay existencia de dichas sustancias. Por lo tanto, se extrae de este análisis la presencia de Solubor y KSil hasta una profundidad de 5mm en las caras axiales y superficialmente en las radiales.

En general, se presentan en mayor cantidad los elementos K y Na, quedando en un segundo plano la existencia de Si.

## CAPÍTULO 5: ENSAYOS DE COMPORTAMIENTO AL FUEGO

### 5.1 Introducción

Una vez completadas las fases de preparación de las muestras, impregnación de los distintos productos, segundas impregnaciones en algunos casos y verificación de la penetración de la solución en la madera, se lleva a cabo la última fase de la parte experimental, la realización de los ensayos de comportamiento al fuego para comprobar si los tratamientos realizados en las maderas logran retardar o modificar en cierta medida los efectos provocados por el fuego sobre las mismas.

En este estudio se ha optado por someter las muestras a dos tipos de ensayos normalizados que simulan, en circunstancias controladas, lo que podría ser la causa de iniciación de una llama y la propagación de la misma causando un incendio.

Las pruebas a las que han sido sometidas las muestras en el laboratorio del fuego han sido el Ensayo de Goteo y el Ensayo de Índice de Oxígeno (L.O.I.).

Se han realizado los dos ensayos en las muestras impregnadas con cada uno de los productos y en todas las combinaciones posibles con dos productos (todo esto repetido para las muestras de cara axial y cara radial). Previamente, han sido ensayadas muestras sin ningún tipo de tratamiento, tanto cortadas por la cara axial como radial; para poder así comparar las reacciones de la madera tratada con los distintos productos con la madera sin alterar químicamente.

A continuación se muestra una tabla con las muestras que han sido sometidas a ensayos de fuego, así como el tipo de corte de la madera y el tratamiento realizado:

**Tabla 5.1 Relación de muestras ensayadas**

RELACIÓN DE MUESTRAS ENSAYADAS			
IGNIFUGANTE	ENSAYO	CORTE	MUESTRA
SIN TRATAR	L.O.I.	AXIAL	M62
		RADIAL	M100
	GOTEO	AXIAL	M59
		RADIAL	M99
SOLUBOR	L.O.I.	AXIAL	M47
		RADIAL	M83
	GOTEO	AXIAL	M48
		RADIAL	M85
SOLUBOR + SOLUBOR	L.O.I.	AXIAL	M5
		RADIAL	M19
	GOTEO	AXIAL	M7
		RADIAL	M17

Tabla 5.1 *Relación de muestras ensayadas (continuación)*

RELACIÓN DE MUESTRAS ENSAYADAS			
IGNIFUGANTE	ENSAYO	CORTE	MUESTRA
SOLUBOR + KSil	L.O.I.	AXIAL	M12
		RADIAL	M84
	GOTEO	AXIAL	M46
		RADIAL	M21
KSil + SOLUBOR	L.O.I.	AXIAL	M50
		RADIAL	M89
	GOTEO	AXIAL	M53
		RADIAL	M88
SOLUBOR + NaSil	L.O.I.	AXIAL	M44
		RADIAL	M80
	GOTEO	AXIAL	M45
		RADIAL	M82
NaSil + SOLUBOR	L.O.I.	AXIAL	M27
		RADIAL	M78
	GOTEO	AXIAL	M28
		RADIAL	M77
KSil	L.O.I.	AXIAL	M58
		RADIAL	M98
	GOTEO	AXIAL	M55
		RADIAL	M97
KSil + KSil	L.O.I.	AXIAL	M52
		RADIAL	M86
	GOTEO	AXIAL	M51
		RADIAL	M91
NaSil	L.O.I.	AXIAL	M39
		RADIAL	M76
	GOTEO	AXIAL	M8
		RADIAL	M95
NaSil + NaSil	L.O.I.	AXIAL	M32
		RADIAL	M92
	GOTEO	AXIAL	M33
		RADIAL	M93
NaSil + KSil	L.O.I.	AXIAL	M31
		RADIAL	M81
	GOTEO	AXIAL	M29
		RADIAL	M79

## 5.2 Ensayo de goteo

Para la realización de este ensayo se ha seguido la Norma española UNE 23-725-90.

Dicha norma define un método de ensayo de reacción al fuego aplicable a los materiales de cualquier espesor, con el fin de contribuir a su clasificación en lo que se concierne a su comportamiento frente al fuego como materiales de construcción.

El ensayo consiste en someter las probetas a la radiación de una fuente de calor constante y provocar eventualmente la inflamación de los gases desprendidos y la caída de gotas inflamadas o no.

### 5.2.1 Equipo necesario

El equipo necesario ha constando de:

- Un radiador de una potencia nominal de 500W cuya superficie radiante es un disco de cuarzo transparente de 100mm de diámetro (1).
- Un soporte de probeta formado por un anillo metálico fijo, horizontal, de 122mm de diámetro interior, sobre el que se coloca un anillo metálico movable, horizontal, de 118mm de diámetro, sobre el que se sitúa una tela metálica inoxidable de las características siguientes (2):
  - Luz de malla: 2,10mm x 2,10mm.
  - Diámetro de hilo: 0,7mm.
- Un receptáculo de gotas en forma de cuba cilíndrica, de 118mm de diámetro y una profundidad de 12mm. Relleno de guata de celulosa (algodón hidrófilo 100% sanitario) (3).
- Una columna vertical que soporta estos tres elementos (4).
- Un vatímetro y un regulador de tensión (5).
- Un cronómetro (6).
- Una campana (7).
- Un termopar y un receptor digital (8).

El radiador se coloca en la parte superior, con el disco radiante horizontal y hacia abajo. Puede elevarse ligeramente y girar horizontalmente. Un tope permite volverlo a su posición normal de trabajo.

En posición normal de trabajo los ejes verticales del radiador, del portaprobetas y del receptáculo de gotas deben coincidir.

El equipo de ensayo se ha colocado en el interior de una campana en la que el sistema de ventilación no ha estado en funcionamiento durante el ensayo (9).

El receptáculo de gotas queda a 300mm por debajo de la rejilla del portaprobetas.

La superficie radiante del radiador se encuentra a 30mm de la cara superior de la probeta.



Figura 5.1 Detalles del equipo de Goteo

### 5.2.2 Método de ensayo

Previo montaje sobre la columna vertical el radiador, el portaprobetas y el receptáculo de las gotas con las distancias pertinentes, la muestra a ensayar y el termopar en la cara superior de la misma (retirando el radiador para que no incida en la muestra); se ha puesto en funcionamiento el equipo de tensión subiendo la potencia paulatinamente hasta alcanzar los 490W (como medida de precaución).

Una vez llegados a la potencia deseada, se debe esperar un tiempo aproximado de 20 minutos para que el radiador esté en régimen estacionario. Todo ello tardará unos 45 minutos.

Cuando se ha conseguido que el radiador quede estabilizado a 490W, se ha dispuesto el radiador en la posición de ensayo y el cronómetro a tiempo 0.

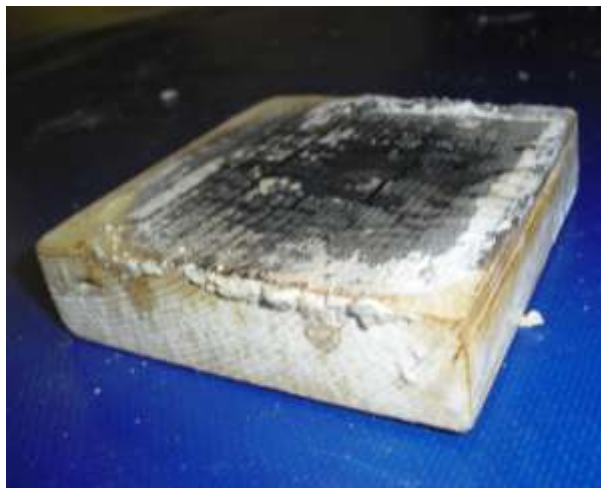
Cada vez que la muestra se ha inflamado, se ha apartado el radiador (esperando siempre 3 segundos). Al apagarse la llama se ha vuelto a poner en su sitio y se ha repetido el proceso tantas veces como ha sido necesario durante los 5 primeros minutos del ensayo.

Las muestras ensayadas se encontraban a temperatura ambiente y con una humedad relativa de entre el 12% y el 15%.

