



Escola Politècnica Superior
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERIA DE LA EDIFICACIÓN

TRABAJO FINAL DE MASTER

ESTUDIO DE NUEVOS RETARDANTES DE LLAMA PARA LA IGNIFUGACIÓN DE MADERA MACIZA

Projectista: Fco. Javier Garcia Zumaquero
Director/s: Laia Haurie Ibarra
Joaquín Montón Lecumberri
Convocatòria: Abril 2015

RESUMEN

A lo largo de este trabajo se ha estudiado el comportamiento de reacción al fuego de diversas muestras de madera conífera. Para ello se han utilizado muestras impregnadas con tratamientos protectores y otras sin, para contrastar tanto cuantitativa como cualitativamente su mejora.

Durante el desarrollo de la primera parte del proyecto, se presentan diferentes aspectos relevantes y necesarios para la comprensión de la investigación. Estos capítulos tratan de realizar la función de recordatorio y/o ampliación sobre el fuego, los retardantes de llama y la madera.

Después de generar una visión global y repasar los aspectos más relevantes de estos, se ha procedido al desarrollo de la segunda parte del proyecto. En la parte experimental partiremos de unos primeros estadios de investigación realizados con anterioridad por otros investigadores de la Universidad Politécnica de Catalunya, los cuales nos definen una línea de investigación y unos objetivos.

Este objetivo se ha basado en analizar muestras de madera, de dos especies de pino diferentes, pino Laricio y pino Silvestre, impregnadas con diferentes soluciones para posteriormente ensayar su comportamiento frente a la reacción a la combustión.

Concluido el análisis de resultados podemos observar como en todas las soluciones utilizadas se obtiene una mejora sensible del comportamiento de la madera, tanto en las muestras de pino Laricio, como las muestras de pino Silvestre, por tanto el objetivo primario de la investigación que resuelto satisfactoriamente.

Cuantitativamente encontramos un producto que destaca sobre el resto, este es el Polifosfato de amonio FR CROS 134, el cual se trata de una solución comercial cedida por el fabricante *Budenheim*. Aunque como se ha recalado en la investigación no todos sus resultados son satisfactorios debido a la gran presencia de humos densos durante la realización de los ensayos, hecho que lo penaliza.

Otro foco de interés sobre el cual ha pivotado la investigación era el uso de la Epsomita, como solución a impregnar, con un porcentaje de solución del 25%. Este porcentaje venia condicionado por las investigaciones anteriores, las cuales utilizaban el doble de Epsomita. Por tanto se ha trabajado en reducir la concentración y comprobar su eficacia.

Para completar la investigación y obtener un marcador de comparación donde poder reflejar el comportamiento de la Epsomita, se ha considerado en utilizar un retardante de llama de la familia de los boratos, el Octaborato disodico tetrahidratado ($\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$), comercializado bajo el nombre de **Solubor**.

Para poder comparar el comportamiento de ambos productos se han realizado impregnaciones con el mismo porcentaje (25%) en las cuales muestran un comportamiento bastante similar en cuanto al ensayo del índice de oxígeno y bunsen, con algunas diferencias en el ensayo de goteo.

ÍNDICE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
INTRODUCCION	9
1. EL FUEGO	11
1.1. El fuego y los incendios	13
1.2. El comportamiento del Fuego	13
1.2.1. Del triángulo al tetraedro del fuego.....	13
1.2.2. Las fases del fuego (Vancells, 2013).....	14
1.3. El proceso de Combustión.....	15
1.3.1. La llama	15
1.3.2. Los humos y gases	15
1.3.3. El calor	16
1.4. Mecanismos de Extinción.....	17
1.5. Los costes de los incendios	18
2. RETARDANTES DE LLAMA	21
2.1. Desarrollo de los Retardantes de Llama y su aplicación	23
2.2. Clasificación y Definición	25
2.2.1. Según su Adhesión a los Materiales:.....	25
2.2.2. Según su Mecanismo De Acción:.....	25
2.2.3. Según su Composición:	26
3. LA MADERA	31
3.1. Composición de la Madera.....	33
3.2. Combustión de la Madera	34
3.3. Reacción y Resistencia al Fuego	35
3.3.1. Reacción al Fuego.....	35
3.3.2. Resistencia al Fuego	36
3.4. Características de Reacción al Fuego de los Diferentes Usos de la Madera	37
3.4.1. Madera Estructural.....	37
3.4.2. Madera Laminada	37
3.4.3. Tableros Derivados de la Madera	37
3.4.4. Revestimientos de Suelos Laminados	39
3.4.5. Suelos de Madera y Parqué.....	39
3.4.6. Revestimientos Murales Interiores y Exteriores de Madera Maciza	40
3.5. Reacción al Fuego según el CTE	41
3.6. Tratamientos de Protección Contra el Fuego en Madera	41
3.6.1. Tratamientos Pasivos	42

3.6.2.	Tratamientos Activos.....	42
3.7.	La Impregnación de la madera.....	44
3.7.1.	Impregnabilidad.....	44
3.7.2.	Clases de Uso y Nivel de Penetración (CTE).....	45
3.8.	Retardantes de Llama en Madera.....	47
3.8.1.	Retardantes de llama más comunes aplicados en madera.....	47
3.9.	Líneas de Investigación.....	48
3.9.1.	Plasma.....	48
3.9.2.	Grafitos Expandibles.....	49
4.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	51
4.1.	Muestras de Madera.....	53
4.1.1.	Pinus Sylvestris (Pino Silvestre) (Peraza Sánchez & et al, 2004).....	53
4.1.2.	Pinus Nigra (Pino Laricio) (Peraza Sánchez & et al, 2004).....	54
4.2.	Preparación y caracterización de las muestras.....	55
4.3.	Soluciones para impregnar.....	57
4.3.1.	La Epsomita.....	57
4.3.2.	Solubor.....	58
4.3.3.	Polifosfato de Amonio.....	59
4.4.	Secado de las muestras.....	60
4.5.	Proceso de impregnación.....	60
4.5.1.	El autoclave.....	60
4.5.2.	Selección de muestras y colocación.....	61
4.6.	Secado y pesaje.....	63
4.7.	Resultados de la impregnación.....	63
4.8.	Ensayos de reacción al fuego.....	65
4.8.1.	Ensayo de goteo (UNE 23725:1990).....	65
4.8.2.	Ensayo del índice de oxígeno (L.O.I.) (UNE-EN ISO 4589- A1:2006).....	68
4.8.3.	Ensayo con bunsen.....	70
5.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	73
5.1.	Ensayo de goteo.....	75
5.2.	Ensayo del índice de oxígeno (L.O.I.).....	78
5.3.	Ensayo del Bunsen.....	80
5.4.	Comparación de resultados con otros estudios sobre la Epsomita.....	86
6.	CONCLUSIONES.....	91
7.	REFERENCIAS.....	95
8.	NOTMATIVAS CONSULTADAS.....	97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Triangulo del fuego, Fuente: http://10tiposde.com/fuego	13
Ilustración 2: Tetraedro del fuego; Fuente http://10tiposde.com/fuego	14
Ilustración 3: Reacción en Cadena y Evolución de un Incendio; Fuente: Elaboración propia	14
Ilustración 4: Ratio de muertes por millon de población; Fuente: USFA, Fire Death Rate Trends: An International Perspective, 2011.....	20
Ilustración 5: Mecanismos de acción de los retardantes de llama; Fuente: Fire Science Reviews - Laura Anne Lowden et Al (Lowden & Terence, 2013).....	29
Ilustración 6: Composición de la madera de pino; Fuente: Facultad de Ingeniería UDELAR.....	34
Ilustración 7: Temperaturas de descomposición de la madera maciza expuesta al fuego; Fuente: Scientific Figure on ResearchGate.....	35
Ilustración 8: Sistema Bethel (Célula Llena)	42
Ilustración 9: Sistema Lowry (Célula Vacía).....	43
Ilustración 10: Sistema Vac-Vac	43
Ilustración 11: Impregnación mediante plasma; Fuente: Beam International with material and atoms (Karel, 2011)	48
Ilustración 12: Preparación y corte de las muestras; Fuente: Elaboración Propia	56
Ilustración 13: Análisis TGA de una muestra de Epsomita; Fuente: Facultad de Química UPC..	57
Ilustración 14: Preparación de la Epsomita.....	58
Ilustración 15: Epsomita Fuente: Chemicalbook.....	58
Ilustración 16: Solubor; Fuente: Chemicalbook	58
Ilustración 17: Preparación del Solubor; Fuente: Elaboración propia	59
Ilustración 18: Polifosfato de amonio; Fuente: Chemicalbook	59
Ilustración 19: Formula para cálculo de la humedad por pesadas; Fuente: Elaboración propia	60
Ilustración 20: Autoclave para ensayos EPSEB; Fuente: Elaboración propia	61
Ilustración 21: Jaula para la impregnación: Imagen izquierda corresponde a una vista en planta y la imagen derecha a una vista en alzado; Fuente: Elaboración propia	62
Ilustración 22: Impregnación con polifosfato de amonio FR CROS 134; Fuente: Elaboración propia	62
Ilustración 23: Muestras impregnadas y posteriormente en el proceso de secado; Fuente: Elaboración propia	63
Ilustración 24: grafica del % de impregnación media por especie y solución respecto del peso seco; Fuente: Elaboración propia.....	64
Ilustración 25: Ensayo de goteo en laboratorio del fuego EPSEB; Fuente: Elaboración propia .	65
Ilustración 26: Esquema tipo del ensayo de goteo; Fuente: Rutland Plastics Limited. CO, UK ..	66
Ilustración 27: Ensayo de goteo en el radiador; Fuente: Elaboración propia	67
Ilustración 28: Muestras ensayadas en el ensayo de goteo; Fuente: Elaboración propia.....	67
Ilustración 29: Muestras cortadas en tiras preparadas para realización del L.O.I.; Fuente: Elaboración propia	68
Ilustración 30: Muestra 317 - P.Silvestre - L.O.I.	69
Ilustración 31: Esquema tipo del ensayo del índice de oxígeno; Fuente: Rutland Plastics Limited. CO, UK	69
Ilustración 32: Esquema del ensayo del Bunsen; Fuente: (Abu-Isa, 2002)	70
Ilustración 33: Datalogger registrando ensayo; Fuente: Elaboración propia.....	71
Ilustración 34: Ensayo de llama directa con Bunsen; Fuente: Elaboración propia	71
Ilustración 35: Muestra ensayada; Fuente: Elaboración propia	71
Ilustración 36: Parte inferior durante el ensayo; Fuente: Elaboración propia.....	71
Ilustración 37: Muestra 216 P.Silvestre (sin tratar), Muestra 108 P. Laricio (Polifosfato); Fuente: Elaboración propia	77
Ilustración 38: Muestra 408 P.Laricio (Epsomita), Muestra 315 P.Silvestre (Solubor)	77

Ilustración 39: Izq. Muestra 319 P.Laricio (Sin tratar); Dcha. 317 P.Silvestre (Epomita); Fuente: Elaboración propia 78

Ilustración 40: Ensayo positivo de L.O.I. con combustión total de la muestra; Fuente: Elaboración propia 79

Ilustración 41: Evolución TCsuplqz en muestras de Pino Laricio; Fuente: Elaboración propia... 80

Ilustración 42: Evolución TCinf en muestras de Pino Laricio; Fuente: Elaboración propia 81

Ilustración 43: Iqda. Muestra 422 P.Laricio (sin tratar); Centro y Derecha. Muestra 118 PLaricio (App); Fuente: Elaboración propia 81

Ilustración 44: Evolución TCsuplqz en muestras de Pino Silvestre; Fuente: Elaboración propia 82

Ilustración 45: Muestra 218 P.Laricio (App) en ensayo del bunsen y después de realizarlo; Fuente: Elaboración propia 82

Ilustración 46: Evolución TCinf en muestras de Pino Silvestre; Fuente: Elaboración propia 83

Ilustración 47: Evolución TCsuplqz en muestras con Epsomita; Fuente: Elaboración propia 84

Ilustración 48: Muestra 403 P.Laricio (Ep 17,68%); Muestra 115 P.Silvestre (28,80%); Fuente: Elaboración propia 84

Ilustración 49: Evolución TCsuplqz en muestras con Solubor; Fuente: Elaboración propia 85

Ilustración 50: Evolución TCsuplqz en muestras con Polifosfato de amonio; Fuente: Elaboración propia 85

Ilustración 51: Evolución de la Tª en el termopar superior en muestras de Epsomita (53% de concentración); Fuente: (Revilla, 2015) 87

Ilustración 52: Evolución TCsuplqz en muestras con Epsomita; Elavboración propia 87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Pérdidas en millones de Euros sobre el PIB en relación a los incendios; Fuente: WORLD FIRE STATISTICS - THE GENEVA ASSOCIATION No.29, April 2014 – table 2	18
Tabla 1.2: Ratio de muertes relacionadas con los incendios y por país; Fuente: WORLD FIRE STATISTICS - THE GENEVA ASSOCIATION No.29, April 2014 – table 2	19
Tabla 1.3: WORLD FIRE STATISTICS - THE GENEVA ASSOCIATION No.29, April 2014 - table 6... ..	19
Tabla 2.1: Tabla resumen de la clasificación retardantes de llama; Fuente: Elaboración propia	28
Tabla 3.1: Descomposición de la madera; Fuente: Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction - Laura Anne Lowden and Terence Richard Hull (Lowden & Terence, 2013)	34
Tabla 3.2: Clasificación de las propiedades de reacción al fuego de los productos de madera para uso estructural; Fuente: Real Decreto 110/2008.....	37
Tabla 3.3: Clasificación de las propiedades de reacción al fuego de las maderas laminadas encoladas; Fuente: Real Decreto 110/2008.....	37
Tabla 3.4: Clasificación de las propiedades de reacción al fuego de los tableros derivados de la madera; Fuente: Real Decreto 110/2008.....	37
Tabla 3.5: Clasificación de las propiedades de reacción al fuego de los revestimientos de suelo laminados; Fuente: Real Decreto 110/2008	39
Tabla 3.6: Clasificación de las propiedades de reacción al fuego de los suelos de madera y parquet; Fuente: Real Decreto 110/2008	39
Tabla 3.7: Clasificación de las propiedades de reacción al fuego de los revestimientos murales interiores y exteriores de madera maciza; Fuente: Real Decreto 110/2008	40
Tabla 3.8: Clases de reacción al fuego de los elementos constructivos, decorativos y de mobiliario; Fuente: CTE-DB-SI-Propagación interior - Tabla 4.1	41
Tabla 3.9: Impregnabilidad de la madera según su especie; Fuente: Tabla C2 UNE-EN 350-2:1995	44
Tabla 3.10: Elección del tipo de protección; Fuente: CTE: DB SE-M Tabla 3.1	46
Tabla 4.1: Propiedades físicas y mecánicas del pino silvestre; Fuente: Especies de Madera - AITM	53
Tabla 4.2: Propiedades físicas y mecánicas del pino Laricio; Fuente: Especies de Madera - AITM	54
Tabla 4.3: Medición del % de humedades en la recepción de las vigas; Fuente: Elaboración propia	55
Tabla 4.4: Código de colores para las muestras; Fuente: Elaboración propia	56
Tabla 4.5: Caracterización de las muestras; Fuente: Elaboración propia	56
Tabla 4.6: Resumen de cantidades de solución; Fuente: Elaboración propia	59
Tabla 4.7: % de impregnación media por especie y solución respecto del peso seco; Fuente: Elaboración propia	63
Tabla 4.8: Comparativo de impregnación entre solución y realidad, Fuente: Elaboración propia	64
Tabla 5.1: Resumen ensayo de goteo en muestras Pino Laricio; Fuente: Elaboración propia ...	75
Tabla 5.2: Resumen ensayo de goteo en muestras de Pino Silvestre.....	76
Tabla 5.5.3: Resumen ensayo Índice de Oxígeno.....	78
Tabla 5.4: Comparativa L.O.I. para impregnaciones con Epsomita del 25 y 53%; Fuente: Elaboración propia	88
Tabla 5.5: Resumen ensayo de goteo en muestras de Pino Silvestre; Fuente: Elaboración propia	88
Tabla 5.6: Resumen ensayo de goteo en muestras de Pino Laricio; Fuente: Elaboración propia	89

INTRODUCCION

Este proyecto se enmarca dentro de la línea de investigación que viene desarrollando el grupo GICITED, con la colaboración del laboratorio del fuego de la EPSEB. El objetivo es mejorar el comportamiento al fuego de la madera usada en construcción, y de esta manera minimizar su contribución a la propagación en caso de incendio. Actualmente se está trabajando con sales de Epsomita, las cuales son solubles en agua y mediante impregnaciones con autoclave son introducidas en el interior de la madera.

Ya se ha realizado una primera investigación sobre la Epsomita, en la cual se ha impregnado una cantidad de solución hasta el punto de saturación. Este primer ensayo ha sido positivo en cuanto a los diferentes ensayos realizados. En la actualidad nos planteamos reducir y pautar la cantidad de Epsomita utilizada para observar si hay una mejora significativa de su comportamiento en los ensayos de reacción al fuego y a su vez compararla con otros productos comerciales para cuantificar y validar su rendimiento como retardante de llama. Otro punto interesante planteado ante de iniciar la investigación tratará de comparar los resultados obtenidos con los estudios ya realizados unificando los ensayos a realizar.

A su vez, para completar a la investigación, se ha considerado interesante realizar un estado del arte, a modo didáctico, donde se van a repasar los conceptos básicos de todos los agentes que intervendrán durante la investigación.

Este estado del arte queda dividido en tres capítulos, el primero referente al fuego donde podremos repasar sus propiedades y comportamiento. El segundo capítulo, más cercano a la química, donde realizaremos una contextualización sobre el estado de los retardantes de llama y su evolución. Y un tercer capítulo destinado a la madera, desde un contexto centrado en su comportamiento respecto al fuego, repasando las normativas y tratamientos actuales.

En conjunto, este proyecto, intentará desde su introducción lograr ofrecer una visión clara y amplia sobre las diferentes posibilidades que tenemos para mejorar las propiedades de las maderas, así como de conocer los diferentes mecanismos que intervienen en los procesos de combustión para poder seleccionar los productos adecuados en función de nuestras necesidades.

1. EL FUEGO

1.1. El fuego y los incendios

Habitualmente se usa tanto la palabra fuego como incendio indistintamente como el mismo término, en cambio, existen diferencias notables. La norma UNE-13943 nos define el fuego como toda aquella combustión de carácter intencionado y controlado. En cambio cuando este fuego se descontrola se produce el incendio.

El fuego forma una de las herramientas más importantes en el desarrollo de la humanidad, se tiene constancia de su uso hace más de 1.600.000 años por el homo erectus (Montalvo Luna, 2013). En la actualidad, la mayoría de procesos industriales utilizados hoy en día utilizan el fuego como herramienta principal. El fuego se puede definir como una emisión, en forma de luz y calor, producida por un proceso de combustión.

La combustión es una reacción química de oxidación-reducción (*Redox*) entre un elemento o material oxidante, **comburente**, y un elemento reductor, denominado **combustible**. Habitualmente el proceso se manifiesta produciendo incandescencia o llama, por tanto generará una reacción energética exotérmica, desprendiendo gran cantidad de calor. Para que la combustión se inicie se necesitara una **energía de activación** o *foco de calor*.

1.2. El comportamiento del Fuego

1.2.1. Del triángulo al tetraedro del fuego

Tradicionalmente, se ha realizado un esquema gráfico común sobre el cual se representan los diferentes elementos que componen un fuego. Es un esquema muy visual denominado el triángulo del fuego, donde en cada uno de sus lados encontramos los tres elementos fundamentales necesarios para que pueda producirse el fuego: El comburente, el combustible y la energía de activación (Lacasta, 2016).

- **El comburente:** también conocido como agente oxidante, es el gas que permite el inicio y desarrollo del fuego, participando en la combustión oxidando el combustible. El comburente por antonomasia es el oxígeno del aire, el cual tiene una concentración alrededor del 21%.
- **El combustible:** se trata de cualquier material capaz de liberar energía y arder en presencia un gas oxidante y una fuente de activación. Podemos encontrar combustibles en los tres estados de la materia, sólidos, líquidos y gases. Los combustibles, o materiales, no reaccionan químicamente por si solos, sino que debido al efecto de la **pirólisis**, un material sometido a calor reacciona en un proceso de descomposición emanando gases que en combinación con el oxígeno son inflamables.
- **La energía de activación:** es una fuente de calor que se aporta de forma externa que provoca la separación o disgregación de los átomos que componen el combustible en electrones, denominados radicales libres. Estos a su vez reaccionan con los componentes del comburente y que son los que provocan el proceso de oxidación.

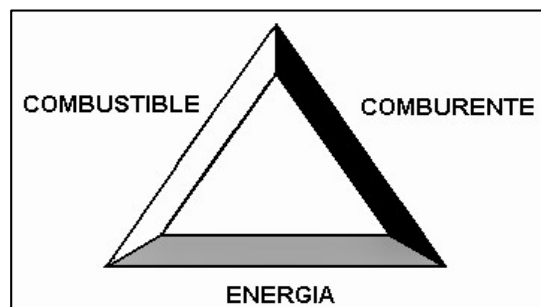


Ilustración 1: Triángulo del fuego, Fuente: <http://10tiposde.com/fuego>

La teoría del triángulo del fuego se ha mantenido vigente cientos de años, pero solo consigue explicar la activación y mantenimiento del fuego pero no su progreso, para ello se desarrolló la teoría del tetraedro del fuego. Esta teoría, se basa en la adhesión de un elemento más al triángulo que explica este fenómeno, **la reacción en cadena** y al igual que en el triángulo del fuego, si se interrumpe alguno de ellos no será posible la continuación del incendio (Lacasta, 2016).

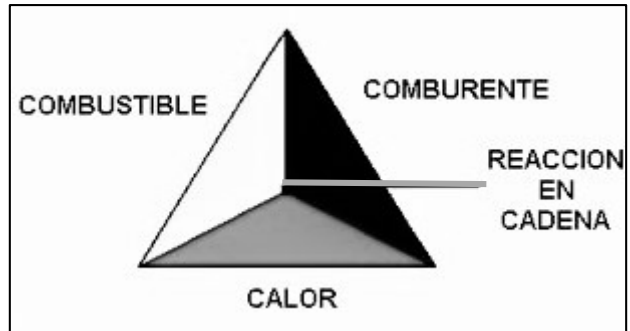


Ilustración 2: Tetraedro del fuego;
Fuente <http://10tiposde.com/fuego>

- **La reacción en cadena:** este factor permite que el desarrollo del fuego progrese en el espacio y en el tiempo. Cuando la energía de activación interacciona sobre el combustible y este a su vez con el comburente, se produce la disgregación de sus materiales en electrones o radicales libres, que a su vez, estos radicales libres se vuelven a actuar sobre otros átomos del combustible que vuelven a reaccionar con el comburente, creando nuevos radicales libres, creando en un proceso exponencial, ya que estos vuelven a actuar sobre los átomos generando una gran progresión geométrica con en el tiempo, esto hace que el fuego no solo se mantenga sino que progrese en el tiempo.

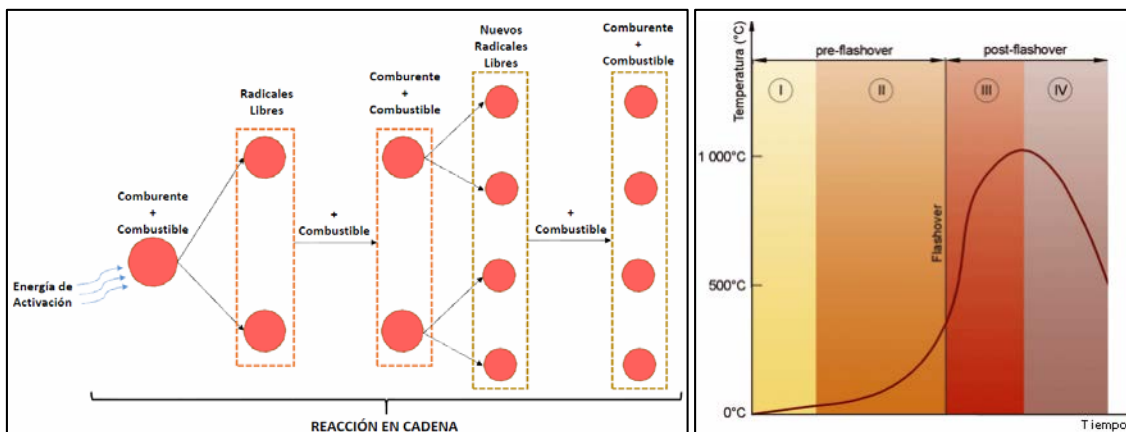


Ilustración 3: Reacción en Cadena y Evolución de un Incendio; Fuente: Elaboración propia

1.2.2. Las fases del fuego (Vancells, 2013)

La evolución del fuego, al igual que sus componentes, se puede clasificar por una serie de etapas o fases que engloban su comportamiento desde los primeros estadios, hasta su total extinción.

- **Fase I:** en esta fase el material combustible comienza a desprender o disgregar partículas, invisibles a simple vista, debido a un aumento de la temperatura.
- **Fase II:** Aumento exponencial de la concentración de partículas que se desprenden del material y se mezclan con el oxígeno, empieza la aceleración de la reacción en cadena hasta llegar al *flashover* (combustión súbita).
- **Fase III:** Se da la conjunción de los componentes del tetraedro del fuego y se produce un crecimiento exponencial del desarrollo del incendio donde hay una gran liberación de humos y de calor debido a la descomposición de los materiales.

- **Fase IV:** Intensidad máxima del incendio donde debido a la gran cantidad de gases y vapores pueden haber explosiones y líquidos y sólidos pulverizados en el ambiente. El incendio permanecerá activo hasta la ausencia de alguno de los componentes del tetraedro desaparezca.

1.3. El proceso de Combustión

Como consecuencia directa del proceso de combustión se desencadenan unas reacciones físico-químicas características asociadas. Estas son **la llama, el humo, los gases y el calor**, que en mayor o menor medida, dependiendo del comburente, combustible o la energía de activación del proceso, tendrán una incidencia y propiedades completamente diferentes. Por eso los procesos de combustión son tan complejos ya que hay muchos aspectos a valorar y que pueden modificar el comportamiento.

1.3.1. La llama

Provocada por la emisión de energía de los átomos de algunas partículas que se encuentran en los gases incandescentes durante la combustión, que al ser excitados por el calor genera esta reacción que denominamos llama. Dependiendo de cómo se incorpora el oxígeno a la llama podemos distinguir dos tipos (Lacasta, 2016).

- **Llamas de premezcla:** como su nombre indica, este tipo de llama surge de la mezcla del combustible con el comburente previamente a la combustión. Este tipo de combustión es se pueden alcanzar temperaturas mayores ya que es más completa, hay menos partículas sin quemar. Su tonalidad se puede diferenciar fácilmente ya que presenta un color azulado. Este tipo de llama es utilizada por los quemadores bunsen por su alta eficiencia.
- **Llamas de difusión:** en este tipo de llamas el combustible y el comburente se mezclan durante la combustión debido al movimiento de convección que origina la llama. Este movimiento de convección hace que la combustión se produzca en el exterior de la llama y se difunda hacia dentro, realizando una combustión incompleta y donde la llama alcanza una menor temperatura. Su tonalidad puede variar pero predominan llamas de color amarillo. Este tipo de llamas las podemos encontrar en las velas de parafina.

1.3.2. Los humos y gases

Los humos, son una de las consecuencias del fuego, son debidos a un proceso de combustión incompleta y está formado por partículas sólidas y líquidas en suspensión, que al no arder se hacen visibles. Estas partículas que no han ardido, pueden arder posteriormente dependiendo de las condiciones del incendio. A esto se le denomina deflagración (backdraft). La deflagración ocurre cuando tenemos un espacio compartimentado y con una ventilación limitada, en la que los gases de la combustión y los humos, que se encuentran en gran concentración y a alta temperatura, reaccionan inflamándose a gran velocidad si se produce un ingreso de aire fresco.

El humo, por tanto, es uno de los resultados más peligrosos de la combustión ya que aparte de poder causar más daños como la deflagración, también afecta al ser humano. Por ejemplo el humo en contacto con las mucosas provoca irritación, dificulta la visión produciendo un fuerte lagrimeo en los ojos, causa asfixia y pueden ser tóxicos. Aunque la toxicidad no se tenga en

cuenta en los reglamentos de construcción, en otros sectores como el químico son de vital importancia. Todos estos factores dificultan las tareas de extinción y el rescate de personas.

Dependiendo de los materiales que se estén quemando podemos encontrar diferentes tipos de humo y grados de opacidad. Se encuentran en un rango que varía entre un tono blanquecino hasta llegar a negro oscuro (grado de opacidad máxima). Esto nos puede servir de orientación para tener una idea sobre el material o combustible. Por ejemplo dependiendo del color podemos encontrar (Protección Civil, 2010):

- **Humos blancos**: producidos por combustiones de materiales vegetales
- **Humos amarillos**: producidos por productos químicos como azufres, ácidos nítricos o clorhídricos.
- **Humos grises**: producidos por fibras artificiales o productos compuestos por celulosas
- **Humos negro claro**: producidos por la combustión del caucho
- **Humos negro oscuro**: producido por plásticos, petróleo y materiales acrílicos

Otro indicador que nos muestra el humo en los incendios es el contenido de oxígeno, ya que también puede influir en el estado del humo, siendo más oscuros en incendios de bajo contenido de oxígeno, debido a una desproporción entre el combustible y el comburente. O blancos cuando existen altos índices de oxígeno, que evidencian una combustión libre.

Los gases son sin duda uno de los factores de riesgo en los incendios, causan más de la mitad del total de fallecidos. En ningún caso se da la presencia exclusiva de un gas sino que pueden encontrar multitud de gases ya que cada material que se quema se descompone de diferente forma según su composición. Los gases más frecuentes que se desprenden de las combustiones son el dióxido de carbono (CO₂), el monóxido de carbono (CO) y el vapor de agua. Pero también pueden desprenderse gases asfixiantes, tóxicos e irritantes.

El comburente más abundante, como hemos comentado anteriormente, es el oxígeno que se encuentra en una proporción del 21% en volumen, pero durante el transcurso de los procesos de combustión si no hay un aporte de oxígeno nuevo, su porcentaje va disminuyendo, pudiendo llegar a sofocar las llamas, pero hay que tener en cuenta que con valores menores al 10% el ser humano no puede soportarlo más de 10 minutos sin fallecer.

1.3.3. El calor

Al tratarse de una reacción exotérmica, los procesos de combustión desprenderán una gran cantidad de calor, siendo su punto máximo cuando esta sea completa. Dependiendo de los materiales combustibles y de su poder calorífico variará el rango de temperaturas de la combustión. Por ejemplo en maderas pueden llegar a una temperatura de 1100-1200°C (Marney, Rusell, & Mann, 2008), aunque hay que tener en cuenta que hay infinidad de factores que pueden influir y modificar las temperaturas. El calor se propaga por el medio de las tres formas posibles. Por conducción, por convección y por radiación (Lacasta, 2016).

- **Conducción**: dependerá del gradiente de temperatura entre materiales ya que necesita de contacto directo para su propagación, esta forma de propagación es la de menor incidencia en los incendios.
- **Convección**: Teniendo en consideración que el aire caliente pesa menos que el aire frío, debido a la diferencia de densidad, este tenderá a subir creando un flujo de convección entre el aire frío (menos caliente) que permanecerá en las partes más bajas.

- **Radiación:** partiendo del foco de emisión, en este caso las llamas, el calor avanza por radiaciones electromagnéticas, pudiendo alcanzar grandes distancias si no encuentra cuerpos sólidos.

En la primera fase de los incendios el calor se transmite por radiación y una pequeña parte por convección. A medida que el incendio se va desarrollando, el calor transmitido por radiación va disminuyendo y la propagación por convección aumenta. Como ya hemos comentado la conducción tiene una incidencia meramente testimonial, y esta se ve incrementada en el caso que haya productos metálicos, gracias a su poca resistencia a la difusión del calor.

1.4. Mecanismos de Extinción

En base a los diferentes condicionantes o componentes que forman un incendio, encontramos diferentes técnicas de extinción. Estas técnicas se diferencian en base al foco sobre el que actúan. En el instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo encontramos publicado una Nota técnica de prevención sobre métodos de extinción (Muñoz J. L., 1984).

Sofocación

Se basa en impedir que el comburente (oxígeno) esté en contacto con el combustible. Esto se puede llevar a cabo mediante:

- Ruptura de contacto entre el combustible y el aire recubriéndolo con materiales incombustibles (mantas ignifugas, arena, espuma etc.)
- Dificultando el acceso del oxígeno a la zona del fuego cerrando puertas y ventanas

Enfriamiento

Se trata de reducir o erradicar la fuente de calor, para ello se suele usar el agua, o agua mezclada con aditivos, ya que es un material abundante y de gran capacidad de absorción de calor y uno de los pocos agentes capaces de enfriar notablemente un fuego, sobre todo si es pulverizada.

Inhibición

Las reacciones de combustión progresan a nivel atómico por un mecanismo de radicales libres. Si los radicales libres formados son neutralizados, antes de su reunificación en los productos de combustión, la reacción se detiene.

Dilución

El fuego precisa para su mantenimiento de nuevo combustible que lo alimente. Si el combustible es eliminado de las proximidades de la zona de fuego, este se extingue al consumirse los combustibles en ignición. Esto puede conseguirse:

- Cortando el flujo de los gases (Oxígeno) o líquidos de las proximidades del fuego para que no haya un aporte de material inflamable.
- Inertizando los combustibles alrededor del fuego para que no reaccionen con las llamas, por ejemplo refrigerando la zona expuesta.

1.5. Los costes de los incendios

La lucha contra los incendios es un factor que ha estado presente durante la evolución del ser humano. Podemos constatar, que con la implantación de las normativas y la mejora del conocimiento de los materiales, los costes por la destrucción en los incendios son mucho menores que antaño, debido a que se producen con menor frecuencia. Aun así, a día de hoy podemos observar mediante los datos estadísticos el impacto que tienen los incendios tanto en las economías de cada país, tanto a nivel monetario como a nivel de pérdidas de vidas.

Para tener una idea estimativa sobre los costes en pérdidas materiales por daños causados por el fuego hemos recogido los datos estadísticos recopilados por la Convención de Ginebra entre 2008 y 2010. La estadística muestra el valor de las pérdidas en millones de euros anuales y una media sobre el porcentaje del producto interior bruto (P.I.B.) de cada país (The Geneva Association, 2014).

Tabla 1.1: Pérdidas en millones de Euros sobre el PIB en relación a los incendios; Fuente: WORLD FIRE STATISTICS - THE GENEVA ASSOCIATION No.29, April 2014 – table 2

País	Moneda	Pérdidas Directas en millones			% P.I.B (2008-2010)
		2008	2009	2010	
Hungría	Ft		580	210	0.02
Singapur	\$S	110	115	115	0.04
Eslovenia	SIT				0.07
Australia	\$AUS	1000	955	940	0.07
Republica Checa	Kč	3700	2450	2200	0.07
España	€	910			0.08
Polonia	Zł	1450	1150		0.09
Estados Unidos	\$US	17500	14000	13000	0.10
Japón	¥	615	610	565	0.12
Nueva Zelanda	\$NZ	240		210	0.12
Alemania	€	2850	2950	2700	0.12
Reino Unido	£	1950	1750	1750	0.13
Holanda	€	1050	925	675	0.15
Finlandia	€	305	280	330	0.17
Suecia	Kr	5950	5550	5650	0.18
Dinamarca	Kr				0.20
Francia	€	4550			0.20
Italia	€	3150	3750	2600	0.20
Noruega	kr				0.22

Por otro lado también hemos observado en la misma fuente estadística las muertes relacionadas o derivadas a causa de los incendios. Donde los nos muestran los siguientes datos:

Tabla 1.2: Ratio de muertes relacionadas con los incendios y por país; Fuente: WORLD FIRE STATISTICS - THE GENEVA ASSOCIATION No.29, April 2014 – table 2

País	Muertes por Año			Muertes por cada 100.000 personas
	2008	2009	2010	
Singapur	1	1	1	0.02
Suiza	30	25	25	0.34
Italia	285	285	240	0.45
Holanda	100	60	70	0.46
Austria	55	40		0.47 (2007-2009)
Eslovenia	10	10	10	0.49
España	270	205	235	0.52
Portugal	65	55	60	0.57
Alemania	500	540	465	0.60
Australia	120	570	90	0.73
Reino Unido	475	460	445	0.75
Canadá	295	240		0.77 (2007-2009)
Nueva Zelanda	35	40	25	0.77
Francia	595	565		0.96 (2007-2009)
Grecia	130	110	110	1.05
Estados Unidos	3650	3300	3400	1.11
Noruega	70	55	40	1.14
Irlanda	45	55	55	1.17
Bélgica				1.21 (2004)
Republica Checa	150	130	145	1.35
Dinamarca	90	70	65	1.36
Suecia	130	140	145	1.49
Japón	2000	1950	1800	1.51
Polonia	585	565	595	1.52
Hungría	180	140	140	1.53
Barbados	5			1.65 (2007-2008)
Rumania	410	355	395	1.76
Finlandia	110	120	95	2.03

Tabla 1.3: WORLD FIRE STATISTICS - THE GENEVA ASSOCIATION No.29, April 2014 - table 6

Como podemos observar en las tablas estadísticas, aún hay un gran número de defunciones relacionadas con los incendios por tanto este indicador nos muestra que pese a la mejora de las normativas contra incendios, aún se producen un número elevado de bajas.