· Reacción de distintas muestras sometidas al Ensayo de Goteo:



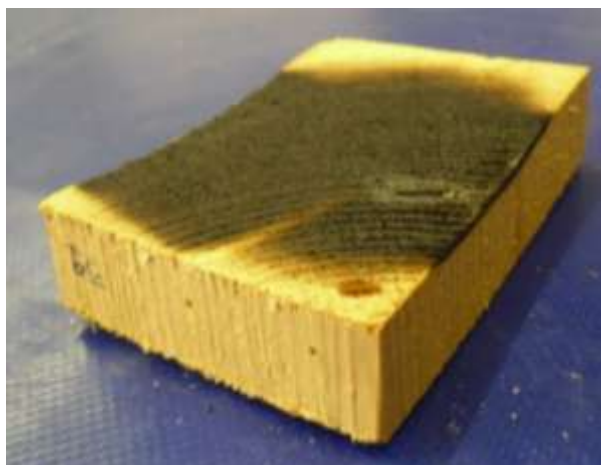
*Figura 5.2* Muestra M93, Impregnada doblemente con NaSil



*Figura 5.3* Muestra M82, Impregnada con Solubor y NaSil



*Figura 5.4* Muestra M51, Impregnada doblemente con KSil



*Figura 5.5* Muestra M59, Sin tratar



Al finalizar el ensayo se han recuperado los datos recogidos por el termopar en un programa informático, de tal forma que resulta una tabla de datos mostrando la temperatura a la que está la muestra a cada segundo.

Los datos han sido interpretados en una gráfica para poder ver la evolución de la temperatura durante todo el proceso de ensayo.

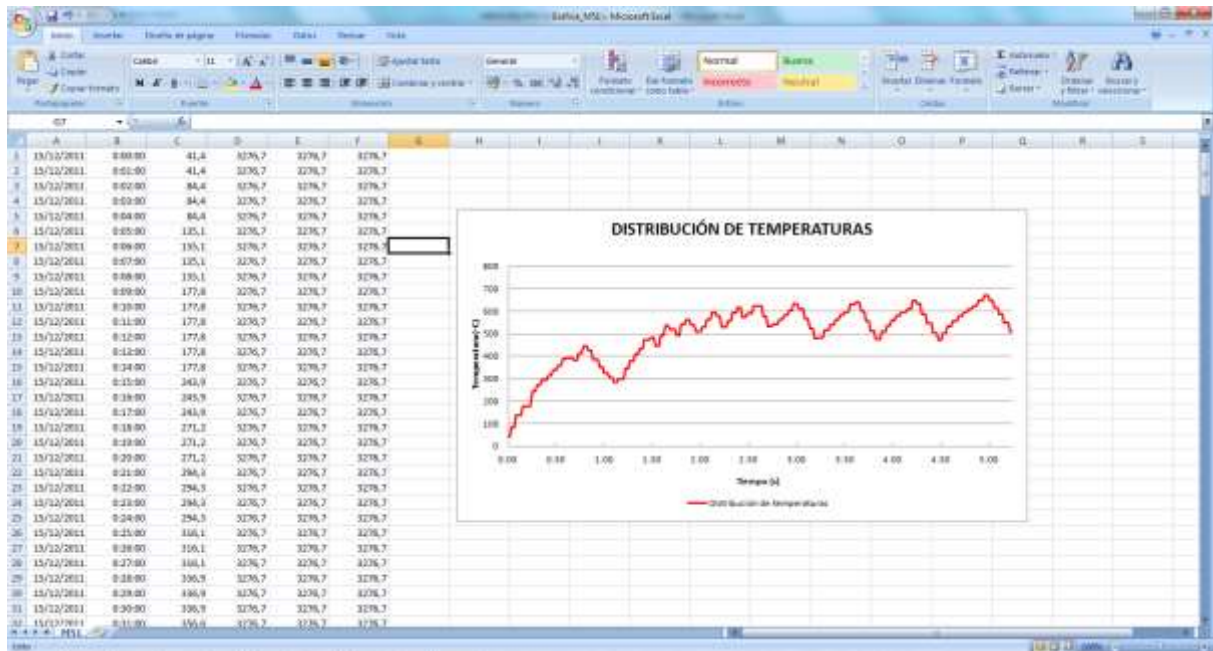


Figura 5.6 Datos registrados por el termopar

Los parámetros que se han tenido en cuenta a la hora de interpretar los resultados han sido: La caída de gotas inflamadas o no (en ninguno de los casos estudiados se han precipitado gotas).

Los tiempos en los que se producen las diversas inflamaciones, la duración de éstas y la longitud de las llamas. Las inflamaciones no se han considerado como efectivas si no persistían durante al menos 3 segundos.

La emisión y características de los humos.

El aspecto y la cantidad de residuo.

Todos los datos obtenidos sobre las muestras ensayadas, así como los resultados, se recogen y comentan en las fichas anexadas.

### 5.3 Ensayo de índice de oxígeno (LOI)

La realización de este ensayo se ha adaptado a la Norma europea UNE EN ISO 4589-1, en la que se describe el método, el equipo necesario, el tipo de muestras a ensayar y el procedimiento de uso.

Este ensayo determina el comportamiento al fuego de la probeta mediante el índice de oxígeno y consiste en aplicar una llama a la superficie de la muestra durante un tiempo máximo de 30 segundos con una retirada de la llama cada 5 segundos para verificar si la probeta está ardiendo. Esto también asegura que la temperatura de la probeta no aumente excesivamente ya que esto rebajaría, normalmente, el valor de oxígeno.

#### 5.3.1 Equipo necesario

El equipo utilizado se ha formado por:

- Chimenea de ensayo, que consta de un tubo de vidrio resistente al calor soportado verticalmente sobre una base a través de la cual pueden introducirse las mezclas de gases que contienen oxígeno. Las dimensiones son de 450mm de altura y 95mm de diámetro (1).
- Soporte de las probetas metálico (2).
- Suministro de gas, que comprende fuentes presurizadas de oxígeno (3) y nitrógeno (4).
- Suministro de gas propano (5).
- Encendedor de llama (6).
- Un rotámetro, que analiza y mide la proporción de oxígeno (7).
- Un cronómetro (8).
- Sistema de extracción de humos (9).
- Probetas de tamaño: 70mm x 20mm x 2mm (10).



Figura 5.7 Detalles del equipo de L.O.I.



Figura 5.8 Detalles del equipo de L.O.I.

### 5.3.2 Método de ensayo

El procedimiento de ensayo ha consistido en determinar entre qué cantidades de oxígeno la probeta analizada quema o no quema.

La primera muestra a ensayar ha sido una sin tratamiento previo para poder tener una idea de la proporción de oxígeno y nitrógeno por la que empezar en las sucesivas probetas.

Se ha colocado la probeta en el soporte para la misma y chimenea de vidrio con el soporte bajo la campana extractora, se ha encendido el rotámetro y se han abierto todas las llaves de paso de los gases (siguiendo el orden desde las más cercanas a la columna de vidrio hasta las más alejadas).

La campana extractora se mantiene en marcha durante el ensayo.

Para determinar el índice de oxígeno, se ha aplicado la mezcla de oxígeno y nitrógeno deseada en la columna y se ha prendido la superficie de la muestra con el quemador durante un tiempo máximo de 30 segundos, retirando la llama cada 5 segundos para verificar si la muestra está ardiendo.

En el instante en el que exista la llama, se debe controlar el tiempo de combustión de la pieza y, una vez extinguida, la altura de la muestra quemada.

Este procedimiento se ha ido repitiendo con probetas tratadas con la misma solución, variando las proporciones de oxígeno y nitrógeno, hasta conseguir estar entre dos valores que resulten el punto de inflexión entre quemar 50mm de la muestra o no quemarla.



Figura 5.9 Ensayo de L.O.I.

Los parámetros que se han tenido en cuenta a la hora de interpretar los resultados han sido:

- La concentración de oxígeno necesaria.
- El periodo de combustión.
- La longitud quemada.
- Respuesta a si quema o no quema.

Todos los datos obtenidos sobre las muestras ensayadas, así como los resultados, se recogen y comentan en las fichas anexadas.

## CAPÍTULO 6: LIXIVIACIÓN

Tal y como se comenta en el apartado 2.8 de la memoria, el procedimiento a seguir para este ensayo ha sido una adaptación a la norma debido a que los resultados buscados no requieren de los parámetros que marca.

### 6.1 Procedimiento

Para el estudio de la lixiviación se han escogido 8 muestras, 6 de ellas impregnadas con los diferentes productos y 2 sin tratar. En la siguiente tabla se detallan las maderas seleccionadas para el análisis:

**Tabla 6.1 Datos de las muestras a lixiviar**

DATOS DE LAS MUESTRAS						
MUESTRA	CORTE	IGNIFUGANTE 1	IGNIFUGANTE 2	HUMEDAD REL. (%)	PESO (g)	% RETENIDO
M5	AXIAL	SOLUBOR	SOLUBOR	6	36,5	54,2
M12	AXIAL	SOLUBOR	KSil	11	29,4	60,6
M13	AXIAL	SOLUBOR	-	10	29,6	24,5
M16	RADIAL	SOLUBOR	-	11	27,5	12,2
M39	AXIAL	NaSil	-	13	28,5	19,4
M65	AXIAL	-	-	6	20,6	-
M86	RADIAL	KSil	KSil	13	28,7	9,2
M100	RADIAL	-	-	6	20,3	-

Antes de realizar el ensayo se han cortado las muestras a un tamaño de 5cm x 5cm x 2cm, se les ha tomado la humedad con el higrómetro a temperatura ambiente y se han pesado con la báscula digital.



Figura 6.1 Selección de muestras a lixiviar

Las muestras preparadas han sido llevadas a la Universidad de Barcelona, al departamento de *Ciències dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica* para la realización del ensayo.

Cada probeta ha sido introducida en un recipiente de plástico con 500ml de agua destilada y tapado con parafilm y después con la tapa del recipiente, para evitar pérdidas de líquido cuando se introduzcan en la máquina.

Además de las 6 maderas, también se han preparado 2 blancos que consiste en colocar dos recipientes de plástico únicamente con el medio litro de agua destilada. Así se podrá comparar con las muestras de agua que sí contienen la probeta de madera.



Figura 6.2 Probeta con H<sub>2</sub>O



Figura 6.3 Recipiente de plástico con M86



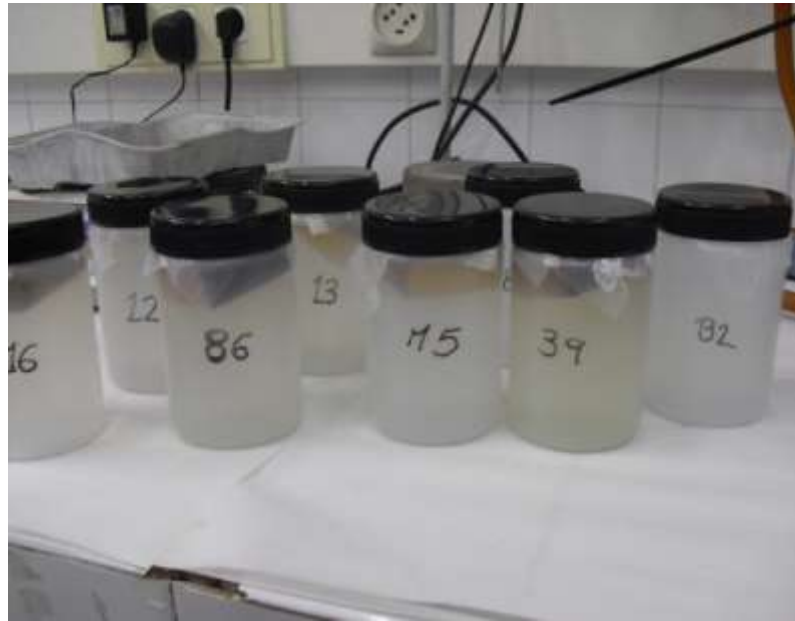


Figura 6.4 Recipientes con las muestras y blancos

La máquina centrifugadora admite hasta 24 muestras y el proceso ha consistido en hacer girar sobre el eje del aparato las probetas durante 24 horas.



Figura 6.5 Máquina centrifugadora



Figura 6.6 Colocación de botes en la centrifugadora

Pasadas las 24 horas, se han recuperado otra vez las probetas y se ha extraído de cada recipiente una muestra de 10ml para realizar el posterior análisis químico y observar la cantidad de producto ignífugo que ha sido lixiviado.

**Tabla 6.2 Datos de las muestras lixiviadas**

DATOS DE LAS MUESTRAS						
MUESTRA	CORTE	IGNIFUGANTE 1	IGNIFUGANTE 2	HUMEDAD REL. (%)	PESO (g)	% RETENIDO
M5	AXIAL	SOLUBOR	SOLUBOR	6	29,6	44
M12	AXIAL	SOLUBOR	KSil	11	24,9	51,3
M13	AXIAL	SOLUBOR	-	10	25,0	20,7
M16	RADIAL	SOLUBOR	-	12	25,5	11,3
M39	AXIAL	NaSil	-	13	27,3	18,6
M65	AXIAL	-	-	6	19,4	-
M86	RADIAL	KSil	KSil	13	27,8	8,9
M100	RADIAL	-	-	6	19,1	-

Las maderas se han dejado secar a temperatura ambiente y se han vuelto a pesar para comprobar, además del análisis desarrollado en el líquido, la pérdida de peso que han experimentado y, por lo tanto, la cantidad de producto que el agua destilada ha conseguido lixiviar.

Para la verificación de la lixiviación se han analizado los 10ml de líquido con el espectrómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente, modelo Perkin Elmer Optima 3200 RL, cuyo funcionamiento está explicado en el apartado 2.8.

## 6.2 Resultados

La tabla siguiente hace una relación de pesos y porcentajes retenidos en las muestras antes y después del proceso de lixiviación. Se puede comprobar la pérdida de peso en todas ellas.

**Tabla 6.3 Comparación de las muestras antes y después del proceso**

COMPARACIÓN ANTES DEL PROCESO Y DESPUÉS								
M	CORTE	IGNIF. 1	IGNIF. 2	PESO INICIAL (g)	% RETENIDO	PESO FINAL (g)	% RETENIDO	% PÉRDIDA
M5	AXIAL	SOLUBOR	SOLUBOR	36,5	54,2	29,6	44	10,2
M12	AXIAL	SOLUBOR	KSil	29,4	60,6	24,9	51,3	9,3
M13	AXIAL	SOLUBOR	-	29,6	24,5	25,0	20,7	3,8
M16	RADIAL	SOLUBOR	-	27,5	12,2	25,5	11,3	0,9
M39	AXIAL	NaSil	-	28,5	19,4	27,3	18,6	0,8
M65	AXIAL	-	-	20,6	-	19,4	-	-
M86	RADIAL	KSil	KSil	28,7	9,3	27,8	8,9	0,4
M100	RADIAL	-	-	20,3	-	19,1	-	-

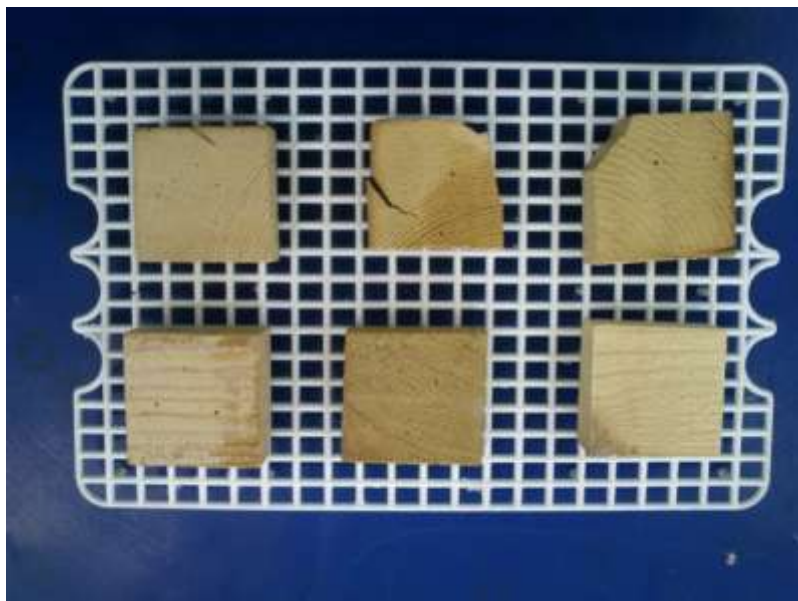


Figura 6.7 Selección de muestras lixiviadas

A continuación se muestra la tabla de resultados del análisis del espectrómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente, escogiendo los elementos químicos correspondientes a la composición de los ignifugantes. El silicio aparece en dos filas ya que se detecta con diferentes longitudes de onda.