Para observar la evolución de las muertes hemos recogido unos estudios realizados por la USFA en 2011, donde se puede observar cómo estas mejoras en la sociedad han ido reduciendo, significativamente, el número de muertes con el paso de los años. Esta estadística nos muestra una comparativa entre 1989 y 2007 respectivamente.

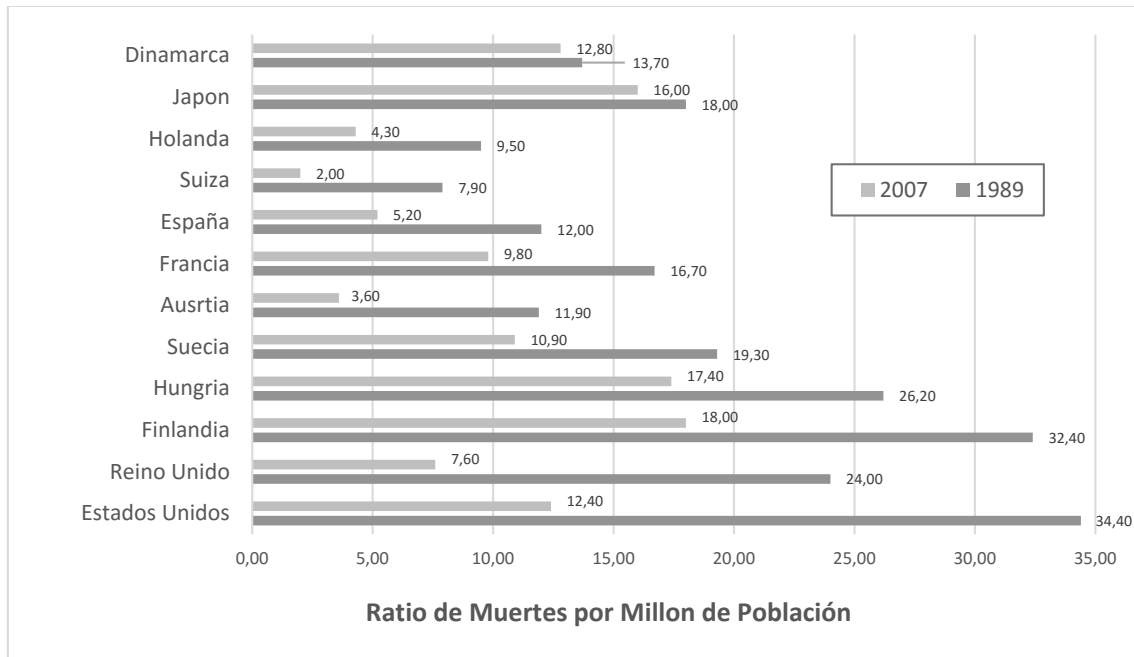


Ilustración 4: Ratio de muertes por millon de población; Fuente: USFA, *Fire Death Rate Trends: An International Perspective*, 2011

A nivel estadístico podemos encontrar infinidad de estudios publicados, donde se pueden analizar los incendios desde diferentes marcadores. Todos estos datos pueden revelar información importante a nivel macro, donde podemos observar rápidamente países donde se deben mejorar las normativas o que efecto han surgido las normas después de aplicarse. También existen estadísticas a nivel estatal, realizadas en muchos países por los cuerpos de bomberos, donde se analizan las diferentes actuaciones para posteriormente ser incluidas en estadísticas anuales sobre patrones de incendios.

En España encontramos por un lado estadísticas estatales y autonómicas más centradas en incendios forestales y víctimas de estos, realizadas por el Ministerio de Agricultura en el ámbito estatal o el Instituto de Estadística de Cataluña a nivel autonómico. En cambio no existen estadísticas estatales sobre incendios ya sean de tipo industrial o residencial. Este tipo de estadísticas están realizadas por empresas privadas como la aseguradora Mapfre y la Asociación Profesional de Técnicos de Bomberos (APTB) que en 2010 realizaron un estudio sobre las víctimas de incendios en 2010 en el territorio español, fuente de la cual se han basado las estadísticas de la *World Fire Statistics - The Geneva Association* que hemos comentado anteriormente.

2. RETARDANTES DE LLAMA

2.1. Desarrollo de los Retardantes de Llama y su aplicación

Casi tan antiguo es el arte de trabajar la madera, como su afán por mejorar sus prestaciones. La primera muestra de madera tratada hallada corresponde a una lanza de tejo endurecida al fuego de hace 250.000 años, encontrada en interior de un esqueleto de elefante en la localidad de Lehringen (Alemania) (Peraza, 2001).

Al estar formada por carbono orgánico, la madera es un material combustible, y pese a tiene tendencia a auto-extinguirse y una velocidad de carbonización lenta, si la comparamos con otros materiales combustibles, cuando hablamos de secciones macizas, es un material inflamable. Su comportamiento en caso de incendio siempre ha sido considerado un problema a tener en cuenta en la construcción. Según el historiador griego Herodoto, desde la época egipcia (450 A.C.) (Hindersinn, 1990), podemos encontrar anotaciones sobre tratamientos la madera con alumbre para reducir su inflamabilidad. Los romanos (200 A.C.) utilizaban alumbre (Sulfato de aluminio y potasio), como producto ignífugo para tratar las maderas. Aulo Gelio constata la imposibilidad de quemar una torre de madera impregnada con este tratamiento en uno de sus documentos. Para realizar estos tratamientos practicaban unos orificios profundos sobre las maderas a tratar y colocaban unos recipientes a una cierta altura para aprovechar la fuerza de la gravedad para insertar el máximo material posible. Pese a ello Roma, en la época de Nerón (Troitzsch, *Plastics Flammability, Handbook*, 2004), fue parcialmente arrasada por las llamas en el 64 d.C. ya que no se trataba toda la madera sino que únicamente se actuaba sobre templos, monumentos o edificios militares. Después de este incendio se modificaron las normativas y se prohibieron los edificios de varias alturas realizados en madera, con el fin de intentar controlar el problema de la propagación a falta de medios técnicos más avanzados.

Pese a la temprana aparición de soluciones contra la inflamabilidad en la madera, hubo un gran estancamiento en este campo de investigación y no fue hasta la edad media (siglos V – XV), donde vuelven a aparecer avances significativos en los tratamientos sobre la madera. En esta época, el principal interés se centró más en evitar la degradación y el ataque de agentes xilófagos, que en avances en materia de incendios. Esto se debe sobre todo al contexto histórico de la época, donde el aspecto económico centraba todo los intereses en las flotas de barcos utilizadas para el comercio entre las américas y el continente europeo. Estas flotas de barcos eran atacadas por xilófagos marinos, hecho que hacia mermar la durabilidad de la madera con la que estaban contruidos e influía claramente en los beneficios de los países.

En 1666, Londres fue arrasada por un incendio en el que se destruyeron más de 13.000 viviendas, este incendio fue debido a la estrechez de las calles y la escasa distancia entre viviendas, echo que propició la rápida expansión del fuego. El incendio provoco la redacción del primer código de construcción de la era moderna el “London Building Act (Troitzsch, *Plastics Flammability, Handbook*, 2004)”, en el que se definían diferentes actuaciones y limitaciones constructivas como la prohibición de realizar chimeneas en madera, tejados de paja e incluso limitaba la altura de los edificios.

Las primeras patentes sobre tratamientos para madera empezaron a aparecer en 1717. Formuladas a base de productos tóxicos para proteger las maderas y aumentar su duración. En cuanto a los retardantes de llama, en 1735 aparece registrada la primera por Obadiah Wilde. Fue registrada en la oficina británica de patentes y utilizada en teatros y edificios públicos, aplicándose tanto en maderas como telas. La composición estaba realizada con una mezcla de alumbre, como se hacía en la antigüedad, sulfato ferroso y bórax.

Entre el siglo XIX y XX comenzó la investigación y desarrollo de productos para la impregnación en madera y textiles. Uno de los factores de que impulso finalmente el desarrollo de estos, fue el gran incendio de la ciudad de Chicago en 1871 (Lewinnek, 2003). El cual arrasó 9 km² de superficie, dejando más de 300 víctimas y 100.00 viviendas destruidas. Este incidente se debió principalmente al sistema constructivo utilizado el "Balloon Frame" basado en la construcción de viviendas a base de estructuras de madera. Después de este incendio se empezaron a redactar normativas que restringían el uso de la madera, primando los materiales cerámicos. En 1890, apenas 10 años después del gran incendio, ya se habían desarrollado la mayoría de retardantes de llama inorgánicos que usamos actualmente. Y, por otra parte, se crea la National Fire Protection Association (NFPA) en 1896, para crear y mantener unas normas y requisitos mínimos para la prevención de los incendios. En 1904 se fundó la AWWA, la asociación americana dedicada a la protección de la madera, la cual certifica los estándares de protección que deben tener los tratamientos realizados en la madera y como deben desarrollarse, para ello emite unos certificados para los fabricantes que están asociados. Actualmente todavía sigue en funcionamiento.

En Europa, en 1921 el químico francés Gay-Lussac utilizó combinaciones de fosfato de amonio, cloruros de amonio y bórax para reducir la inflamabilidad de telas y maderas en los teatros franceses (Guerra Gómez, 2011). Durante la Segunda Guerra Mundial, se comenzaron a usar fibras sintéticas las cuales tenían una gran ventaja respecto de las tradicionales como el algodón, la hidrofobicidad. El problema de estas fibras era que al tratarse de material sintético, era susceptible de ser inflamable y por tanto se tenían que tratar con compuestos retardantes. Al tratarse de fibras hidrofóbicas, los tratamientos tradicionales, basados en la impregnación de los compuestos mediante el agua y diferentes soluciones, no funcionaban por lo que se desarrollaron diferentes productos para estos nuevos polímeros. Finalizada la guerra estos productos se extendieron a la industria y fueron aplicados en diferentes materiales como plásticos, textiles, productos electrónicos o mobiliario. Cada uno de ellos realizados con soluciones diferentes y compuestos químicos muy variados. Esto conlleva que en la actualidad tengamos una gama de productos retardantes de llama muy extensa.

En 1973, se produjo un incidente en San Luis, en el estado de Missouri, la empresa Michigan Chemical C.O., que producía retardantes de llama bromados, en concreto bifenílicos polibromados (PBB), y aditivos para el ganado vacuno, mezcló los envíos de los materiales enviando a las granjas los PBB. Cuando se descubrió el error, los animales ya habían sido contaminados y los productos derivados de ellos habían entrado en la cadena alimenticia estadounidense (Winter, 2015). En los estudios de Wit, en 2002, se pudo constatar que 25 años después del desastre, todavía quedan trazas de los niveles de PBB. Tras este incidente en América del Norte, los PBB fueron prohibidos y poco a poco la mayoría de países lo van retirando del mercado.

La Organización Mundial de la Salud en 1997, realizó un informe para clasificar los diferentes tipos de retardantes que existen en el mercado y clasificar los más peligrosos (European Commission, 1992), ya que diversos estudios mostraban que algunos retardantes utilizados para la extinción de incendios o para tratar materiales podían pasar al medio ambiente y contaminar el aire, el suelo y el agua, o entrar en la cadena alimentaria. Otros en cambio al consumirse creaban gran cantidad de humos y otros emitían productos tóxicos. En 2001, en las Naciones Unidas se firmó un programa sobre los contaminantes orgánicos persistentes (COP) para limitar o prohibir el uso de algunos retardantes como los Bifenílicos Polibromados (PBBs) o los Éteres Difenílicos Polibromados (PBDEs). En la actualidad podemos encontrar más de 175 tipos diferentes de retardantes de llama.

2.2. Clasificación y Definición

Los retardantes de llama son compuestos químicos que se añaden a los materiales (combustibles), tanto naturales como sintéticos, para que modifiquen sus prestaciones en cuanto a la reacción al fuego, ya sea retardando la ignición o reduciendo su velocidad de propagación una vez iniciado el fuego. En el primer caso, logra retardar la ignición incrementando la capacidad calorífica del material, por tanto la liberación de compuestos volátiles inflamables será menor, retardando el efecto de la pirolisis. En el caso de la propagación, los retardantes suelen crear una capa protectora no combustible que envuelve al material.

Los retardantes de llama se pueden distinguir según su adhesión a los materiales, en aditivos o reactivos, por su mecanismo de actuación, en físicos y químicos o por su composición, en inorgánicos, halogenados, organofosforados y basados en nitrógeno (van Esch, 1997).

2.2.1. Según su Adhesión a los Materiales:

Dependiendo de la forma que adhieren a los materiales podemos encontrar los aditivos o los reactivos (Buezas, 2010) , (García, 2010):

- **Los aditivos** son añadidos a los materiales sin unirse ni reaccionar a nivel molecular. Simplemente se adhieren y se dispersa por el material pero no existe ninguna reacción química entre ambos.
- **Los reactivos**, en cambio, se unen a la estructura molecular del material. De esta manera la unión química previene que el retardante se volatilice o pierda su efecto ya que se encuentra dentro de la propia estructura.

2.2.2. Según su Mecanismo De Acción:

Una vez están sometidos a la combustión podemos clasificarlos según como desarrollan su mecanismo de acción. Podemos clasificarlos en dos categorías, físicos y químicos.

Los mecanismos físicos actúan de tres formas posibles (van Esch, 1997).

- **Absorbiendo calor**, básicamente se trata de procesos endotérmicos que se inician gracias a la reacción de los aditivos ignífugos y que captan el calor de la combustión, logrando reducir la temperatura del material.
- **Formando recubrimientos protectores** que contribuyan a la creación de barreras físicas y a sustancias volátiles como gases que desplacen el oxígeno evitando así su combustión.
- **Dilución**, la cual consiste en añadir sustancias inertes a la composición para que liberen gases inertes que se mezclen con los gases liberados del proceso de combustión. De esta forma se limita o retarda el proceso de descomposición.

Los mecanismos químicos actúan de dos formas posibles (van Esch, 1997) (Buezas, 2010).

- **Reaccionan en la fase gaseosa** provocando una inhibición de la reacción en cadena que se produce durante la combustión, ya que captan los radicales libres del hidróxido y peróxido.

- **Reaccionan en la fase condensada** formando una capa de carbonización que aísla el material de la combustión.

2.2.3. Según su Composición:

Por último, también podemos clasificarlos según su composición, ya que cada material está compuesto o formado por diferentes elementos. Los retardantes de llama se dividen en inorgánicos, halogenados, organofosforados y los basados en nitrógeno.

Los inorgánicos representan alrededor de un 40% de la producción mundial de los retardantes de llama. Esto es debido a su bajo precio, su baja toxicidad y una escasa presencia de humos durante su combustión. Pese a que pueda parecer una gran ventaja respecto al resto de productos tienen un inconveniente bastante grande ya que para su efectividad como retardantes necesitan concentraciones muy elevadas del producto, entre un 50 a un 80%, excepto los compuestos fosforados que necesitan concentraciones más bajas de producto.

Los compuestos inorgánicos (van Esch, 1997) se dividen en diferentes productos como los:

- Hidróxidos de Metal, de entre los cuales destacan como los más usados el Hidróxido de Aluminio (ATH), el cual se descompone alrededor de los 200°C y el Hidróxido de Magnesio (MDH), de un precio más elevado que el primero, pero a su vez se mantiene estable en un rango de temperaturas mayor.
- Basados en el Fósforo, actualmente una de las familias sobre la cual se está realizando un gran esfuerzo a nivel de investigación para desarrollar nuevos compuestos. Esto es debido a que se cree que puede ser el sustituto ideal de la mayoría de los halógenos. Se están investigando productos basados en el fósforo y en combinación con él para la obtención de nanoarcillas y nanotubos de carbono.
Actualmente los más utilizados son el fósforo rojo el cual es estable hasta los 450°C aproximadamente, y el fosfato de amonio, utilizado en productos celulósicos como papel, algodón o madera. Su modo de empleo se basa en la aplicación en productos intumescentes o pinturas.
- Basados en el Boro, ampliamente utilizados en la ignifugación de productos celulósicos, siendo la madera uno de sus principales usos ya que al ser soluble se puede impregnar en el interior de su estructura. Los más extendidos son sin duda el ácido bórico (H_3BO_3) y las sales de borato ($NA_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$). Los dos son también los más antiguos y bastante efectivos, pero su uso está limitado al interior de los espacios ya que son productos solubles con el agua y por tanto al estar en contacto con esta pierden sus propiedades. En la actualidad podemos encontrar productos basados en los boratos como el borato de zinc, que no es soluble, se está utilizando en polímeros plásticos como sustituto de los halógenos ya que es un producto altamente estable, dependiendo de su composición, entre 300-500°C. Aparte de utilizarse como retardante de llama, el borato de zinc también se utiliza como supresor de humos, supresor del efecto de incandescencia al apagarse la llama (afterglow) y agente anti-arco en productos electrónicos.
- Compuestos sinérgicos, que se obtienen de la combinación de cargas inorgánicas con sustancias como el molibdeno, tanto en productos de la madera como en plásticos, para la reducción de humos. También cabe destacar sinergias entre varios retardantes inorgánicos como la mezcla de MDH y ATH (vistos anteriormente), que mejoran su comportamiento combinados, que aplicándose por separado ya que aumentan su rango de temperaturas hasta valores entre 180-400°C.
- Otros retardantes inorgánicos que podemos encontrar están compuestos por sulfamato de amonio y bromuro de amonio, que son utilizados para la extinción de fuegos forestales. Por otro lado también podemos encontrar en recientes

investigaciones nanocargas inorgánicas, están siendo investigadas y los estudios muestran grandes incrementos en las propiedades mecánicas y reducciones de la inflamabilidad en los materiales en los que se aplican.