Los resultados están expresados en mg/litro de concentración.

Tabla 6.4 Resultados del análisis ICP

RESULTADOS ICP						
Elemento	M13	M5	M12	M86	M39	M16
<b>Potasio (K)</b>	0,18	2,55	0,37	1,49	3,82	13,74
<b>Sodio (Na)</b>	1,27	0,28	9,15	16,34	0,81	1,03
<b>Boro (B)</b>	1,44	1,29	2,19	2,62	0,52	0,38
<b>Silicio (Si)</b>	2,04	1,85	17,32	0,20	0,13	0,19
<b>Silicio (Si)</b>	4,04	1,39	23,23	0,71	0,77	0,15

Observando estos datos, se llega a la conclusión de que la pérdida de los componentes de los productos protectores es despreciable, ya que las concentraciones son muy bajas.

La tabla 6.3 refleja los porcentajes de pérdida de peso, que se mueven entorno al 0,4% y 10,2%, por lo tanto el supuesto al que se puede llegar es que entre la cantidad de estas pérdidas experimentadas se encuentren componentes propios de la madera como los

taninos, no reflejados en el análisis con el espectrómetro de emisión óptica por tratarse de componentes orgánicos.

En un principio, y fijándonos en la tabla 6.7, cualquiera de estos productos ha tenido una respuesta positiva frente al ensayo de lixiviación, con lo que se podría plantear impregnaciones en madera destinada a usos exteriores.

También se observa una excepción entre las muestras ensayas, la **M12**, que corresponde a una impregnación de Solubor más KSil. Los niveles de Silicio han sido elevados en comparación con el resto, puesto que en su superficie se había formado una película vidriosa producto del silicato de potasio. Se entiende que los valores se ven alterados por esta causa, siendo despreciable, también en este caso, la cantidad de producto lixiviado del interior de la pieza.

## CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 7.1 Introducción

En este capítulo se ha realizado un estudio comparativo de las muestras tratadas con los tres productos, analizando los resultados de los ensayos practicados.

Para cada ensayo se han utilizado probetas con diferentes dimensiones y geometría. Teniendo en cuenta lo anterior y que los productos no responden igual en ambos ensayos, se ha decidido separar el análisis según el ensayo realizado.

En el ensayo de Goteo se han tenido en cuenta los parámetros siguientes:

- El tiempo en el que quema por primera vez.
- La duración media de la llama.
- La temperatura mínima a la que se produce ignición.
- El número de inflamaciones que se producen a lo largo del ensayo.

El objetivo es que la muestra no inflame y, en caso de que lo haga, que sea lo más tarde posible y que la llama tenga una duración corta. La temperatura mínima de ignición suele ser directamente proporcional al tiempo de la primera inflamación y el número de inflamaciones inversamente proporcional a la duración media de la llama.

En el ensayo de Índice de Oxígeno se ha tenido en cuenta el porcentaje máximo de O<sub>2</sub> que soporta la probeta sin quemar. Para el análisis de los resultados de este ensayo, se debe tener en cuenta que las probetas escogidas tienen unas dimensiones muy pequeñas comparadas con el ensayo de Goteo y, por otro lado, no se puede saber con exactitud si la pieza ha impregnado de forma homogénea lo que hace que el ensayo de L.O.I. sea menos real que el de Goteo.

Una dificultad añadida a este estudio comparativo es la diferencia en los porcentajes de producto retenido en cada muestra, ya que el proceso de impregnación no responde por igual en los tres productos ni en las diferentes direcciones de la madera. Las muestras cortadas axialmente retienen mayor cantidad de ignifugante que las cortadas radialmente, debido a que las primeras tienen mayor superficie perpendicular a las fibras. Además, el método de impregnación no permite realizar un control de la cantidad de producto que penetra en cada caso.

Se ha intentado buscar la comparación entre muestras que contengan un porcentaje de producto parecido, en la medida de lo posible. Por ello, se analizan por separado según la dirección de las fibras del corte. Todos los datos y la información comentados en este apartado están recogidos en las fichas de trabajo anexas al proyecto.

## 7.2 Estudios comparativos

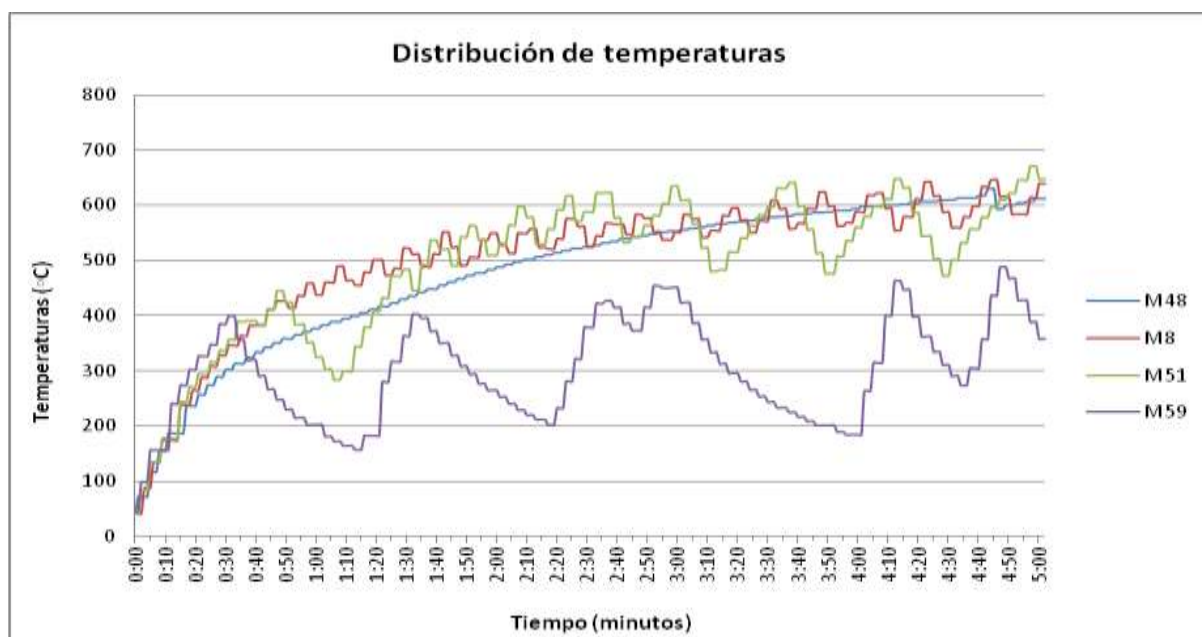
### 7.2.1 Muestras ensayadas en Goteo

Las tablas siguientes muestran algunos de los resultados obtenidos en el ensayo, acompañados de unos gráficos de temperatura; en éstos se aprecian picos que corresponden a cada una de las igniciones producidas, por lo que se ha omitido en las tablas el número de inflamaciones.

- Corte axial:

**Tabla 7.1 Resultados del ensayo de Goteo**

IMPREG.	IGNIFUGANTE	M	% RETENIDO EN 1ª	% TOTAL RETENIDO	TIEMPO 1ª INFLAMACIÓN (s)	DURACIÓN MEDIA LLAMA (s)
1	SOLUBOR	48	36,9	-	283	1
1	NaSil	8	17	-	35	6
2	KSil + KSil	51	20	21,7	33	10
0	SIN TRATAR	59	-	-	28	40



*Figura 7.1* Gráfico de temperaturas recogido por el termopar

En esta primera tabla se muestran los resultados del ensayo de Goteo con una única impregnación. En el caso del producto KSil se ha decidido comparar la de doble impregnación, ya que el tanto por ciento de producto retenido es más parecido al resto de muestras.

Las muestras **M8** y **M51** mejoran la duración media de la llama, siendo los demás resultados muy parecidos a la **M59**.

Sin embargo, la **M48** inflama una única vez y casi al final del ensayo, con una duración de la llama de 1 segundo. Por lo tanto, si se tiene en cuenta la Norma UNE 23-725-90 no se consideraría como que ha quemado, ya que la llama debe persistir durante por lo menos 3 segundos.

De este análisis se desprende que el Solubor destaca notablemente por su eficacia en su comportamiento frente al fuego. Por otro lado, los productos NaSil y KSil se alejan bastante de los resultados obtenidos con el producto anterior, teniendo este último una mayor concentración en la muestra.