Los compuestos halogenados (Buezas, 2010), pese a que actualmente se encuentran en entredicho debido a que causan problemas medioambientales por su elevada toxicidad, son otros de los principales retardantes de llama utilizados en la industria, representando aproximadamente entre el 40-45% de la producción mundial. Su funcionamiento se basa en la liberación de los radicales libres del halógeno cuando se expone a altas temperaturas. Los radicales actúan contra los gases combustibles de la pirolisis del material en combustión generando agua o reduciendo la energía de la combustión. Su efectividad variará dependiendo de la cantidad de halógenos que contenga y de la facilidad para liberarlos. Según del halógeno encontramos cuatro tipos, los de flúor, cloro, bromo y yodo, clasificados de más estables a menos respectivamente. Las dos tipologías más extendidas son los de cloro y bromo, siendo este último el más utilizado por su estructura más débil.

- Los yodados pese a ser la estructura halógena más débil, por tanto la más interesante ya que la liberación del halógeno de yodo se produce con más facilidad, tiene un comportamiento irregular siendo poco estable y puede liberar el halógeno demasiado pronto para ser efectivo.
- Los fluorados por el contrario tienen la estructura halógena más fuerte, otorgándoles una gran estabilidad y necesitan temperaturas demasiado altas para liberar los halógenos, por tanto les resta efectividad dependiendo del material en el que se empleen.

Tanto los clorados como los bromados se pueden clasificar, al igual que anteriormente, por su facilidad de liberación de halógenos en: alifáticos, ciclofáticos y aromáticos, de mayor facilidad a menor. En esta clasificación, en cambio, los más utilizados son los aromáticos ya que presentan mayor estabilidad en los procesos de fabricación, seguido de los ciclofáticos.

- Los Clorados pese a ser menos utilizado que los bromados se aplican en telas, pinturas y revestimientos. Los más utilizados son los clorados ciclofáticos por su bajo coste y buena estabilidad, hasta los 260°C, el único inconveniente que afecta a esta fórmula es su elevada cantidad de producto necesaria, que pueden afectar al material sobre el que se utiliza.
- Los Bromados (BFR) son los retardantes de llama más utilizados, esto se debe a su relación calidad-precio. Su principal uso está destinado a productos electrónicos, y podemos encontrar más de 75 variedades diferentes. Dependiendo mecanismo de adhesión al material, los más empleados son los ciclofáticos, que tienen un comportamiento muy estable, y los aromáticos que se utilizan en plásticos térmicos. Los compuestos más utilizados son los Éteres Difenílicos Polibromados (PBDE), utilizados en textiles y circuitería electrónica, los Hexabromociclododecanos (HBCD), utilizados como aislamiento térmico para la edificación, el Tetrabromobisfenol (TBBPA), utilizados en termoplásticos y los prohibidos Bifeniles Polibromados (PBB), que han sido los más utilizados en aparatos de consumo, textiles y espumas plásticas de la historia reciente.

Los compuestos organofosforados (García, 2010) (Buezas, 2010) son uno de los retardantes de llama más utilizados en plásticos, textiles y celulosa. Su composición se basa en la mezcla de fósforo y otros componentes como los nitrógenos o los halógenos. Con la prohibición de algunos de los BFR, los compuestos organofosforados están ganando una gran relevancia en la industria.

- Fosfatos No Halogenados, formados por los ésteres de fosfatos y sus derivados, son utilizados para la ignifugación de poliésteres celulósicos, tienen efectos plastificantes a bajas temperaturas que se aprovechan para dar esas propiedades a los materiales a los que se aplican y mejorar su trabajabilidad y flexibilidad. Tiene un punto de ebullición entre los 209 y 218°C.
- Fosfatos Halogenados, comparten las propiedades de los productos basados en el fósforo y las propiedades de los halógenos, logrando comportamientos similares, con menos cantidad de fósforo. La parte halógena contribuye a la reducción de la presión del vapor y la solubilidad del agua del retardante, logrando su retención por más tiempo. Su principal uso se centra en poliuretanos rígidos, harinas de madera y polímeros termostables o con fibras. También podemos encontrar algunas soluciones como el fosfato de tris (2,3-dibromopropilo) que ha sido retirado por ser cancerígeno.

Los compuestos basados en Nitrógeno (Lowden & Terence, 2013) representan un pequeño grupo, con un gran potencial de expansión debido a sus propiedades medioambientales. Esto se debe a que presentan una baja toxicidad, presentan una baja emisión de humos en comparación con otras sustancias, no presenta problemas de reciclabilidad y su composición no se modifica al interactuar con los compuestos de los materiales sobre los que se emplean. El único problema aparente que tienen es la alta dosis necesaria para su utilización que puede afectar al comportamiento mecánico de los materiales. Su uso actualmente se centra en espumas flexibles de poliuretano, poliamidas y pinturas intumescentes.

A modo de resumen podemos realizar la siguiente tabla:

Tabla 2.1: Tabla resumen de la clasificación retardantes de llama; Fuente: Elaboración propia

CLASIFICACIÓN DE LOS RETARDANTES DE LLAMA		
Mecanismo de Adhesión	Aditivos	
	Reactivos	
Mecanismo de Acción	Físicos	Absorción de Calor
		Recubrimiento de protección
		Dilución
	Químicos	Reacción en fase gaseosa
		Reacción en fase condensación
Composición	Inorgánicos	Hidróxido de metal
		Basados en fósforo
		Basados en boro
		Comportamientos Sinérgicos
		Otros Inorgánicos
	Halogenados	Yodados
		Fluorados
		Clorados
		Bromados
	Organofosforados	Halógenos
		Libre de Halógenos
Basados en Nitrógeno		

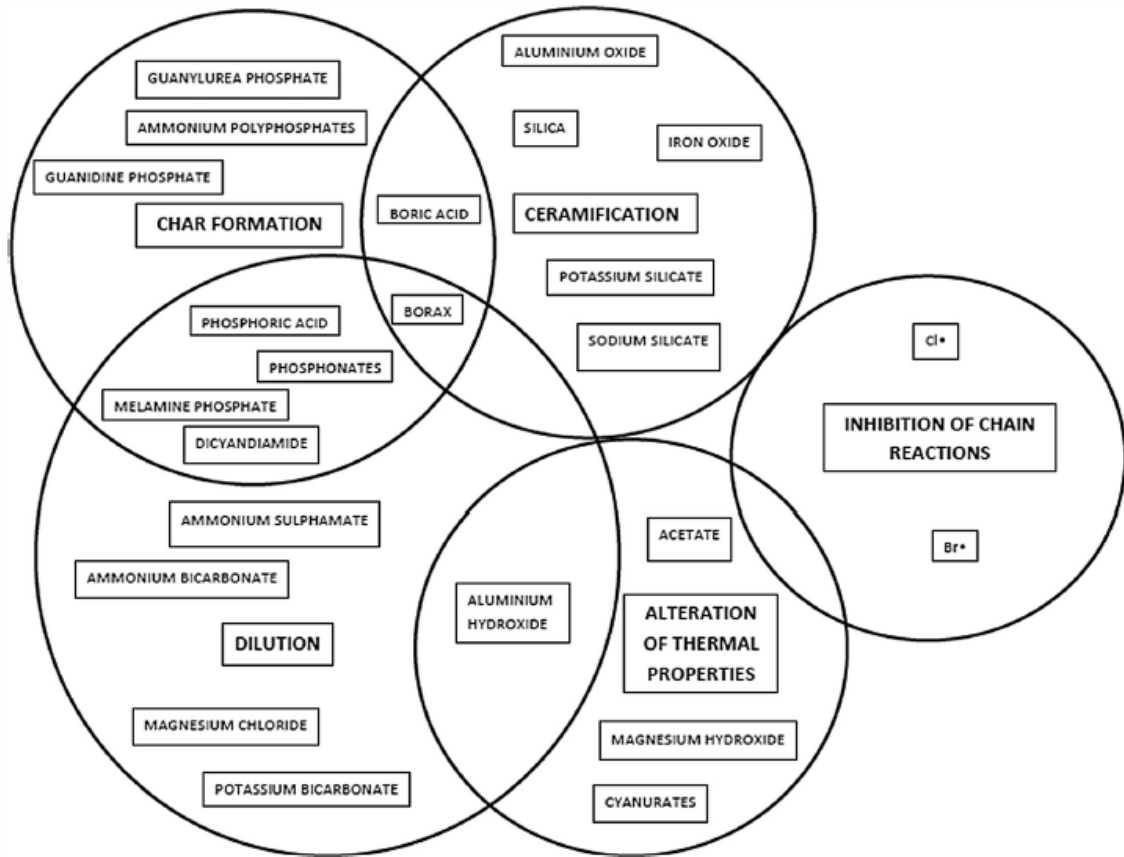


Ilustración 5: Mecanismos de acción de los retardantes de llama; Fuente: Fire Science Reviews - Laura Anne Lowden et Al (Lowden & Terence, 2013)

3. LA MADERA

La madera es uno de los primeros materiales, junto con la piedra, trabajados por el hombre. Esto es debido a su abundancia y trabajabilidad, a la par que nos ofrece unas excelentes prestaciones mecánicas. Según investigaciones arqueológicas se tiene constancia del uso de madera por el hombre hace aproximadamente unos 500.000 años.

En el mundo existen más de 16.000 tipos diferentes de maderas y aunque solo unas 2000 tengan carácter comercial, realmente tenemos acceso a unas 400 especies (Peraza Sánchez & et al, 2004). Esto se debe a que hay muchas tipologías de maderas que únicamente se encuentran disponibles en su país de origen.

A grandes rasgos podemos diferenciar entre dos denominaciones genéricas, las **coníferas** y las **frondosas** cuyas diferencias se encuentran en su estructura microscópica. Por un lado las coníferas entre las que se encuentran los pinos, abetos, cedros, etc. Poseen radios leños uniseriados y traqueidas para su resistencia y conducción del alimento. En cambio las frondosas entre las que se encuentran el roble, la haya, el olmo, las encinas, etc. Poseen una estructura mucho más compleja con radios multiseriados donde los vasos conducen el alimento del árbol y el tejido fibroso realiza la función de sostén y que le otorgan una densidad superior a la de las coníferas.

Una vez cortada y secada, la madera se utiliza para realizar infinidad de aplicaciones, para la fabricación de máquinas, herramientas, en la construcción de viviendas, la elaboración de mobiliario, fabricación de papeles o en su función más básica como fuente de energía.

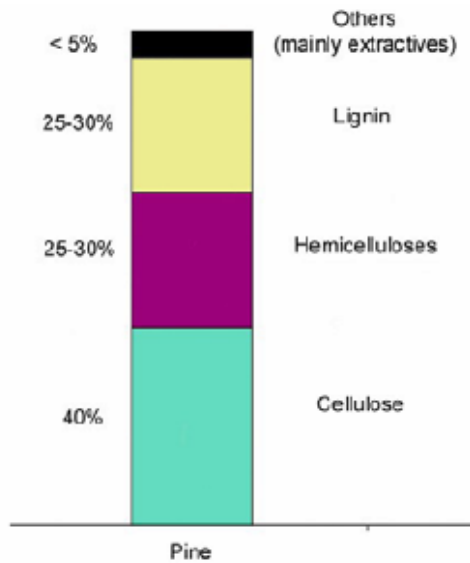
Desde la revolución industrial, muchos usos de la madera han sido sustituidos por metales, hormigones o plásticos, sin embargo las nuevas técnicas industriales aplicadas a la madera nos ofrecen una gran variedad y mejoras de las que no disponíamos anteriormente.

A diferencia de otros materiales orgánicos, la madera es un material del cual podemos controlar su producción. Es un recurso que no se agota gracias a que disponemos de bosques de crecimiento controlado, los cuales una vez talados vuelven a replantarse. La madera es un material de una duración casi infinita en términos de construcción, siempre y cuando se mantengan unos parámetros adecuados de humedad, para mantener alejados a mohos y agentes bióticos. Estas propiedades le otorgan un papel muy importante tanto en el presente como en un futuro próximo.

3.1. Composición de la Madera

La madera, independientemente de su procedencia, se encuentra principalmente compuesta aproximadamente por un 46-50% de carbono (C), un 38-42% de oxígeno (O), un 6% de hidrogeno (H), un 1% de nitrógeno (N) y en un 1% de otros elementos (Peraza Sánchez & et al, 2004). Todos estos elementos sirven para formar los componentes orgánicos, la lignina, la celulosa y la hemicelulosa, encargadas de las diferentes funciones dentro de la estructura del árbol.

La Lignina, deriva de la raíz latina del término lignum, que significa madera. Es utilizada para la construcción de los vasos celulares de las plantas y otorga resistencia a la madera. La lignina es el segundo compuesto más importante de la madera, aproximadamente entre 20-30% y se encuentra en la composición de las paredes estructurales de la madera. Gracias a su forma tubular, realiza la función portante del árbol y a la vez utiliza su interior como vehículo para transportar el alimento verticalmente. Las propiedades de la lignina en la estructura del árbol proporcionan tanto resistencia a los impactos, como a las cargas axiales (compresión) y/o a flexión (compresión + tracción). Estas excelentes propiedades la hacen idónea para su uso en construcción.



La Celulosa es el compuesto más abundante dentro de la estructura de la madera, aproximadamente entre un 40-50% dependiendo de la especie de madera. Su función es, junto con la lignina, la de sostener y lo lleva a cabo rodeando de forma helicoidal las paredes de los vasos celulares. La celulosa es un polímero natural, con una estructura fibrosa que se integra en el interior de la lignina realizando la función de refuerzo de las paredes. A modo de símil constructivo, la lignina sería el hormigón, en cambio la celulosa serían las armaduras de refuerzo. La variación en la inclinación de las cadenas de celulosa afectarían a las dilataciones o contracciones por efecto del agua y le otorgan la resistencia final al elemento.

Ilustración 6: Composición de la madera de pino; Fuente: Facultad de Ingeniería UDELAR

La Hemicelulosa es el tercer compuesto que encontramos en la estructura de la madera con una proporción similar a la de la lignina 20-30%. Forma parte de las paredes celulares de los vasos y realizan la función de puente de unión entre la celulosa y la lignina. Su estructura presenta cualidades mecánicas más débiles que la celulosa y podemos encontrar diferentes tipos y contenidos de hemicelulosa dependiendo de la especie o la edad del árbol.

3.2. Combustión de la Madera

Al estar formada por carbono, la madera es un material combustible, y pese a contribuir poco a la propagación de los incendios, cuando hablamos de secciones macizas, es un material inflamable y siempre ha sido un problema a tener en consideración en la construcción.

Cuando aumentamos la temperatura progresivamente aplicando calor sobre la madera, empiezan a ocurrir cambios en su estructura interna. Los componentes poliméricos de la madera, principalmente celulosas, empiezan a descomponerse formando gases volátiles y formando una capa superficial de carbón.

La descomposición siguen un patrón de temperaturas o un rango de temperaturas que puede ser observado mediante la técnica de la termogravimetría (TGA).

Tabla 3.1: Descomposición de la madera; Fuente: Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction - Laura Anne Lowden and Terence Richard Hull (Lowden & Terence, 2013)

Rango de temperaturas de la combustión y pirólisis de la madera	
Rango de Temperaturas	Proceso de descomposición
>100°C	Evaporación del agua almacenada
160-200°C	Descomposición lenta de gases incombustibles, principalmente H ₂ O
200-225°C	Descomposición lenta de gases incombustibles. Descomposición de la hemicelulosa, fase de pirólisis lenta.
225-275°C	Aceleración de la pirólisis, fase de combustión con la ayuda de una llama. Descomposición de la celulosa.

275-500°C	Producción de gases volátiles (CO, Metano, etc.) aparición de partículas de humo visibles. Rápida carbonización a medida que la estructura de la madera se agrieta. Descomposición de la lignina.
>500°C	Combustión completa de gases volátiles. La carbonización de la madera sigue activa y continua oxidando para formar CO, CO ₂ y H ₂ O mientras avanza hacia el interior

Aunque resulte extraño estas descomposiciones se pueden llevar a cabo de forma simultánea dentro de un mismo tramo de madera maciza. Esto es debido a que la combustión dentro de la madera sufre un proceso lineal de pirólisis donde las primeras capas, en contacto directo con la llama o la fuente de calor, son las primeras en reaccionar y descomponerse. En cambio las capas interiores de la madera, debido a la baja conductividad y a la formación de la carbonización superficial, se encuentran a una temperatura inferior, hecho que reduce la velocidad del proceso de combustión y facilitando que dependiendo del espesor de la madera se puedan observar los diferentes procesos simultáneamente.

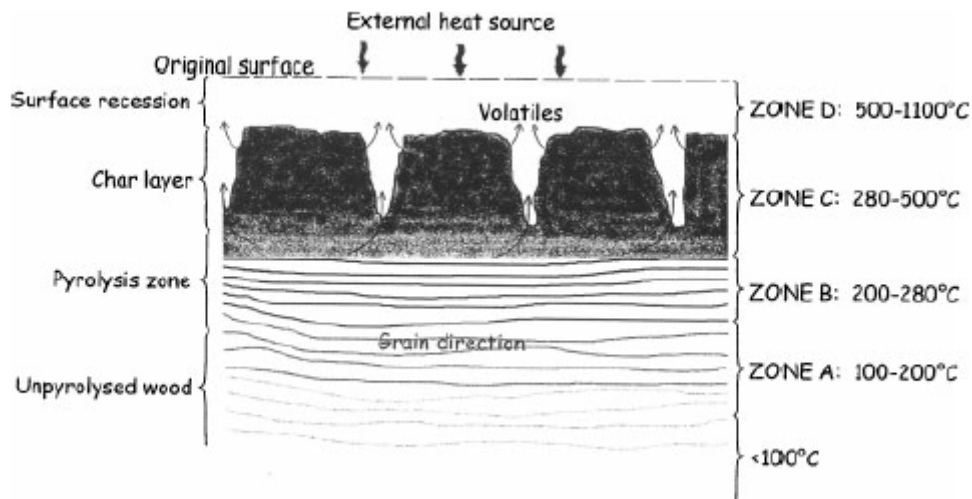


Ilustración 7: Temperaturas de descomposición de la madera maciza expuesta al fuego; Fuente: Scientific Figure on ResearchGate

3.3. Reacción y Resistencia al Fuego

Para clasificar la acción del fuego sobre la madera distinguimos entre dos conceptos clave bien diferenciados, por un lado la reacción al fuego y por otro la resistencia. Todos los materiales de construcción se clasifican según estos dos conceptos.