**Tabla 7.2 Resultados del ensayo de Goteo**

IMPREG.	IGNIFUGANTE	M	% RETENIDO EN 1ª	% TOTAL RETENIDO	TIEMPO 1ª INFLAMACIÓN (s)	DURACIÓN MEDIA LLAMA (s)
2	NaSil + SOLUBOR	28	24,2	41,8	139	3
2	NaSil + KSil	29	18,8	25	79	3
2	SOLUBOR + SOLUBOR	7	29,9	55,6	79	3
2	NaSil + NaSil	33	15,1	32,9	62	7
2	KSil + KSil	51	20	21,7	33	10
0	SIN TRATAR	59	-	-	28	40
2	KSil + SOLUBOR	53	15,2	41,7	0	0
2	SOLUBOR + NaSil	45	41,5	56,6	0	0
2	SOLUBOR + KSil	46	41,9	81,8	0	0

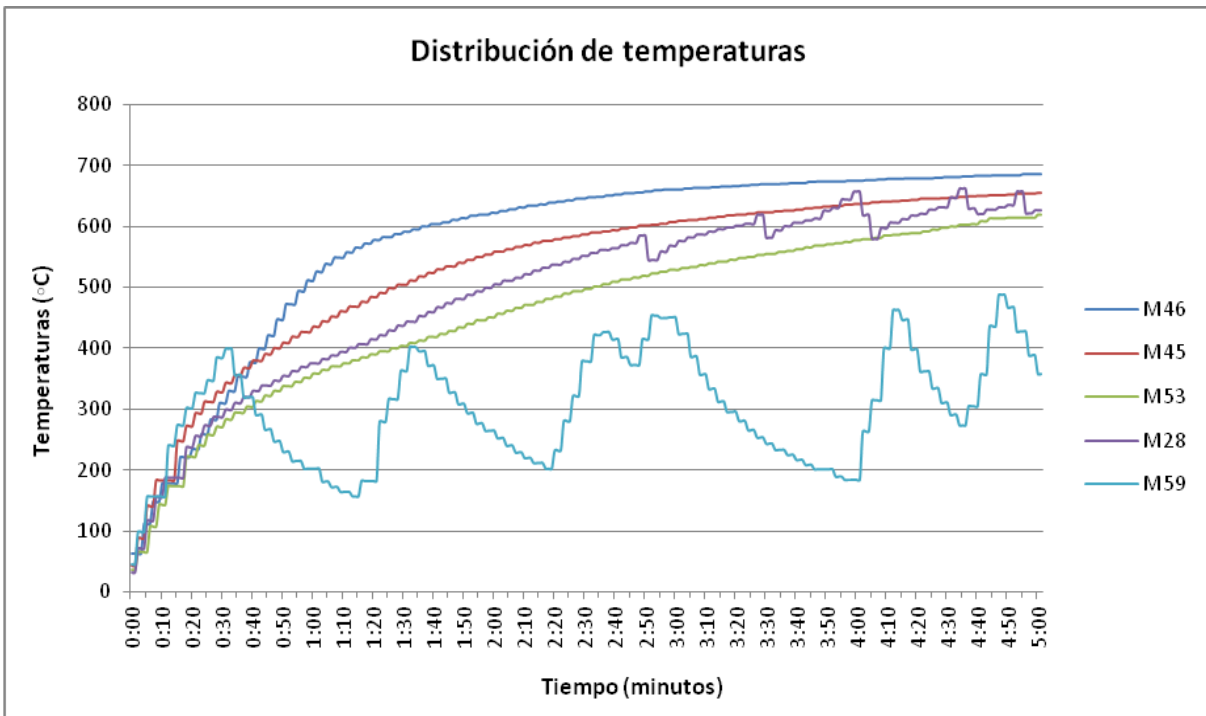


Figura 7.2 Gráfico de temperaturas recogido por el termopar

Las muestras **M53**, **M45** y **M46** no han quemado, la **M28** retarda el tiempo de la primera inflamación hasta casi 2 minutos y la duración de la llama es de tan sólo 3 segundos. Todas ellas son combinaciones de Solubor con otro producto.

Se deduce que en las muestras (refiriéndose siempre al corte axial) que contienen a partir de un 25% de Solubor no se produce la deflagración, siempre y cuando este producto esté combinado con otro. A partir de aquí, si se aumenta la concentración de Solubor, no se aprecian mejoras en el comportamiento frente al fuego.



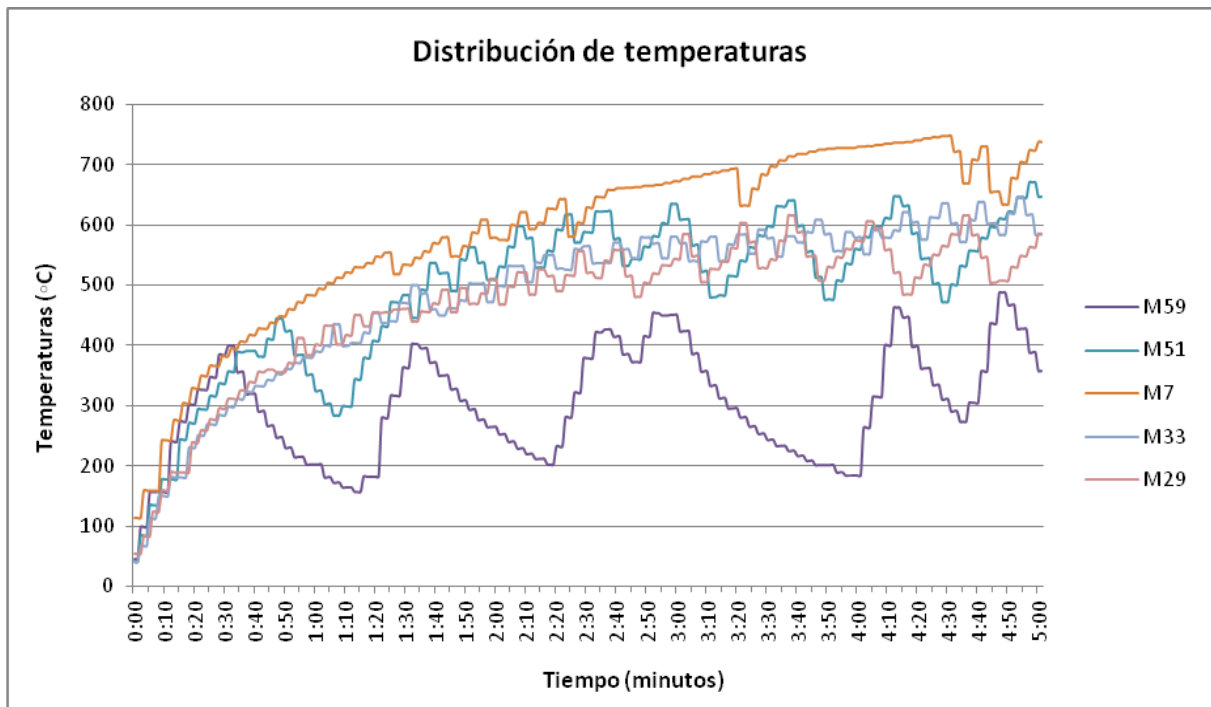


Figura 7.3 Gráfico de temperaturas recogido por el termopar

Las muestras **M29** y **M51**, con concentraciones de producto parecidas, han tenido comportamientos muy distintos; siendo más favorable la primera.

Observando las muestras impregnadas dos veces con NaSil y KSil independientemente (**M33** y **M51**) y la muestra impregnada con NaSil más KSil (**M29**), se comprueba que la sinergia de los dos productos tiene un mejor comportamiento que éstos por separado.