3.3.1. Reacción al Fuego

La reacción al fuego evalúa el comportamiento de un material frente al fuego. Dependiendo de su composición pueden contribuir, o no tener ninguna influencia en su desarrollo. Por tanto esta diferenciación nos ayuda a discernir entre si el material analizado es combustible o no y según su grado combustibilidad se han establecido unos criterios de clasificación.

Para su clasificación tenemos la norma **UNE-EN 13501-1:2007 + A1:2010 – 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. Norma de obligado cumplimiento y obligatoriedad para obtener el marcado CE como material autorizado dentro de la Unión Europea.

Para su clasificación se le otorga una asignación numérica, también denominada Euroclases, según su reacción al fuego en:

- **A1/A1fl*:** No combustible, sin contribución “grado máximo” al fuego
- **A2/A2fl*:** No combustible, sin contribución “grado menor” al fuego
- **B/Bfl*:** Combustible, contribución baja al fuego
- **C/CCfl*:** Combustible, contribución limitada al fuego
- **D/Dfl*:** Combustible, contribución media al fuego
- **E/Efl*:** Combustible, contribución alta al fuego
- **F/Ffl*:** Sin clasificar

*fl: Específico para revestimientos de suelos

También se debe tener en cuenta la clasificación relativa a la producción de humos o de gotas inflamadas:

- Opacidad y producción de humos (**s**) del término inglés *smoke*, en un grado **s1**, **s2** y **s3**, de baja, media y alta respectivamente.
- Caída de gotas y/o partículas en llamas (**d**) del término inglés *drop*, también en grado **d1**, **d2** y **d3**, para baja, media o alta respectivamente.

3.3.2. Resistencia al Fuego

La resistencia al fuego por otro lado hace referencia a los elementos constructivos o estructurales y se centra en evaluar el tiempo que es capaz de cumplir la función para la cual ha sido diseñado.

Para su clasificación tenemos la norma **UNE-EN 13501-2:2009 + A1:2010 - 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.**

Para su clasificación principal se diferencia en tres categorías:

- **R:** Capacidad Portante (Resistance): Capacidad del elemento constructivo de soportar durante un periodo de tiempo, sin pérdida de su estabilidad por la exposición continuada al fuego cumpliendo unas condiciones mecánicas establecidas.
- **E:** Integridad (Integrity): Capacidad del elemento constructivo, con función separadora, de soportar la exposición al fuego solamente en una cara, sin que la transmisión en la cara opuesta se vea afectada ni en el paso de llamas ni de gases, durante un periodo determinado.
- **I:** Aislamiento (Insulation): Característica del elemento constructivo que permite soportar la exposición al fuego, en una sola cara, sin que se produzca una transmisión de calor significativa en el lado opuesto, durante un periodo determinado.

Pese a que los tres citados son los principales utilizados, también se contemplan dentro de la normativa más métodos de clasificación utilizados en otros casos concretos.

La escala de tiempos para esta clasificación, ya que todos dependen de un periodo determinado está establecido en **10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180 y 240** minutos.

Según el código técnico de la edificación, en el caso de la madera, para calcular la resistencia al fuego de las estructuras debe de tomarse en cuenta la velocidad de carbonatación. Esta

velocidad la encontramos tabulada en el anejo SI-E, en la tabla E.1., donde se tiene en cuenta el tipo de madera ya sean coníferas, frondosas o maderas de procesos industriales como la microlaminada.

3.4. Características de Reacción al Fuego de los Diferentes Usos de la Madera

La madera sin tratar, en la mayoría de casos, se suele clasificar con D-s2, d0. Aunque cada tipología de madera ya sea de tipo estructural, laminada encolada, tableros derivados, suelos laminados, suelos de parqué o revestimientos murales tienen su normativa propia de marcado y conformidad. Todas estas maderas se pueden consultar en el Real Decreto 312/2005, actualizado posteriormente en el RD 110/2008.

3.4.1. Madera Estructural

Tabla 3.2: Clasificación de las propiedades de reacción al fuego de los productos de madera para uso estructural; Fuente: Real Decreto 110/2008

Producto	Norma del Producto	Cond. De Utilización	Densidad media mínima (kg/m ³)	Espesor total mínimo (mm)	Clase (excl. Suelos)	Clase (Suelos)
Madera estructural clasificada visual o mecánicamente	UNE-EN 13238	-	350	22	D-s2,d0	-

3.4.2. Madera Laminada

Tabla 3.3: Clasificación de las propiedades de reacción al fuego de las maderas laminadas encoladas; Fuente: Real Decreto 110/2008

Producto	Norma del Producto	Cond. De Utilización	Densidad media mínima (kg/m ³)	Espesor total mínimo (mm)	Clase (excl. Suelos)	Clase (Suelos)
Madera laminada encolada	UNE-EN 14080:2006	-	380	40	D-s2,d0	-

3.4.3. Tableros Derivados de la Madera

Tabla 3.4: Clasificación de las propiedades de reacción al fuego de los tableros derivados de la madera; Fuente: Real Decreto 110/2008

Producto	Norma del Producto	Cond. De Utilización	Densidad mínima (kg/m ³)	Espesor mínimo (mm)	Clase (excl. Suelos)	Clase (Suelos)
T. de partículas aglomeradas con cemento ⁽¹⁾	UNE-EN 634-2:2007	Sin espacio de aire detrás del tablero	1000	10	B-s1,d0	Bfl-s1
T. de fibras duro ⁽¹⁾	UNE-EN 634-2:2007	Sin espacio de aire detrás del tablero derivado de la madera	900	6	D-s2,d0	Dfl-s1
T. de fibras duro ⁽³⁾	UNE-EN 634-2:2007	Con espacio de aire confinado inferior o igual a 22mm detrás	900	6	D-s2,d2	-

		del tablero de madera				
T. de partículas (1),(2),(5)	UNE-EN 312:2004	Sin espacio de aire detrás del tablero derivado de la madera	600	9	D-s2,d0	Dfl-s1
T. de fibras duro y semiduro (1),(2),(5)	UNE-EN 622-2:2004 UNE-EN 622-2:2005					
MDF (1),(2),(5)	UNE-EN 622-5:2010		400	9	D-s2,d0	Dfl-s1
OSB (1),(2),(5)	UNE-EN 300:2007					
T. contrachapado (1),(2),(5)	UNE-EN 636:2004		400	12	D-s2,d0	Dfl-s1
T. madera maciza (1),(2),(5)	UNE-EN 13353:2009					
T. de lino (1),(2),(5)	UNE-EN 15197:2007	450	15	D-s2,d0	Dfl-s1	
T. de partículas (3),(5)	UNE-EN 312:2004	Con espacio de aire confinado inferior o igual a 22mm detrás del tablero de madera	600	9	D-s2,d2	-
T. fibras duro y semiduro (3),(5)	UNE-EN 622-2:2004 UNE-EN 622-2:2005					
MDF (3),(5)	UNE-EN 622-5:2010		400	9	D-s2,d2	-
OSB (3),(5)	UNE-EN 300:2007					
T. contrachapado (3),(5)	UNE-EN 636:2004		400	12	D-s2,d2	-
T. madera maciza (3),(5)	UNE-EN 13353:2009					
T. de partículas (4),(5)	UNE-EN 312:2004	Con espacio de aire confinado detrás del tablero derivado de madera	600	15	D-s2,d0	Dfl-s1
T. fibras duro y semiduro (4),(5)	UNE-EN 622-2:2004 UNE-EN 622-2:2005					
MDF (4),(5)	UNE-EN 622-5:2010		400	15	D-s2,d1	Dfl-s1
OSB (4),(5)	UNE-EN 300:2007					
T. contrachapado (4),(5)	UNE-EN 636:2004		400	15	D-s2,d0	Dfl-s1
T. madera maciza (4),(5)	UNE-EN 13353:2009					
T. de lino (4),(5)	UNE-EN 15197:2007	450	15	D-s2,d2	Dfl-s1	
T. de partículas (4),(5)	UNE-EN 312:2004	Con espacio de aire abierto detrás del tablero derivado de madera	600	18	D-s2,d0	Dfl-s1
T. fibras duro y semiduro (4),(5)	UNE-EN 622-2:2004 UNE-EN 622-2:2005					
MDF (4),(5)	UNE-EN 622-5:2010		400	18	D-s2,d1	Dfl-s1
OSB (4),(5)	UNE-EN 300:2007					
T. contrachapado (4),(5)	UNE-EN 636:2004		400	18	D-s2,d0	Dfl-s1
T. madera maciza (4),(5)	UNE-EN 13353:2009					
T. de lino (4),(5)	UNE-EN 15197:2007	450	15	D-s2,d2	Dfl-s1	
T. de partículas (5)	UNE-EN 312:2004	Cualquiera	600	3	E	Efl
OSB (5)	UNE-EN 300:2007					
MDF (5)	UNE-EN 622-5:2010		400	3	E	Efl
			250	9	E	Efl
T. contrachapado(5)	UNE-EN 636:2004		400	3	E	Efl
T. fibras duro (5)	UNE-EN 622-2:2004		900	3	E	Efl
T. fibras semiduro (5)	UNE-EN 622-2:2005		400	9	E	Efl
T. fibras blando	UNE-EN 622-4:2010		250	9	E	Efl

(1) Instalado sin cámara de aire y sobre productos de clase A1 o A2-s1, d0 con una densidad mínima de 10 kg/m³ o al menos sobre productos de clase D-s2,d2 con una densidad mínima de 400 kg/m³.

(2) Podrá incluirse un sustrato de material aislante de celulosa, de clase E como mínimo, si se instala directamente contra el tablero derivado de la madera, pero no para los suelos.

(3) Instalado sobre una C.A. posterior. La cara opuesta de la cámara debe incorporar, como mínimo, productos de la clase A2-s1,d0 que tengan una densidad mínima de 10 kg/m³.

(4) Instalado sobre una cámara de aire posterior. La cara opuesta de la cámara debe incorporar, como mínimo, productos de la clase D-s2,d2 que tengan una densidad mínima de 400 kg/m³.

(5) Se incluyen los tableros rechapados y recubiertos con melamina y fenol, excluyendo los utilizados en suelos.

(6) Si no existe cámara de aire, se puede instalar entre los tableros y el sustrato una barrera de vapor con un espesor igual o inferior a 0,4 mm y con una masa igual o inferior a 200 g/m².

3.4.4. Revestimientos de Suelos Laminados

Tabla 3.5: Clasificación de las propiedades de reacción al fuego de los revestimientos de suelo laminados; Fuente: Real Decreto 110/2008

Producto	Norma del Producto	Cond. De Utilización	Densidad mínima (kg/m ³)	Espesor mínimo (mm)	Clase (Suelos)
Revestimientos de suelos laminado ⁽¹⁾	UNE-EN 13329:2007 + A1:2009	-	800	6,5	Bfl-s1

(1) Revestimiento de suelo depositados sueltos sobre cualquier sustrato con base de madera D-s2,d0 o cualquier sustrato de clase A2-s1,d0

3.4.5. Suelos de Madera y Parqué

Tabla 3.6: Clasificación de las propiedades de reacción al fuego de los suelos de madera y parqué; Fuente: Real Decreto 110/2008

Producto ^{(1),(7)}	Norma del Producto ⁽⁴⁾	Información del Producto	Cond. de uso final	Densidad media mínima ⁽⁵⁾ (kg/m ³)	Espesor mínimo (mm)	Clase (Suelos)	
Suelos de madera y parqué	UNE-EN 14342:2006+ A1:2009	Suelos de madera maciza de roble y haya con acabado superficial	Encolado al sustrato ⁽⁶⁾	Haya: 680 Roble: 650	8	Cfl-s1	
		Suelos de madera maciza de roble, haya y píceca con acabado superficial	Con o sin cámara de aire inferior	Haya: 680 Roble: 650 Píceca: 450	20		
		Suelos de madera maciza con acabado superficial no especificados arriba	Sin cámara de aire inferior	390	8	Dfl-s1	
Con cámara de aire inferior			20				
Parqué		UNE-EN 14342:2006+ A1:2009	Parqué multicapa con capa superior de roble de 5mm de grosor mínimo y con acabado superficial	Encolado al sustrato ⁽⁶⁾	650 (Capa superior)	10	Cfl-s1
				Con o sin cámara de aire inferior		14 ⁽²⁾	
	Parqué multicapa con acabado superficial y no especificado arriba		Encolado al sustrato	500	8	Dfl-s1	
Sin cámara de aire inferior			10				
Con o sin cámara de aire inferior			14 ⁽²⁾				
Revestimiento de suelo rechapado con acabado superficial			Sin cámara de aire inferior		800	6 ⁽²⁾	Dfl-s1

- (1) Montado de acuerdo con la Norma UNE-EN ISO 9239-1:2002 y Erratum: 2004, sobre un sustrato de Clase D-s2,d0 como mínimo y con una densidad mínima de 400 kg/m³, o sobre cámara de aire.
- (2) En el caso de los parqués con un espesor igual o superior a 14 mm o de los revestimientos de suelo realizados sin cámara de aire debajo puede incluirse una capa intermedia de Clase E como mínimo, con un grosor máximo de 3 mm.
- (4) Los tipos y densidades superficiales de los revestimientos incluidos son: acrílico poliuretano o cera 50/100 g/m² y aceite entre 20-60 g/m².
- (5) Acondicionado de acuerdo con la Norma UNE-EN 13238:2002 (50%*Hr*, 23°C).
- (6) Sustrato de Clase A2-s1,d0 como mínimo.
- (7) Se aplica también a los peldaños de escalera

3.4.6. Revestimientos Murales Interiores y Exteriores de Madera Maciza

Tabla 3.7: Clasificación de las propiedades de reacción al fuego de los revestimientos murales interiores y exteriores de madera maciza; Fuente: Real Decreto 110/2008

Producto ⁽¹¹⁾	Información del Producto ⁽⁵⁾	Cond. de uso final ⁽⁴⁾	Densidad media mínima (kg/m ³) ⁽⁶⁾	Espesor mínimo ⁽⁷⁾ (mm)	Clase (Suelos)
Revestimientos murales interiores y exteriores ⁽¹⁾	Piezas de madera con o sin machihembrado y con o sin mecanización superficial	Con o sin cámara de aire posterior	390	9/6	D-s2,d0
				12/8	
Revestimientos murales interiores y exteriores ⁽²⁾	Piezas de madera con o sin machihembrado y con o sin mecanización superficial	Con cámara de aire posterior <20mm	390	9/6	D-s2,d0
				18/12	
Lamas de madera ⁽⁸⁾	Piezas de madera colocadas sobre un bastidor ⁽⁹⁾	Todas las caras al aire ⁽¹⁰⁾	390	18	D-s2,d0

- (1) Fijadas sobre rastreles de madera, con C.A. cerrada o rellena con un sustrato de clase A2-s1,d0 como mínimo, con una densidad de al menos 10 kg/m³, o relleno con un sustrato de material aislante de celulosa, como mínimo de la clase E y con o sin barrera de vapor posterior. El producto de madera estará diseñado de forma que se pueda colocar sin juntas abiertas.
- (2) Fijadas sobre rastreles de madera, con o sin C.A. posterior. El producto de madera estará diseñado de manera que se pueda colocar sin juntas abiertas.
- (4) Puede incluirse una cámara de aire detrás del producto como posible ventilación, mientras que una cámara cerrada de aire no permite dicha ventilación. El sustrato situado detrás de la cámara cerrada de aire será de clase A2-s1,d0 como mínimo, con una densidad de al menos 10 kg/m³. Para piezas verticales y con una cámara cerrada de aire de 20 mm como máximo, el sustrato situado detrás podrá ser como mínimo de la clase D-s2,d0.
- (5) Las juntas incluyen todos los tipos, por ejemplo, a tope o machihembradas.
- (6) Acondionadas conforme a la Norma UNE-EN 13238:2002.
- (7) La superficie mecanizada de la cara expuesta del revestimiento será menor o igual del 20% de la superficie sin mecanizar, o del 25% si se miden ambas caras, la expuesta y la no expuesta. En las uniones tope, se considera como grosor la superficie de contacto de la unión.
- (8) Piezas de madera rectangulares, con o sin aristas redondeadas, montadas en horizontal o verticalmente sobre un bastidor y con todas las caras al aire, utilizadas principalmente en la proximidad de otros elementos de edificación, tanto en aplicaciones de interior como de exterior.
- (9) La superficie máxima de exposición (todas las caras de las piezas rectangulares de madera y del bastidor de madera) será menor o igual al 110% de la superficie sin mecanizar.
- (10) Los elementos de la edificación situados a una distancia inferior a 100 mm de las lamas de madera (excluyendo su bastidor) deberán ser, como mínimo, de la clase A2-s1,d0; para distancias entre 100 y 300 mm, será como mínimo de la clase B-s1,d0; y para distancias superiores a 300 mm, de clase D-s2,d0.
- (11) También se aplica a las escaleras

3.5. Reacción al Fuego según el CTE

Según el Código Técnico de la Edificación no hay una distinción entre materiales, simplemente se limita a establecer una categoría mínima de los materiales en cuanto a reacción al fuego. En cambio en elementos estructurales sí que encontramos normativa específica sobre el cálculo de la resistencia que deben tener los elementos a fuego dependiendo de los materiales constructivos.

En el documento básico de seguridad en caso de incendio, sección SI 1 – Propagación interior encontramos en el punto 4 la tabla 4.1 sobre clases de reacción al fuego de los elementos constructivos, decorativos y de mobiliario.