- Corte radial:

**Tabla 7.3 Resultados del ensayo de Goteo**

IMPREG.	IGNIFUGANTE	M	% RETENIDO EN 1ª	TIEMPO 1ª INFLAMACIÓN (s)	DURACIÓN MEDIA LLAMA (s)
1	SOLUBOR	85	17,7	60	16
1	KSil	97	9,9	20	13
1	NaSil	95	4,3	16	12
0	SIN TRATAR	99	-	12	58

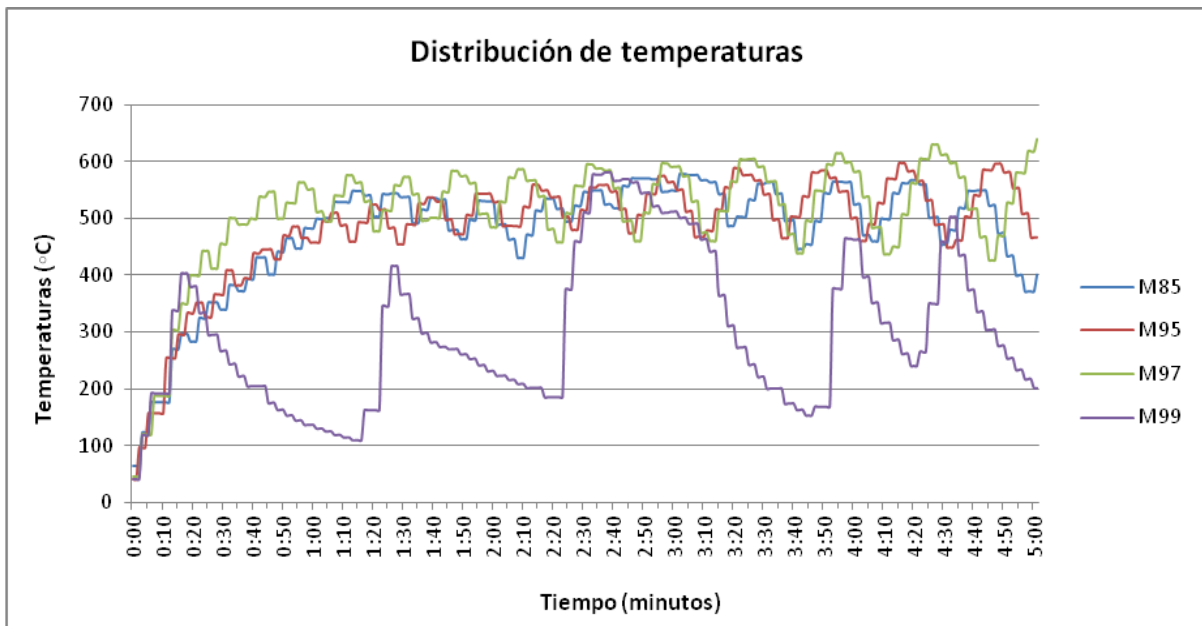


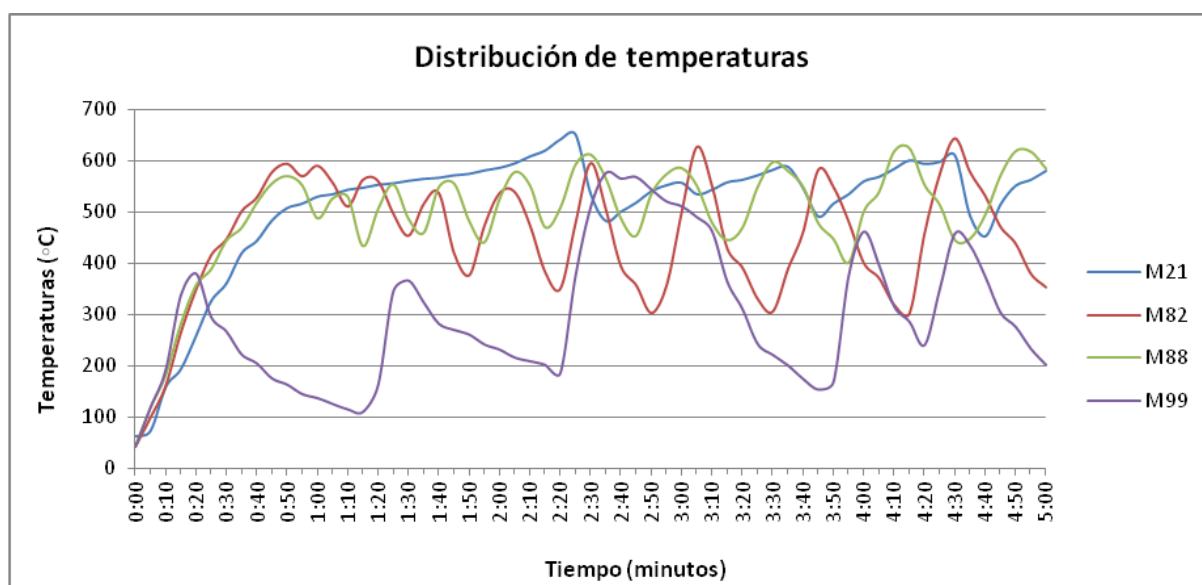
Figura 7.4 Gráfico de temperaturas recogido por el termopar

Puesto que las concentraciones son muy diferentes entre ellas, sólo es aplicable la comparación de cada una respecto a la muestra sin tratar.

En la tabla se aprecia cómo las muestras tratadas, aun habiendo retenido poca cantidad de producto (como la **M95**), mejoran el comportamiento frente al fuego.

**Tabla 7.4 Resultados del ensayo de Goteo**

IMPREG.	IGNIFUGANTE	M	% RETENIDO EN 1ª	% TOTAL RETENIDO	TIEMPO 1ª INFLAMACIÓN (s)	DURACIÓN MEDIA LLAMA (s)
2	SOLUBOR + KSil	21	14,8	44,8	142	6
2	KSil + SOLUBOR	88	9	15,4	50	15
2	SOLUBOR + NaSil	82	28	36,1	50	17
2	NaSil + SOLUBOR	77	5,9	24,4	36	12
2	SOLUBOR + SOLUBOR	17	11,9	24,6	28	15
2	NaSil + NaSil	93	10,5	10,4	23	12
2	KSil + KSil	91	14,9	13,5	13	18
2	NaSil + KSil	79	8,5	14,5	12	9

*Figura 7.5* Gráfico de temperaturas recogido por el termopar

Las muestras **M21** y **M82** son comparables en cuanto a porcentaje de solución total retenida, pero no en cuanto a la cantidad retenida de cada producto. La **M82** ha retenido más porcentaje de Solubor, pero menos NaSil que la **M21** de KSil; aun así, ha funcionado mejor la **M21**. Esto podría ser consecuencia de la película vidriosa que ha formado el KSil en la superficie de la madera.

Si se comparan las muestras **M82** y **M88**, se deduce que en el sentido radial no influye tanto la cantidad de Solubor retenida sino que lo importante es la concentración impregnada de NaSil o de KSil (refiriéndose a sinergias de Solubor con otro producto), ya que ambas muestras se han comportado frente al fuego de forma muy parecida.

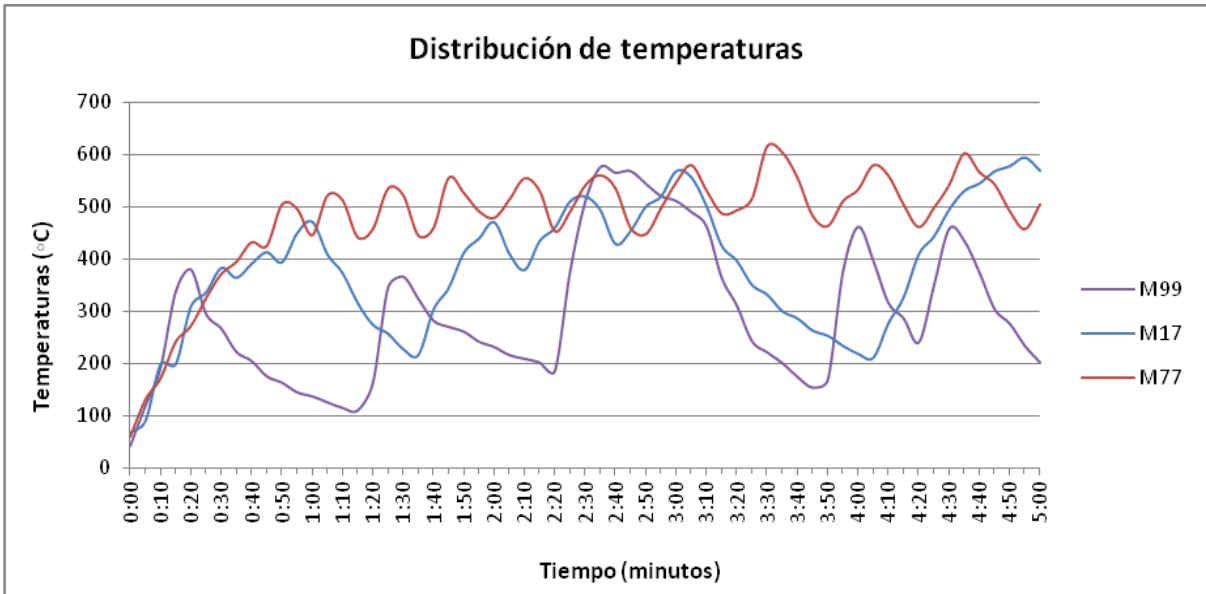


Figura 7.6 Gráfico de temperaturas recogido por el termopar

Las muestras **M17** y **M77** tienen el mismo porcentaje de retenido total y, sin embargo, la primera ha actuado peor en el ensayo de fuego. Por lo tanto, se reafirma la influencia positiva de la sinergia de NaSil o KSil con Solubor.