Tabla 3.8: Clases de reacción al fuego de los elementos constructivos, decorativos y de mobiliario; Fuente: CTE-DB-SI-Propagación interior - Tabla 4.1

Situación del elemento	REVESTIMIENTOS	
	Techos y paredes	Suelos
Zonas ocupables	C-s2,d0	Efl
Pasillos y escaleras protegidos	B-s1,d0	Cfl-s1
Aparcamientos y recintos de riesgo especial	B-s1,d0	Bfl-s1
Espacios ocultos no estancos tales como patinillos, falsos techos, suelos elevados (excepto los existentes dentro de la vivienda), etc. o que, siendo estancos, contengan instalaciones susceptibles de iniciar o propagar un incendio.	B-s3,d0	Bfl-s2

Como podemos observar, el CTE es bastante restrictivo si lo comparamos con los valores de clasificación que obtiene la madera en las normas UNE-EN. Esto no quiere decir que no sea posible la utilización de los productos relacionados con la madera.

En el mercado podemos encontrar tratamientos de ignifugación, que actúan sobre la madera reduciendo su combustibilidad y que le otorgan una mejora en cuanto a la calificación, y por tanto su cumplimiento dentro de la norma.

3.6. Tratamientos de Protección Contra el Fuego en Madera

Los tratamientos de la madera se pueden dividir en dos categorías sobre las cuales se pueden englobar rápidamente. La pasiva y la activa, la primera correspondería a los tratamientos que se aplican en la madera y que la propia estructura de la madera es la encargada de recibir o absorber una cantidad variable dependiendo de sus propiedades, por tanto siendo un proceso poco controlado. En cambio la segunda correspondería a métodos o procesos de tipo más industrial, normalmente empleando la impregnación mediante técnicas de vacío, donde se logran valores controlados y por tanto una mayor precisión y efectividad. Cabe destacar que tanto los tratamientos activos como pasivos sirven para protección de la madera frente a agentes degradadores, insectos xilófagos o de protección contra el fuego se realizan utilizando las mismas técnicas.

3.6.1. Tratamientos Pasivos

Estos tratamientos son los más económicos, esto se debe principalmente a que no se necesita una elevada capacidad industrial para aplicarlos ya que el factor más determinante es el grado de absorción de la madera. Los procesos pasivos se dividen en los siguientes procesos (Peraza, 2001):

- **Pincelado:** como su nombre indica se trata de un proceso de aplicar un tratamiento superficial sobre la madera para modificar sus propiedades o resistencia. Normalmente se utilizan barnices o pinturas para la protección contra el fuego.
- **Pulverización:** Se puede considerar un tratamiento perfeccionado del pincelado, para su empleo se usa un pulverizador, con el cual obtenemos un acabado más controlado y de más calidad que con el pincelado. Al igual que con el pincelado, los productos que se aplican son barnices y pinturas.
- **Inmersión:** Este proceso consiste en sumergir la madera, previamente secada, en una solución hidrosoluble para que el agua que absorba la madera traslade a su interior el producto y colmate los huecos una vez esta agua se evapore. Podemos encontrar variaciones diferentes variaciones en este proceso como tratamientos donde se calienta la solución para mejorar la absorción o diferencias entre los tiempos de inmersión, pero todos derivan de este proceso.

3.6.2. Tratamientos Activos

Para estos tratamientos, como hemos comentado antes, se utilizan técnicas de vacío y para ello son necesarios los autoclaves. Los autoclaves son unos recipientes estancos, donde una vez la madera es depositada en su interior, este se cierra y se llena con la solución para tratar la madera trabajando a altas presiones. Para la aplicación de estos procesos hace falta una gran especialización y una elevada capacidad industrial ya que la construcción de un autoclave para tratar madera es muy costosa. Dependiendo de las presiones, vacíos y duración de los tratamientos podemos encontrar diferentes procesos (Peraza, 2001):

- **Sistema de Célula Llena:** inventado en 1839 por John Bethel, este proceso consiste en conseguir forzar la entrada de diferentes productos en el interior de los poros de la madera. El proceso consta de diferentes fases, donde inicialmente se realiza un vacío inicial para extraer el aire que contiene la madera en su interior. Posteriormente se introduce el producto a presión para que ocupe los espacios donde inicialmente se encontraba el aire. Y finalmente se vuelve a realizar un vacío para regular la cantidad de producto que se ha introducido.

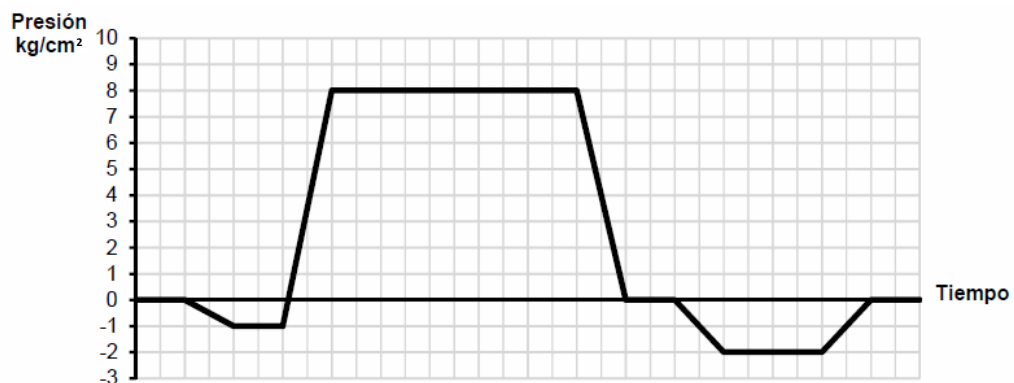


Ilustración 8: Sistema Bethel (Célula Llena)

- **Sistema de Célula Vacío:** inventado en 1902 por Max Rüping, también encontramos el patentado en 1906 por Guthbert Lowry, este proceso busca un tratamiento en profundidad. Para ello inicialmente se somete a la madera a una presión superior a la atmosférica antes de introducir el producto. Posteriormente se introduce el producto y una vez se ha realizado se procede a la realización otra vez del vacío para controlar la cantidad de producto que se ha introducido en la madera.



Ilustración 9: Sistema Lowry (Célula Vacía)

- **Sistema de doble Vacío:** introducido en 1950 también es conocido como sistema vac-vac, se emplea para realizar un tratamiento de protección perimetral de las paredes celulares sin rellenar totalmente las células. Inicialmente se realiza un vacío para extraer el aire de la madera. Posteriormente se introduce el tratamiento protector a presión atmosférica, o ligeramente superior. Y finalmente realizamos un vacío final, al igual que en los demás sistemas, para controlar la cantidad de producto introducida. Este sistema se suele emplear para productos previamente elaborados como pueden ser carpinterías o piezas de revestimientos.

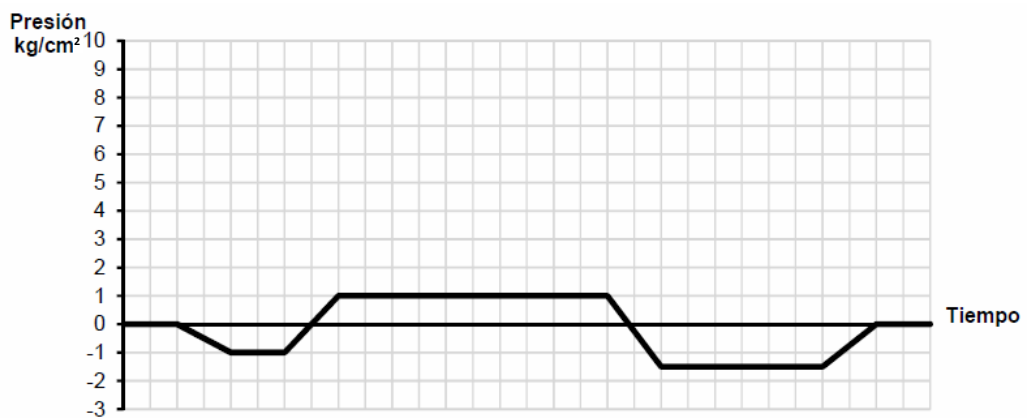


Ilustración 10: Sistema Vac-Vac

3.7. La Impregnación de la madera

La impregnación de la madera consiste en la introducción en el interior de su estructura porosa de productos químicos para poder protegerla de organismos destructores. Se suelen utilizar sistemas de vacío (Tratamientos activos) y su función principal es aumentar la durabilidad de la madera.

3.7.1. Impregnabilidad

Actualmente podemos encontrar información sobre la impregnabilidad de la madera en la normativa **UNE-EN 350-2:1995**. Esta norma trata sobre la durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. En su parte segunda encontramos la guía de la durabilidad natural y de la impregnabilidad de especies de madera en función de su importancia en Europa. Para la clasificación de la impregnabilidad se utiliza el método establecido por la **UNE-EN 14734** donde se describe el método de laboratorio para determinarla.

Aunque este documento se encuentra enfocado a tratamientos de conservación contra agentes degradadores de la madera de tipo biótico, como termitas, e insectos de ciclo larvario, encontramos un apartado sobre la impregnación de la madera que puede ser extrapolable a tratamientos de ignifugación debido a que tiene en cuenta las propiedades de la madera para ser impregnadas.

Encontramos una clasificación sobre la clase de impregnabilidad dividida en cuatro categorías:

1. **Impregnable:** Muy fácil de impregnar, puede ser impregnada totalmente con tratamiento a presión.
2. **Medianamente Impregnable:** Fácil de impregnar. Aunque no es una impregnación completa, pero después de 2 o 3 horas de tratamiento de presión se alcanzan penetraciones de más de 6mm en coníferas. En cambio en frondosas se puede conseguir la impregnación de una gran parte de los vasos.
3. **Poco Impregnable:** Difícil de impregnar. Después de 3 o 4 horas de tratamiento bajo presión se alcanzan sólo penetraciones entre 3 y 6mm.
4. **No Impregnable:** Prácticamente imposibles de impregnar. Después de 3 o 4 horas de tratamiento bajo presión sólo se absorben pequeñas cantidades de producto. Penetraciones longitudinales y laterales mínimas.

Teniendo en cuenta esta clasificación encontramos la tabla C2 sobre impregnabilidad de maderas ensayadas en la UNE-EN 350-2:1995.

Tabla 3.9: Impregnabilidad de la madera según su especie; Fuente: Tabla C2 UNE-EN 350-2:1995

ESPECIE	IMPREGNABILIDAD DE	
	Albura	Duramen
<i>Cedrus odorata</i> L - Cedro	1-2	3-4
<i>Pinus taeda</i> - Pino Amarillo del Sur	1	3-4
<i>Pinus radiata</i> D. Don - Pino Insignis	1	2-3
<i>Pseudotsuga mezesii</i> - Pino Oregón	3	4
<i>Pinus pinaster</i> Ait. - Pino Pinaster	1	4
<i>Castanea sativa</i> Mill. - Castaño	2	4
<i>Pinus sylvestris</i> L. - Pino Silvestre	1	3-4

<i>Eucalyptus globulus</i> Labill - Eucalipto	1	3
<i>Fraxinus excelsior</i> L. - Fresno	2	2
<i>Fagus sylvatica</i> L. - Haya europea	1	1
<i>Quercus robur</i> spp - Roble europeo	1	4
<i>Milicia excelsia</i> - Iroko	1	4
<i>Millettia laurentii</i> De Wild. - Wengé	n/d	4

3.7.2. Clases de Uso y Nivel de Penetración (CTE)

En el Código Técnico de la Edificación no tenemos ninguna mención sobre impregnaciones de madera, en cambio en función a las diferentes situaciones de servicio en las que se puede encontrar expuesta la madera para uso estructural establece cinco clases de uso y seis niveles de penetración de la madera para garantizar su durabilidad.

Estos cinco niveles de protección derivan de la normativa UNE-EN 335-1:2007 y quedan integrados dentro del CTE.

- **Clase de uso 1:** el elemento estructural está a cubierto, protegido de la intemperie y no expuesto a la humedad. En estas condiciones la madera maciza tiene un contenido de humedad menor que el 20%. Ejemplos: vigas o pilares en el interior de edificios.
- **Clase de uso 2:** el elemento estructural está a cubierto y protegido de la intemperie pero, debido a las condiciones ambientales, se puede dar ocasionalmente un contenido de humedad de la madera mayor que el 20 % en parte o en la totalidad del elemento estructural. Ejemplos: estructura de una piscina cubierta en la que se mantiene una humedad ambiental elevada con condensaciones ocasionales y elementos estructurales próximos a conductos de agua.
- **Clase de uso 3:** el elemento estructural se encuentra al descubierto, no en contacto con el suelo. El contenido de humedad de la madera puede superar el 20% Se divide en dos clases:
 - **Clase de uso 3.1:** El elemento estructural se encuentra al exterior, por encima del suelo y protegido, es decir sujeto a medidas de diseño y constructivas destinadas a impedir una exposición excesiva a los efectos directos de la intemperie, inclemencias atmosféricas o fuentes de humedad. En estas condiciones la humedad de la madera puede superar ocasionalmente el contenido de humedad del 20%. Ejemplos: viga que vuela al exterior pero que en su zona superior y testas están protegidas por una albardilla o piezas de sacrificio.
 - **Clase de uso 3.2:** el elemento estructural se encuentra al exterior, por encima del suelo y no protegido. En estas condiciones la humedad de la madera supera frecuentemente el contenido de humedad del 20%. Ejemplos: cualquier elemento cuya cara superior o testa se encuentre sometida a la acción directa del agua de la lluvia, pilar que sin estar empotrado en el suelo guarda con éste una distancia reducida y está sometido a salpicaduras de lluvia o acumulaciones de nieve, etc.
- **Clase de uso 4:** el elemento estructural está en contacto con el suelo o con agua dulce y expuesto por tanto a una humidificación en la que supera permanentemente el contenido de humedad del 20%. Ejemplos: construcciones en agua dulce y pilares en contacto directo con el suelo.
- **Clase de uso 5:** situación en la cual el elemento estructural está permanentemente en contacto con agua salada. En estas circunstancias el contenido de humedad de la madera es mayor que el 20%, permanentemente. Ejemplo: construcciones en agua salada.

En función de las clases de usos encontramos una tabla de relación directa con los niveles de penetración descritos en la normativa UNE-EN 335-1:2007. La norma describe seis niveles de penetración de NP1 a NP6. En el Código Técnico de la Edificación encontramos una fusión de esta tabla junto con los niveles de uso para tener una visualización general y una fácil relación entre los usos y el nivel de penetración necesario.

Tabla 3.10: Elección del tipo de protección; Fuente: CTE: DB SE-M Tabla 3.1

ELECCIÓN DEL TIPO DE PROTECCIÓN		
Clase de Uso	Nivel de Penetración (UNE-EN 351-1)	
1	NP1 ⁽¹⁾	Sin exigencias específicas. Todas las caras tratadas
2	NP1 ^{(2),(3)}	Sin exigencias específicas. Todas las caras tratadas
3.1	NP2 ⁽³⁾	Al menos 3 mm en la albura de todas las caras de la pieza
3.2	NP3 ⁽⁴⁾	Al menos 6 mm en la albura de todas las caras de la pieza. Todas las caras tratadas.
4	NP4 ⁽⁵⁾	Al menos 25 mm en todas las caras
	NP5	Penetración total en la albura. Todas las caras tratadas
5	NP6 ⁽⁴⁾	Penetración total en la albura y al menos en 6 mm en la madera de duramen expuesta.
<p>(1) Se recomienda un tratamiento superficial con un producto insecticida</p> <p>(2) El elemento de madera deberá recibir un tratamiento superficial con un producto insecticida y fungicida.</p> <p>(3) Los elementos situados en cubiertas ventiladas se asignarán a la clase 2. En cubiertas no ventiladas, se asignarán a la clase 3.1, salvo que se incorpore una lámina de impermeabilización, en cuyo caso se asignarán a la clase 2. Asimismo, se considerarán de clase 3.1 aquellos casos en los que en el interior de edificaciones exista riesgo de generación de puntos de condensación no evitables mediante medidas de diseño y evacuación de vapor de agua</p> <p>(4) Las maderas no durables naturalmente empleadas en estas clases de uso deberán ser maderas impregnables (clase 1 de la norma UNE-EN 350-2).</p> <p>(5) Sólo para el caso de madera de sección circular (rollizo).</p>		

Aunque esta tabla puede parecer muy clara respecto a la necesidad de impregnación de la madera para proteger su durabilidad, en cierta manera, carece de sentido teniendo en cuenta la tabla que hemos analizado inicialmente sobre la impregnabilidad de cada especie de madera (tabla 3.10) marcada por la norma UNE-EN 350.

Para resolver esta incongruencia el CTE implementa un apartado sobre la impregnabilidad de la madera en el que contradice explícitamente la tabla 3.1 sobre los niveles de penetración. En el apartado **“3.2.3 Durabilidad natural e impregnabilidad”** encontramos:

- La albura o el duramen de una especie no tiene por qué requerir protección para una determinada clase de uso a pesar de que así lo indicase la tabla 3.1.
- Cada especie y zona tiene también asociada una impregnabilidad, es decir, una cierta capacidad de ser impregnada con mayor o menor profundidad. En caso de que se especifique la especie y zona, debe comprobarse que el tratamiento prescrito al elemento es compatible con su impregnabilidad.

Como podemos observar el CTE por un lado nos indica unos niveles de protección mínimos para garantizar la durabilidad, pero en cambio, analizándolo al detalle vemos que como no es posible garantizar este nivel de impregnación debido a la variable de impregnabilidad de cada madera, nos remite a la norma UNE-EN 350 para consultar estos niveles y actuar según nuestro criterio técnico.

3.8. Retardantes de Llama en Madera

Como hemos observado en la clasificación de los retardantes de llama, no todos los compuestos son válidos para todos los productos. La gran variedad que existen hoy en día se centran en su mayoría en retardantes de llama para productos poliméricos destinados a aparatos electrónicos o textil. Esto condiciona su utilización en la madera ya que estos se adhieren en la fase de creación del material y la madera es un producto que se trata posteriormente y que su composición no varía.

Los retardantes de llama destinados a la madera, como hemos observado anteriormente, o se aplican superficialmente en forma de barnices o pinturas, tratamiento activo, o bien se aplican tratamientos de presión, tratamientos pasivos. Por tanto los productos utilizados deben introducirse en el interior de las células de la madera.

En construcción, actualmente se utilizan maderas tratadas, por tanto cuando las adquirimos podemos indicar que tipo de tratamiento queremos para que las maderas se comporten mejor en cuanto a la reacción. En cambio para las construcciones existentes se utilizarán productos superficiales debido a la imposibilidad de tratar a presión.

3.8.1. Retardantes de llama más comunes aplicados en madera

En general los tipos de retardantes de llama más utilizados en madera son los basados en compuestos de fósforo como por ejemplo el ácido fosfórico (H_3PO_4), fosfatos de melamina ($C_3H_9N_6O_4P$), (Mono-, Di- y Poli-fosfatos o fosfonatos) de amonio o los fosfatos de potasio como el monobásico (KH_2PO_4) y el dibásico (K_2HPO_4) (Eluyar, 2005).

Los compuestos con base de nitrógeno, como ya comentamos en el análisis de los compuestos utilizados en los retardantes de llama, están empezando a expandir su uso, sobre todo en base a las restricciones de los halogenados. Su comportamiento poco invasivo con el medio ambiente y su facilidad para la combinación con los fosfatos han propiciado su expansión.

En combinaciones fosforo/nitrógeno en los tratamientos en madera le otorgan unas excelentes propiedades:

- Formación de estructuras moleculares que previenen la formación de gases volátiles.
- Dilución de los gases inflamables gracias a la liberación de los compuestos de nitrógeno.
- Aumenta la función de retardante de llama en mayor medida que si solo se utilizara un compuesto fosforado.
- Durante la descomposición endotérmica libera diferentes sustancias que forman una capa de carbonizada creando una barrera o tapón que frena el flujo de calor, disminuyendo la descomposición.

También encontramos productos derivados del Boro como por ejemplo el Ácido Bórico (H_3BO_3) o el tetraborato de sodio, conocido como Bórax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$).

3.9. Líneas de Investigación

En la actualidad, existe un gran número de investigaciones relativas a los retardantes de llama, basta únicamente observar en los repositorios web especializados para encontrar infinidad de investigaciones de todos los rincones del mundo. Los retardantes de llama no son un tema baladí, y por ello se destina una gran cantidad de recursos y tiempo de los investigadores en avanzar en este campo.

Debido a esta gran cantidad de documentación se ha optado por resaltar algunas investigaciones interesantes descubiertas durante la fase de documentación para este trabajo y sin desmerecer al resto.

3.9.1. Plasma

Uno de los avances sobre los que se está investigando se basa en el método como se insertan los retardantes de llama en la madera. Hasta ahora hemos visto los sistemas tradicionales, ya sean activos o pasivos. En la actualidad se está trabajando en una nueva forma de impregnación superficial basada en el plasma.

Para este tratamiento se utilizan los mismos compuestos habituales como los Ácidos de Fosforo, el Ácido Bórico o los compuestos basados en nitrógeno. El avance no se encuentra en los compuestos sino que se basa en cómo se introducen estos compuestos en la madera. Para ello se usa el tratamiento de plasma por el cual se utiliza una barrera dieléctrica ionizante para descomponer los retardantes de llama en compuestos simples e inoocuos. Una vez descompuestos los introduce mediante la ionización química de los reactivos. En este proceso se puede utilizar uno o más compuestos simultáneamente.

El espesor de penetración que se obtiene oscila entre los 15 y los 20mm, que teniendo en cuenta que lo que se pretende es mejorar la reacción al fuego de la madera, probablemente es una profundidad de penetración suficiente.

Actualmente podemos encontrar algún artículo como el de los investigadores *Karel G. Pabeliña, Carmencita O. Lumban, Henry J. Ramos*, titulado **Plasma impregnation of wood with fire retardants** donde podemos encontrar un análisis realizado utilizando esta técnica y comparándola con los tratamientos convencionales.

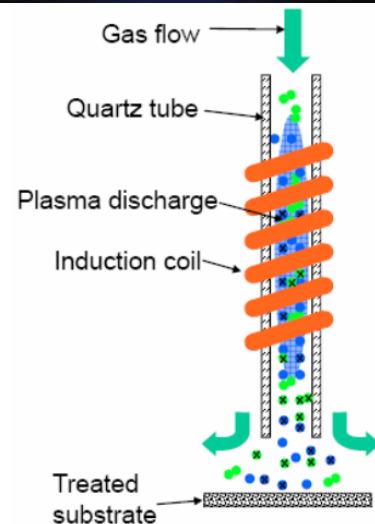


Ilustración 11: Impregnación mediante plasma;
Fuente: *Beam International with material and atoms* (Karel, 2011)

3.9.2. Grafitos Expandibles

Otra línea de investigación sobre nuevos retardantes de llama trabaja en la incorporación de grafitos expandibles en el interior de las estructuras de la celulosa y polímeros publicado por *Duquesne en 2003* y titulado ***Expandable graphite: a fire retardant additive for polyurethane coatings***. El grafito expandible es una mezcla de ácido, normalmente sulfúrico, y láminas de grafito. Cuando el aumento de la temperatura alcanza los 200°C, se forma una expansión del grafito, gracias a la liberación de los gases y vapores, formando una capa de protección. Esta capa de carbón intumescente forma una barrera para el calor y los gases de la pirolisis, logrando reducir el calor de la combustión.

Podemos encontrar más estudios utilizando este sistema en otros productos derivados de la madera como pueden ser los composites. Realizado por A, Naumann en 2012 y titulado ***Material resistance of flame retarded wood-plastic composites against fire and fungal decay***.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Una vez estudiados los diferentes conceptos que intervienen en el proyecto procedemos a la realización de la parte experimental y de investigación. En esta parte vamos a trabajar sobre muestras de madera tratándola con productos retardantes de llama solubles en medio acuoso para impregnarlos en profundidad mediante un autoclave, posteriormente se caracterizarán para conocer su comportamiento en diferentes ensayos de la reacción al fuego.

4.1. Muestras de Madera

Para la realización de las pruebas disponemos de dos tipos de pinos diferentes, por un lado **pinus sylvestris** también conocido como pino rojo y por el otro **pino laricio** también conocido como pino negro. Para cada tipología de madera utilizada en los ensayos tenemos cuatro vigas de sección cuadrada de 1,50m de longitud, la unión de las cuales formaban un único tronco.

4.1.1. Pinus Sylvestris (Pino Silvestre) (Peraza Sánchez & et al, 2004)

Pertenciente a las coníferas se trata de un tipo de pino muy común en el hemisferio norte principalmente en la zona Euroasiática. En España se encuentra en diversas regiones y en cada una de ellas podemos encontrarlo bajo diferentes denominaciones:

- Sierra de Gredos: Pino Serrano
- Cuenca, Soria y Burgos: Pino albar, Pino Soria
- Valsaín: Pino Valsaín
- Aragón: Pino Rojo
- Levante: Pino Rojal
- Cataluña: Pi blancal, Pi bord, Pi rodal o Pi roig

Como podemos observar pese a las diferentes y variadas formas de nombrar al Pino Sylvestris y en todas estamos hablando de la misma especie. Otro nombre muy común en toda España es el de **Pino Silvestre**, traducción directa del nombre botánico. Podemos encontrar grandes masas de Pino Silvestre en las zonas de los Pirineos, la Cordillera Ibérica y la Cordillera Central.

En el análisis de la morfología del pino silvestre podemos apreciar diferencias visibles a simple vista como la diferente tonalidad entre la madera de albura y la de duramen, siendo de un tono amarillento la primera y de un tono rojizo la segunda. Al tratarse de una madera del hemisferio norte podemos apreciar también las diferencias entre los anillos de crecimiento en las épocas de verano que oscilan entre 1,5 y 3mm respecto a los de invierno.

Tabla 4.1: Propiedades físicas y mecánicas del pino silvestre; Fuente: Especies de Madera - AITM

Propiedades Físicas			Propiedades Mecánicas (Madera sin defectos)	
Densidad	500-540 Kg/m ³		Flexión Estática	90-110 N/mm ²
Dureza	2,0 (Semidura)		Módulo de elasticidad	8.600-10.000 N/mm ²
Contracción	Poco Nerviosa		Compresión Axial	42-47 N/mm ²
Coef. Contracción:	%	Unitaria	Compresión Perpend.	9,2 N/mm ²
Volumétrica	12,90	0,34	Cortante	10-11 N/mm ²
Tangencial	6,80	0,21	Flexión dinámica	2,25 J/cm ²
Radial	3,80	0,12	Uso Estructural (UNE-EN 1912:2012)	ME-1 – Clase C27 ME-2 – Clase C18 MEG – Clase C22

En cuanto a las propiedades de manipulación para su uso comercial, el pino silvestre, es un material con una cierta variabilidad. Su secado es rápido y no afecta a su calidad, pese a ello en algunas ocasiones, sobre todo en el secado natural, se produce una cierta tendencia al azulado de la madera. Para evitar estos problemas se suelen tratar con productos para evitar que aparezcan esas tonalidades.

Las propiedades de mecanización son excelentes ya que se puede aserrar, chapar, cortar y encolar sin ninguna dificultad, siempre dependiendo la calidad de la madera ya que no será igual de sencillo si la madera se encuentra llena de nudos. Tampoco ofrece problemas a los tratamientos superficiales de acabado, como barnices, pinturas o tintes.

A nivel de impregnabilidad sí que encontramos problemas ya que se trata de una madera de comportamiento diferencial en cuanto que la albura es impregnable, en cambio el duramen no es impregnable. Su clasificación a nivel de durabilidad lo considera una madera poco durable y con cierta tendencia al ataque de hongos xilófagos, termitas, cerambícidos y anóbidos.

Su uso o aplicación es bastante extendido gracias a su gran disponibilidad, se usa tanto a nivel de construcción para la creación de vigas o cerchas, hasta a nivel decorativo para revestimientos o mobiliario. Es una madera muy versátil.

4.1.2. Pinus Nigra (Pino Laricio) (Peraza Sánchez & et al, 2004)

Aunque igualmente perteneciente a las coníferas, el Pinus Nigra no es un pino tan extendido como el Sylvestris. Esta variedad de pino se encuentra en el sur y centro de Europa teniendo una producción y exportación controlada. En España se le conoce con diferentes nomenclaturas dependiendo de la región:

- Andalucía: Pino Salgareño
- Cuenca, Teruel, Guadalajara o Castellon: Pino Negral
- Ávila: Pino Cascalbo
- Soria y Burgos: Pino Ampudio
- Aragón: Pino Blanco, Nasarre o Nazarrón
- Cataluña: Pi gragalla, Negre, Sarrut o Nassa

Pese a estas diversas nomenclaturas, uno de los nombres más extendidos en el territorio español es el de **Pino Laricio**.

En el análisis morfológico de su estructura podemos encontrar, al igual que en el pino silvestre, diferentes tonalidades entre las zonas de albura y duramen. Siendo de un blanco amarillento y rojo pálido, respectivamente. Suele tratarse de un tipo de madera con numerosas bolsas de resina, hecho que le otorga un olor muy característico.

Tabla 4.2: Propiedades físicas y mecánicas del pino Laricio; Fuente: Especies de Madera - AITM

Propiedades Físicas			Propiedades Mecánicas (Madera sin defectos)	
Densidad	510-650 Kg/m ³		Flexión Estática	92-116 N/mm ²
Dureza	2,2 (Semidura)		Módulo de elasticidad	9.500-10.143 N/mm ²
Contracción	Poco Nerviosa		Compresión Axial	45 N/mm ²
Coef. Contracción:	%	Unitaria	Compresión Perpend.	9 N/mm ²
Volumétrica	11,80	0,34	Cortante	-
Tangencial	6,61	0,25-0,31	Flexión dinámica	2,45 J/cm ²
Radial	3,24	0,14-0,17	Uso Estructural (UNE-EN 1912:2012)	ME-1 – Clase C30 ME-2 – Clase C22 MEG – Clase C22

En cuanto a las propiedades de manipulación para su uso comercial, el pino laricio, es muy similar al silvestre, con algunos matices. Su secado es lento y si se hace a temperatura ambiente pueden producirse la aparición de tonalidades azuladas. Este tipo de pino es sensible a la aparición de fendas de secado en las zonas donde haya nudos, así como la exudación de las zonas de resina.

Las propiedades de mecanización, al igual que el pino silvestre, son excelentes ya que se puede aserrar, chapar, cortar y encolar sin ninguna dificultad, siempre dependiendo la calidad de la madera ya que no será igual de sencillo si la madera se encuentra llena de nudos. Tampoco ofrece problemas a los tratamientos superficiales de acabado, como barnices, pinturas o tintes.

A nivel de impregnabilidad, también encontramos los mismos tipos problemas, ya que se trata de una madera de comportamiento diferencial en cuanto que la albura es impregnable y en cambio el duramen no es impregnable. Su clasificación a nivel de durabilidad lo considera una madera poco durable y con una variabilidad al ataque de hongos xilófagos, termitas, cerambidos y anóbidos. Este tipo de pino se utiliza tanto a nivel de construcción, para la creación de puentes, pasarelas o vigas de madera laminada encolada gracias a su elevada resistencia. Hasta para la fabricación de ventanas, pavimentos o revestimientos decorativos.

4.2. Preparación y caracterización de las muestras

Una vez recibidas las muestras de madera se realiza una medición de la humedad para controlar el estado en que se encuentran, para ello se utilizara un higrómetro de agujas para medir la humedad tanto a nivel superficial como a una profundidad de unos 4cm.

Tabla 4.3: Medición del % de humedades en la recepción de las vigas; Fuente: Elaboración propia

Muestra	Cabeza de Viga		Centro de Viga	
	Superf.	a 4cm	Superf.	a 4cm
<i>P. Silvestre</i>				
1	14,8%	19,7%	17,6%	27,1%
2	15,7%	21,9%	20,4%	25,8%
3	14,8%	20,5%	21,0%	28,9%
4	14,5%	20,4%	16,3%	25,1%
<i>P. Laricio</i>				
1	14,4%	24,5%	18,5%	29,8%
2	16,5%	27,1%	21,4%	29,5%
3	17,7%	22,2%	17,8%	27,3%
4	14,9%	21,8%	18,4%	26,6%



Como podemos observar no existen grandes diferencias en cuanto al nivel de humedad entre las dos especies de madera, esto es debido a la higroscopicidad de la madera, ya que si las dos tipologías han sido almacenadas en un mismo lugar, ambas se han estabilizado con el ambiente y presentan valores similares. Aunque sí que podemos observar una diferencia entre la humedad superficial y la que presenta a una profundidad de 4cm.

Para la realización de los ensayos no es necesario el uso de la totalidad de las muestras, para ello se han seleccionado unos 50cm de cada viga y posteriormente se realizarán cortes de 20mm de espesor para tener unas 25 muestras por cada viga. Teniendo en cuenta que disponemos de cuatro vigas de pino Silvestre y otras cuatro de pino Laricio, en total tendremos 200 muestras para ensayar.

Para poder identificar a que especie pertenece cada muestra ensayada se numeraran con dos colores diferentes las muestras de pino Silvestre en color negro y las muestras de pino Laricio en color rojo. Como medida de precaución por si se borran los números también se ha utilizado un código de color diferente en cada muestra para evitar la posibilidad de que se puedan mezclar. Para ello se han utilizado los siguientes códigos:

Tabla 4.4: Código de colores para las muestras; Fuente: Elaboración propia

MUESTRA	1	2	3	4
Pino Silvestre				
Pino Laricio				

Una vez cortadas las muestras, se utilizara un código de tres dígitos donde el primer valor corresponde al número de la muestra (1 al 4) y los otros dos al número de rebanada, para poder reconstruir cada viga y observar cómo ha sido su comportamiento.



Ilustración 12: Preparación y corte de las muestras; Fuente: Elaboración Propia

Esta división nos otorga varias ventajas, por un lado la gran cantidad de muestras que nos permiten realizar todas las pruebas necesarias. Por otro lado también nos ayuda a descartar las muestras con imperfecciones para intentar realizar las impregnaciones con maderas que no tengan nudos internos, fendas o bolsas de resinas, ya que todos estos factores pueden modificar el comportamiento de la madera.

Una vez tenemos cortadas todas las vigas, el siguiente paso consiste en caracterizar la totalidad de las muestras para conocer sus medidas, su masa húmeda (peso a humedad ambiental), para poder hallar la densidad media de cada muestra. Todas las muestras fueron medidas con un calibre digital (precisión ±0.01mm) y pesadas con una báscula digital (precisión ±0.01g).

Tabla 4.5: Caracterización de las muestras; Fuente: Elaboración propia

Especie	Nº Muestras	Dimensiones (mm)	Masa húmeda (g)	Densidad (Kg/m³)
Pino Silvestre	101	99,05x99,99x21,61	110,78	517,20
Pino Laricio	102	98,65x97,88x21,60	111,66	535,64

Como podemos observar en la tabla 4.5, pese a tratarse de dos pinos podemos observar como el pino Laricio es sensiblemente más denso que el Silvestre, hecho que simplemente sosteniendo ambos tramos de viga ya se podía apreciar. Esta diferencia de densidades implicará posibles discrepancias en cuanto a nivel de impregnabilidad y permitirá establecer conclusiones individuales por cada especie.

4.3. Soluciones para impregnar

Uno de los objetivos de este proyecto es ampliar y completar las investigaciones realizadas en anteriores proyectos vinculados a esta línea de investigación. Por ello se ha tenido en cuenta las investigaciones anteriores en este campo para intentar contrastar con productos similares, pero con niveles de impregnación diferentes y así conocer el comportamiento de los materiales utilizados en su máxima amplitud y con la mayor precisión posible y de esta forma poder contrastar las diferentes investigaciones.

Para ello se van a utilizar productos como el sulfato de magnesio hidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), comúnmente conocido como Epsomita, que ya fue utilizado en el proyecto titulado **Mejora del comportamiento al fuego de la madera mediante la impregnación con diferentes productos**, de la autora Carmen Isábal Revilla, donde se utilizaba la Epsomita para impregnar madera de diferentes tipos. En este proyecto se trató la madera con una solución saturada de epsomita (53%), que daba lugar a impregnaciones en la madera de hasta el 70% de epsomita en peso.

Otro de los productos utilizados son el Solubor y el polifosfato de amonio en solución acuosa para lograr su impregnación.

4.3.1. La Epsomita

El sulfato de magnesio hidratado, o Epsomita, es una sal de tipo incolora que se presenta en un tamaño irregular de 1-3mm y con una gran facilidad de solubilizarse en el medio acuoso, la cual se suele utilizar en diferentes sectores productivos. Por un lado podemos encontrar la Epsomita en procesos industriales relacionados con secados. También en el mundo agrícola su uso se centra en las propiedades del magnesio, ya que es un componente necesario para los suelos de cultivo. Esto es debido a que con los ciclos de agrícolas se va agotando, por lo que la epsomita se usa como fertilizante para aportar el grado de magnesio necesario a los terrenos. Por último también se encuentran usos en el sector médico en los cuales principalmente se usan las sales con fines terapéuticos, aunque se pueden encontrar pequeñas dosis en productos broncodilatadores utilizados para tratamientos del asma.