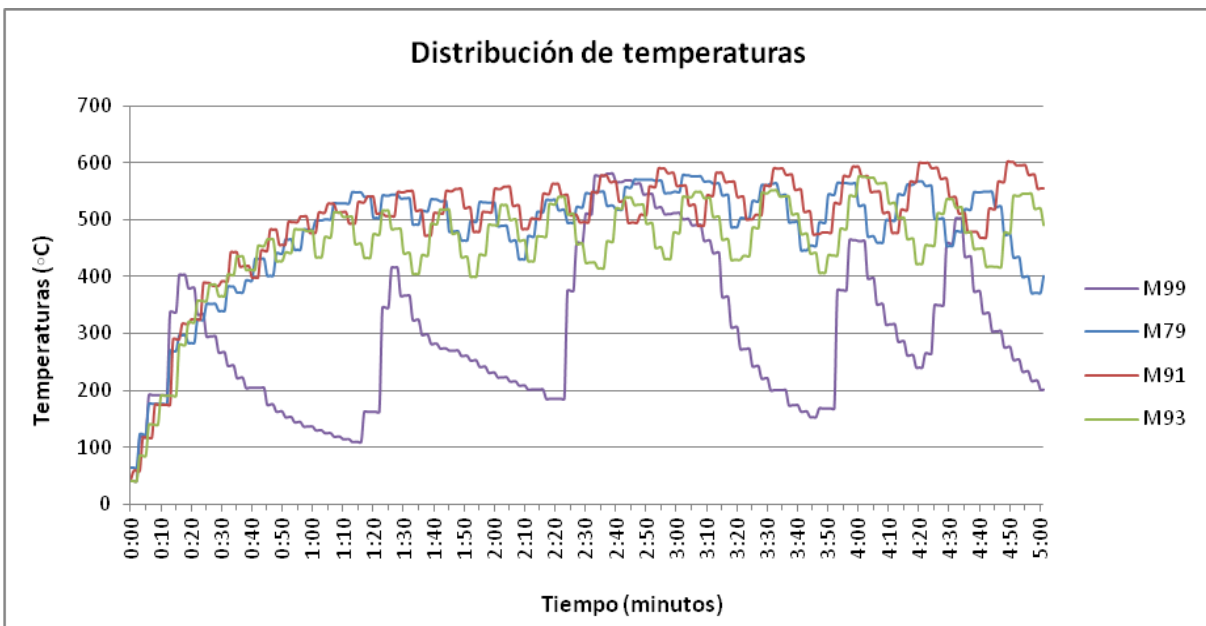


Figura 7.7 Gráfico de temperaturas recogido por el termopar

En cuanto a las maderas tratadas dos veces con el mismo producto, se observa una mejor respuesta que en la madera sin tratamiento. Dentro de los silicatos, el NaSil (muestra **M93**) protege mejor la madera que el KSil (muestra **M91**) aun teniendo una menor concentración el primero.

A diferencia de la cara axial, la combinación de NaSil y KSil en la cara radial es muy similar a la doble impregnación de éstos por separado; las diferencias en el comportamiento no son significativas.

### 7.2.2 Muestras ensayadas en L.O.I.

- Corte axial:

**Tabla 7.5 Resultados del ensayo de L.O.I.**

IMPREG.	IGNIFUGANTE	M	% RETENIDO EN 1ª	% DE O <sub>2</sub> LÍMITE
1	SOLUBOR	47	28,3	79,1
1	KSil	58	13,1	30,9
1	NaSil	39	19,4	30
0	SIN TRATAR	62	-	26

En las muestras ensayadas con L.O.I. se observa una mejora con cualquiera de los tres productos respecto a la madera sin tratar.

El resultado de la muestra **M47**, tratada con Solubor, se aleja bastante de las demás, ya que consigue alcanzar un valor de oxígeno de 79,1%; mientras que las de KSil y NaSil alcanzan un valor de 30,9% y 30% respectivamente.

**Tabla 7.6 Resultados del ensayo de L.O.I.**

IMPREG.	IGNIFUGANTE	M	% RETENIDO EN 1ª	% TOTAL RETENIDO	% DE O <sub>2</sub> LÍMITE
2	SOLUBOR + SOLUBOR	5	26,5	54,2	80
2	KSil + SOLUBOR	50	17,1	51,1	79,1
2	SOLUBOR + KSil	12	31,1	60,6	76,9
2	SOLUBOR + NaSil	44	37,4	51,5	76,9
2	NaSil + SOLUBOR	27	15,1	35	57,1
2	NaSil + NaSil	32	15,9	35,9	30,9

Si se analizan los resultados obtenidos en la muestra con una sola impregnación de Solubor (**M47**) de la tabla anterior y los de la madera impregnada dos veces con Solubor (**M5**), se observa cómo a partir de un cierto porcentaje de producto, no resulta rentable la aplicación de más cantidad de Solubor ya que con la mitad alcanzas valores muy altos.

Prestando atención a las muestras **M12** y **M44** que contienen más Solubor que la **M47**, se podría afirmar que dentro de una sinergia de boratos con silicatos el Solubor tiene un efecto dominante. Es por esto que según los resultados de L.O.I. carece de sentido impregnar la madera con KSil o NaSil, ya que utilizando sólo el Borato de Sodio ya se consiguen mejores resultados.

Teniendo en cuenta las muestras **M12** y **M44**, se comprueba que las dos alcanzan el mismo valor de O<sub>2</sub>. Dado que los porcentajes de los productos en las dos piezas son diferentes (la muestra **M12** tiene el doble de KSil que la **M44** de NaSil), se corrobora que la aplicación de Solubor en la madera es la que actúa protegiéndola frente al fuego.

La **M32** y la **M39** alcanzan el mismo límite de O<sub>2</sub> teniendo la primera casi el doble de concentración de NaSil que la segunda. Por lo tanto, se deduce que no sería necesario aumentar la cantidad más de un 19,4%.

#### - Corte radial:

**Tabla 7.7 Resultados del ensayo de L.O.I.**

IMPREG.	IGNIFUGANTE	M	% RETENIDO EN 1ª	% TOTAL RETENIDO	% DE O <sub>2</sub> LÍMITE
2	SOLUBOR + SOLUBOR	19	15,4	26	51,1
2	SOLUBOR+ NaSil	80	24,5	37,1	46
2	SOLUBOR + KSil	84	26,6	56,4	41,1
2	KSil + SOLUBOR	89	8,2	15	32
2	NaSil + SOLUBOR	78	8,4	20,25	30

En el corte radial se ha decidido realizar el ensayo en aquellas muestras que contenían Solubor, dado que en el resto de ensayos se ha ido comprobando que son las que mejor actúan frente al fuego.

La muestra que ha obtenido un mejor valor de O<sub>2</sub>, como en el corte axial, ha sido la **M19** (impregnada doblemente con Solubor). Se reafirma que el Solubor combinado con otra sustancia empeora.

## **CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES**

Con la realización de este proyecto se ha podido profundizar en los conocimientos sobre madera y estudiar el comportamiento de la misma. Las investigaciones sobre protección de la madera previas a este estudio han sido de gran ayuda para llevar a cabo el proyecto.

A continuación se recogen, a modo de reflexión final, las principales conclusiones obtenidas en los distintos capítulos de este estudio, cuyo objetivo último ha sido analizar y mejorar el comportamiento frente al fuego aplicando productos ignifugantes en la madera.

Parece conveniente comenzar estas conclusiones haciendo explícitas las ideas básicas que han guiado toda esta investigación. La primera de ellas ha consistido en comprobar qué producto comercial de los empleados en el proceso experimental le ofrecía a la madera una mayor protección frente al fuego.

Otra idea primordial en el estudio, se ha fundamentado en el análisis de las posibles mejoras mediante la combinación de los distintos protectores.

El segundo capítulo de este proyecto ha perseguido aportar al trabajo los aspectos teóricos sobre los materiales y todos aquellos ensayos necesarios para la correcta evolución del proceso experimental. En los sucesivos apartados, se expone el desarrollo de dicha investigación.

Para el desarrollo práctico de la investigación, aunque se ha partido de métodos de aplicación y ensayos ya conocidos, ha sido necesario adaptarlos para su aplicación en el laboratorio.

Se ha establecido una planificación de trabajo con el objetivo de optimizar los recursos y el tiempo empleados. Sin embargo, a lo largo de toda la fase empírica han surgido inconvenientes y dificultades que han supuesto la modificación de la programación inicial.

Concluida la etapa experimental y realizadas las comparaciones pertinentes, resulta satisfactorio observar el cumplimiento de los objetivos planteados en un primer momento.

De la impregnación de las muestras se llega a la conclusión que, dependiendo de la viscosidad de la solución, de la dirección de las fibras y la temperatura de aplicación, las concentraciones retenidas en la madera y la penetración varían. Por lo tanto, para un mismo proceso han impregnado mejor aquellas muestras cortadas en la dirección axial.

No obstante, si se tiene en cuenta la aplicación de la madera en la construcción (estructura, revestimientos), ésta siempre se encuentra en el sentido menos favorable a la impregnación del producto (dirección radial).

Partiendo de los dos ensayos de fuego efectuados en el proyecto, se demuestra que en ambos el retardante de llama Solubor con fórmula: octaborato disódico tetrahidratado le confiere a la madera una mayor protección tanto sólo como en combinación con otro producto.

Sin embargo, aparecen algunos resultados contradictorios que pueden ser consecuencia de las características y dimensiones de las probetas empleadas en cada ensayo. En Goteo se ensayan muestras de dimensiones 10 cm x 10 cm x 2 cm sometidas a una fuente de calor (radiador) intermitente sobre las testas; mientras que en L.O.I. las probetas se extraen de muestras ya impregnadas y de igual tamaño que las ensayadas en Goteo, las cuales miden 10 cm x 2 cm x 0,2 cm y están sometidas a una llama directa sobre el canto. Dado que las piezas impregnadas no contienen el producto protector homogéneamente, las probetas para ensayar en el Índice de Oxígeno Límite difieren en la concentración según la zona de la que se han extraído.

Parece interesante prestar especial atención a la mejora de la protección contra el fuego mediante la combinación de boratos más silicatos, siendo suficiente un contenido del primero superior al 25% del peso de la muestra para que no se produzca la deflagración. Por otro lado, si tenemos en cuenta el ensayo de Índice de Oxígeno Límite impregnando la muestra únicamente con octaborato disódico tetrahidratado, también se obtienen límites de oxígeno muy elevados con tan sólo un 28% del compuesto.

Teniendo en cuenta el resto de impregnaciones, se observa que los silicatos no pueden actuar por sí solos y necesitan de la combinación con boratos para ofrecerle a la madera la protección frente al fuego necesaria.

Partiendo de los resultados obtenidos en este estudio, se podrían derivar varias líneas de desarrollo para proyectos futuros y mejorar algunos aspectos del proceso experimental.

Puesto que las muestras cortadas en sentido radial han impregnado con más dificultad y que la madera aplicada en construcción trabaja en la dirección de las fibras, se podría mejorar la impregnación realizando unas pequeñas perforaciones en la madera que favorecieran el paso del producto hacia el interior, para así obtener mejores resultados en los ensayos frente al fuego. Otra posibilidad sería el estudio de la impregnación de las maderas con nuevos productos.

También se podrían buscar alternativas que mejoraran la penetración de los productos protectores de mayor viscosidad, en este caso, los silicatos de sodio y de potasio.



## **Agradecimientos**

En primer lugar queremos dar las gracias a nuestros tutores Laia Haurie y Joaquín Montón por confiar en nosotras y darnos la oportunidad de realizar este Proyecto Final de Grado. También agradecerle a Josep Culí la ayuda incondicional que nos ha prestado durante la etapa experimental del estudio, enseñándonos el funcionamiento de todos los ensayos.

## BIBLIOGRAFÍA

### LIBROS:

- [1] Peraza Sánchez, Fernando. (Madrid 2001). *Protección preventiva de la madera*. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho, DL (AITIM).
- [2] Vélez Muñoz, Ricardo. (Madrid 1968). *La Madera y su resistencia al fuego*. AITIM.
- [3] Fernández Golfín, Juan Ignacio y Conde García, Marta. (Madrid 2007). *Manual técnico de secado de maderas*. AITIM.
- [4] García Esteban L., Guindeo Casasús A., Peraza Oramas C., de Palacios de Palacios P. (Madrid 2003). *La madera y su anatomía*. Fundación Conde del Valle de Salazar, Ediciones Mundi-Prensa, AITIM.
- [5] Vega Catalán L., Llinares Cervera M., Villagrà Fernández C., Gallego Guinea V., González Rodrigo B. (Madrid 2010). *Guía de Construir con Madera*. Iniciativa de la Confederación Española de Empresarios de la Madera (CONFEMADERA).

### ARTÍCULOS:

- [6] Baysal E., Sonmez A., Colak M., Toker H. (2006). *Amount of leachant and water absorption levels of wood treated with borates and water repellents*. *Bioresource Technology*, 97, 2271–2279.
- [7] Baysal E., Altinok M., Colak M., Ozaki S.K., Toker H. (2007). *Fire resistance of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) treated with borates and natural extractives*. *Bioresource Technology*, 98, 1101–1105.
- [8] Grexa O., Poutch F., Manikova D., Martvonova H., Bartekov A. (2003). *Intumescence in fire retardancy of lignocellulosic panels*. *Polymer Degradation and Stability*, 82(2003), 373–377.
- [8] Stevens R., van Es D. S., Bezemer R., Kranenbarg A. (2006). *The structure eactivity relationship of fire retardant phosphorus compounds in wood*. *Polymer Degradation and Stability* 91, 832-841.
- [9] Pereyra A.M., Giudice C.A. (2009). *Flame retardant impregnants for woods based on alkaline silicates*. *Fire SafetyJournal*, 44, 497–503.

- [10] García Alba, Santiago. (Julio y Agosto 1996). *La madera y el fuego*. Vol. I, II y III, artículo nº 182. AITIM.
- [11] Mozó, Alberto. (Vigo). *Los productos de la construcción de madera y su comportamiento frente al fuego*.
- [12] Forintek Canada Corp. (Septiembre 2002). *Borate-Treated Wood for Construction*.
- [13] Haurie L., Montón J., Lacasta Ana M. (Portugal 2011). *New strategies for fire retardancy of pine and beech woods*.
- [14] Pizzi, A., Thevenon M.F., Tondi G., Wieland S. (Portugal 2011). *Tannin-boron wood preservatives*.

**NORMATIVA:**

- [15] CTE. Código Técnico de la Edificación Documento Básico SI (2006). *Seguridad en caso de Incendio*.
- [16] UNE EN ISO 4589-1: 2000, 4589-2:2001. *Determinación del comportamiento al fuego mediante el índice de oxígeno*.
- [17] UNE 23725: 1990. *Ensayos de reacción al fuego de los materiales de construcción. Ensayo de goteo aplicable a los materiales fusibles. Ensayo complementario*.
- [18] UNE EN 12457. *Caracterización de residuos, lixiviación, ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos*.
- [19] UNE EN 56416: 1988 *Protección de la madera. Métodos de tratamiento*.
- [20] UNE EN 351-1: 2008. *Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Madera maciza tratada con productos protectores. Parte 1: Clasificación de las penetraciones y retenciones de los productos protectores. Parte 2: Guía de muestreo de la madera tratada para su análisis*.

**PÁGINAS WEB CONSULTADAS:**

- [21] [www.coac.net/oct](http://www.coac.net/oct)
- [22] [www.arauco.cl](http://www.arauco.cl)
- [23] [www.itma.es](http://www.itma.es)
- [24] [www.borax.com](http://www.borax.com)
- [25] [www.brenntag.es](http://www.brenntag.es)
- [26] [www.revista.unam.mx](http://www.revista.unam.mx)
- [27] [www.sct.ub.es](http://www.sct.ub.es)
- [28] [www.fotonostra.com](http://www.fotonostra.com)

## **ANEXOS**

- Colección de 68 fichas de trabajo donde se especifica la muestra, el tratamiento o tratamientos realizados, los análisis que se le han podido efectuar y los ensayos aplicados así como los resultados de los mismos.
- 4 fichas con los datos de los productos químicos empleados en el estudio.