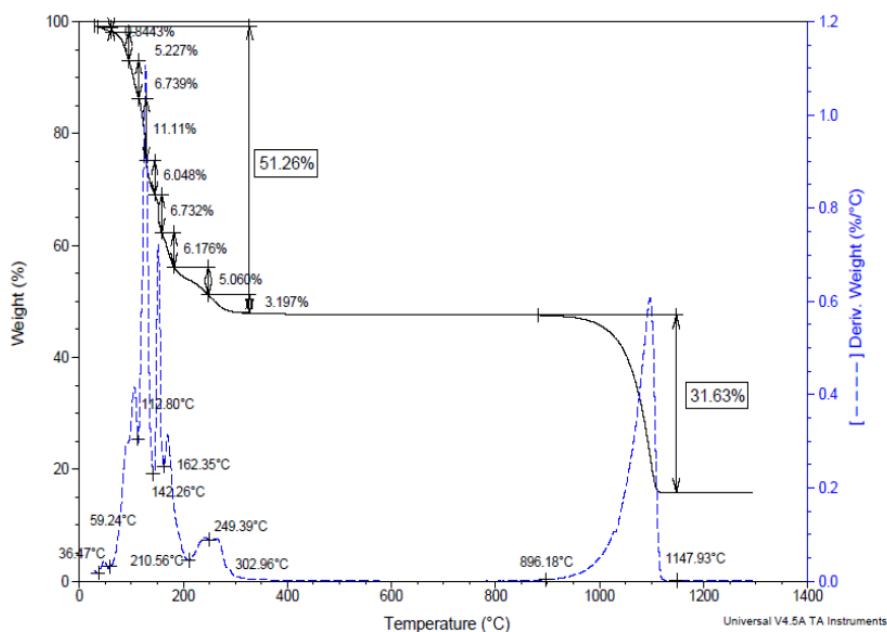


Ilustración 13: Análisis TGA de una muestra de Epsomita; Fuente: Facultad de Química UPC

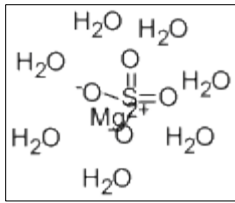


Ilustración 15: Epsomita
Fuente: Chemicalbook

Uno de los rasgos que hacen interesante la Epsomita es su composición molecular, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, como podemos observar tiene siete moléculas de agua. Consultando el análisis Termogravimétrico (TGA) podemos observar el rango de descomposición del material (pérdida de peso), cuando aplicamos un incremento progresivo de la temperatura. En este análisis encontramos una gran pérdida de peso, entorno al 50%, correspondiente a la pérdida de las moléculas de agua entre el rango entre 100 y 300°C. Esta liberación de agua es endotérmica, por lo que la epsomita absorbe calor del medio en el momento de su descomposición.

Este comportamiento induce a pensar que la epsomita puede tener un efecto retardante de llama, ya que el agua liberada diluye los gases combustibles en la fase gaseosa, y las reacciones endotérmicas disminuyen el calor del medio y obligan a que tenga que haber un mayor aporte de energía para provocar la combustión .



Ilustración 14: Preparación de la Epsomita

Para el desarrollo de la investigación se ha preparado una solución de epsomita al 25% en agua. Para la correcta impregnación de las muestras se estima el uso de 7,92 litros de solución, 1,98Kg de Epsomita y 5.94litros de agua.

4.3.2. Solubor

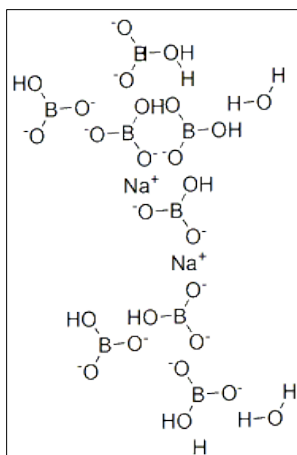


Ilustración 16: Solubor;
Fuente: Chemicalbook

El Octaborato disódico tetrahidratado ($Na_2B_8O_{13} \cdot 4H_2O$), conocido también como solubor se trata de un polvo amorfo de color blanco y catalogado de baja toxicidad. Su principal uso se destina en el sector agrícola como fertilizantes para cultivos. Otro de sus usos más extendidos está muy vinculado al tratamiento en maderas como producto preventivo contra el ataque de termitas y carcomas. Entre sus propiedades encontramos una moderada alcalinidad capaz de neutralizar los ácidos y una tendencia elevada a absorber humedad. Su solubilidad en agua varía dependiendo a la temperatura en la que se encuentre, 9,7% a temperatura ambiente y 34,3% a 50°C.

Como retardante de llama, la familia de los boratos, como hemos visto en los apartados anteriores, modifican las reacciones de

oxidación formando una capa vítrea que crea una barrera que retrasa la combustión. Estas propiedades lo hacen idóneo para el tratamiento en maderas y todo tipo de productos derivados de la celulosa.

La preparación de la solución se ha basado en utilizar el mismo porcentaje que el utilizado con la Epsomita, 25%, por tanto se ha utilizado 1,75kg de Solubor con 5,25litros de agua. Con esta proporción se busca poder comparar el comportamiento de los dos productos en igualdad de concentración.



Ilustración 17: Preparación del Solubor;
Fuente: Elaboración propia

4.3.3. Polifosfato de Amonio

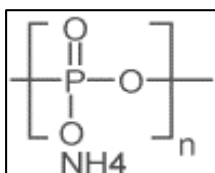


Ilustración 18:
Polifosfato de amonio;
Fuente: Chemicalbook

El polifosfato de amonio utilizado para este proyecto es de tipo o base acuosa, de color verde claro, con una solubilidad en agua elevada, cuando los polifosfatos amonio en polvo son poco solubles (0,5g/100ml). Su pH a temperatura ambiente se encuentra entre 6 y 6,5. Su fórmula química es $[\text{NH}_4 \text{PO}_3]_n$ siendo n la variable de repetición del monómero. Tiene un elevado grado de polimerización, excelente estabilidad térmica y baja capacidad de absorción de agua.

Su uso se destina principalmente al desarrollo de retardantes de llama, tanto para plásticos, espumas intumescentes o para la extinción de incendios. Se trata de un producto libre de halógenos y su mecanismo de acción se basa en la creación de una capa de carbón a través de la cual impide, o retrasa, el paso del oxígeno frenando la oxidación. Otra característica que lo hace interesante es la baja producción de humos y/o sustancias tóxicas durante la combustión.

Para este producto, al presentarse ya en fase acuosa, se ha estimado conveniente la impregnación de las muestras en su proporción comercial ya que se trata de un producto utilizado como retardante de llama, así podremos comparar sus resultados con las otras dos soluciones al 25% y contrastar su efectividad sobre un producto comercial. Se realizarán impregnaciones con dos tipos de polifosfato, una con el FR CROS C-70, del que tenemos muy poca cantidad, y otra con FR CROS 134, cedido por Budenheim, más concentrado según informa la firma.

A modo de tabla esquemática las soluciones utilizadas en este proyecto son las siguientes:

Tabla 4.6: Resumen de cantidades de solución; Fuente: Elaboración propia

PRODUCTO	FORMULACIÓN	% DE SOLUCIÓN	TOTAL SOLUCIÓN
Epsomita	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	25%	7,92l
Solubor	$\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	25%	7,00l
Polifosfato de Amonio FR CROS C-70	$[\text{NH}_4\text{PO}_3]_n$	-	3,00l
Polifosfato de Amonio FR CROS 134	$[\text{NH}_4\text{PO}_3]_n$	-	5,00l

4.4. Secado de las muestras

Según la norma UNE-EN 13183- 1 y 2 Encontramos dos tipos de ensayos regulados para determinar el contenido de humedad de la madera, el secado en estufa y el de la resistencia eléctrica (xilohigrómetro eléctrico). Ambos son válidos, siendo el de la estufa el más preciso, aunque se trata de un método semi-destructivo ya que puede degradar levemente la estructura de las muestras. En cambio el xilohigrómetro se trata de un método no destructivo pero su intervalo de precisión es bueno entre un intervalo de humedad del 7-27%, en valores inferiores puede inducir errores de medida y en superiores no es relevante ya que la madera tiene un comportamiento estable en porcentajes superiores al 30%.

En nuestro ensayo se ha determinado como más beneficioso el método de la estufa, también conocido como método por pesadas ya que al conocer la masa húmeda de la madera (M_h), medida antes de entrar a la estufa, se van realizando pesadas y así podemos conocer la humedad real de las muestras. Se considera que la madera logra su secado cuando la pérdida de peso entre pesadas es inferior al 0,1%, así obtenemos la masa seca (M_o). Para este ensayo la temperatura de la estufa se encuentra a una temperatura constante de $100\pm 2^\circ\text{C}$.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{M_h - M_o}{M_o} \times 100$$

M_h : Masa de la madera húmeda
 M_o : Masa de la madera seca

*Ilustración 19: Fórmula para cálculo de la humedad por pesadas;
Fuente: Elaboración propia*

Gracias a este método podemos controlar la humedad de las piezas hasta su peso seco y por otro lado maximizar el proceso de impregnación de las muestras ya que al realizar el secado eliminamos el agua de saturación, causante de la mayoría de variaciones tanto dimensionales como de las propiedades de la madera, dejando el máximo de huecos internos en las cavidades de la madera para poder rellenarse con las soluciones.

4.5. Proceso de impregnación

4.5.1. El autoclave

Para realizar el proceso de impregnación se va a utilizar el autoclave vertical del laboratorio de materiales de la EPSEB. Este autoclave puede realizar el vacío en su interior pero no trabaja a presión por tanto no se podrán trabajar con los sistemas activos vistos anteriormente.



DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

- 1- Vacuómetro
- 2- Bomba de Extracción
- 3- Cámara de vacío
- 4- Válvula de esfera para desagüe
- 5- Válvula de esfera para romper el vacío
- 6- Enchufe rápido para aplicar presión
- 7- Compuerta hermética de cierre

Ilustración 20: Autoclave para ensayos EPSEB; Fuente: Elaboración propia

El autoclave utilizado es de pequeño formato en comparación con los que la industria maderera utiliza para realizar las impregnaciones de grandes piezas que pueden llegar a tener más de 30 metros de longitud y 2 metros de diámetro. Las medidas del autoclave son de 1,50m de altura por 0.45m de diámetro interior y está formado por una bomba que realiza el vacío, una compuerta que garantiza el vacío mediante el roscado de tornillos y una goma de unión entre la compuerta y el tanque, un vacuómetro para controlar la presión del interior del tanque y tres llaves de esferas para realizar la obertura del tanque para realizar el vacío, otra para expulsar el aire una vez finalizado el vacío y la última para realizar el vaciado del líquido del interior del tanque.

El sistema utilizado consistirá en los siguientes pasos:

1. Vacío inicial a -1 atmosfera
2. Tiempo de espera de 30 minutos
3. Rotura de vacío y retorno a presión ambiental
4. Segundo vacío a -1 atmosfera
5. Tiempo de espera de 30 minutos
6. Rotura de vacío y extracción de las muestras

Con estos dos vacíos se pretende que la madera absorba el máximo posible de la solución, de ahí la necesidad de secarla lo máximo posible para que el proceso sea eficiente.

4.5.2. Selección de muestras y colocación

Gracias a la gran cantidad de muestras con las que podemos trabajar, se ha decidido siempre intentar seleccionar una tipología de piezas libres de nudos, con el mínimo duramen posible y sin deformaciones o marcas características. Esto facilitará la homogeneidad de las impregnaciones para poder lograr resultados que puedan ser comparados.

Hay que tener en cuenta que no todas las maderas se van a impregnar de la misma forma ya que al ser un material anisótropo cada rebanada de madera puede tener diferentes propiedades

como una distribución de fibras que afecten a la impregnación. Simplemente con la selección se intentará minimizar estas irregularidades.



Ilustración 21: Jaula para la impregnación: Imagen izquierda corresponde a una vista en planta y la imagen derecha a una vista en alzado; Fuente: Elaboración propia

Una vez tenemos seleccionadas las muestras para impregnar, estas se colocarán en una jaula creada para evitar que las piezas se dispersen, o floten cuando las pongamos en el interior de la solución para impregnar. A su vez se le colocará un peso sobre la jaula para garantizar que la totalidad de la jaula queda inmersa dentro de la solución.

Como podemos observar en las imágenes de las fotografías anteriores, por cada impregnación tanto de Epsomita como de Solubor, se utilizará una jaula de ocho muestras en las cuales siempre se colocarán cuatro muestras de Pino Silvestre y cuatro muestras de Pino Laricio así podremos observar los porcentajes de impregnación tanto por especies como por el número de impregnación a la que corresponde.

Para las muestras impregnadas con polifosfato de amonio, al tener una cantidad inferior de producto, se ha considerado óptimo realizar la impregnación en un recipiente más pequeño y por tanto las muestras no entraban en las jaulas.



Ilustración 22: Impregnación con polifosfato de amonio FR CROS 134; Fuente: Elaboración propia

Para realizar esta impregnación se han colocado cuatro chinchetas en los extremos de las muestras, para generar grueso y permitir la impregnación correctamente y se han introducido directamente en el recipiente con un peso en la parte superior para evitar la flotación de las muestras.

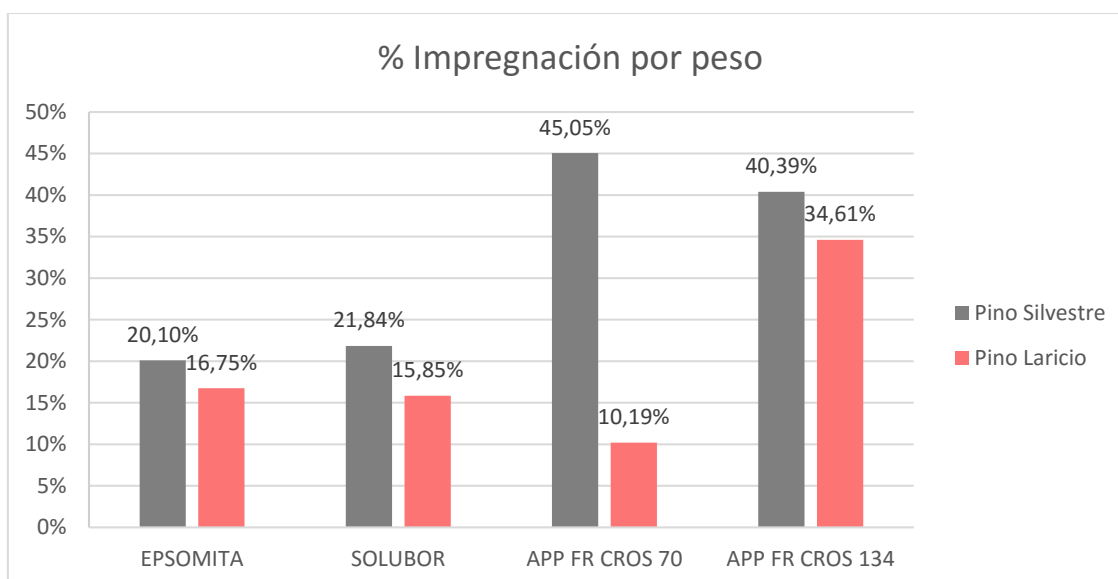


Ilustración 24: grafica del % de impregnación media por especie y solución respecto del peso seco; Fuente: Elaboración propia

Para comprobar el porcentaje de solución en las muestras se ha realizado un análisis que consiste en controlar la pérdida de peso de la madera, una vez impregnada, hasta su secado completo y comprobar de la diferencia de peso respecto a su estado seco inicial (antes de la impregnación). Con estos valores conocemos el peso de la pérdida de agua y el diferencial de peso de la muestra (peso de solución en el interior de la madera), por tanto podemos conocer el porcentaje de la solución que ha quedado en su interior. Este porcentaje es útil para confirmar la correcta ejecución de las soluciones, ver si hay divergencias o comportamientos anómalos en el proceso de secado. Hay productos, como la epsomita, que a partir de una cierta temperatura empiezan a descomponerse, por tanto puede resultar interesante comprobar el estado de las muestras antes de ensayarlas.

Como las impregnaciones siempre se han realizado con las mismas soluciones tanto para Pino Silvestre como Laricio, y combinando maderas de los dos tipos en cada impregnación, solo podemos obtener porcentaje global de las cantidades impregnadas.

Tabla 4.8: Comparativo de impregnación entre solución y realidad, Fuente: Elaboración propia

PRODUCTO IMPREGNADO	% SOLUCIÓN ESTIMADO	% SOLUCIÓN REAL
Epsomita	25 %	24,41 %
Solubor	25%	26,25 %
APP FR CROS C-70	-	38,53 %
APP FR CROS 134	-	63,28 %

En cuanto a las dos muestras de polifosfato de amonio podemos observar que hay grandes diferencias, esto se debe a que pese a ser el mismo producto, su porcentaje de solución varía, siendo el FR CROS 134 de una concentración mucho más elevada que la del FR CROS C-70, confirmado las indicaciones del fabricante.

4.8. Ensayos de reacción al fuego

Una vez completadas las impregnaciones de las soluciones en la madera el siguiente paso en la investigación consiste en la realización de los ensayos de reacción al fuego. En esta investigación se han planteado la realización de tres ensayos diferentes, que ya han sido realizados con anterioridad (Durán & Mur, 2012), (Revilla, 2015) en otras investigaciones similares y por tanto serán útiles para posteriormente poder ser comparados.

Los ensayos son:

- Ensayo de goteo (UNE 23725:1990)
- Ensayo del índice de oxígeno (L.O.I.) (UNE-EN ISO 4589- A1:2006)
- Ensayo del bunsen

4.8.1. Ensayo de goteo (UNE 23725:1990)

Este ensayo se realiza en los materiales de la construcción fusibles de cualquier tipo de espesor para clasificar su comportamiento frente al fuego.

Consiste en someter las muestras a una fuente de calor constante, emitida por un radiador, para provocar inflamaciones con los gases producidos de la degradación ya que en ningún momento la muestra y la fuente de calor se encuentran en contacto. El objetivo de este ensayo es determinar el tiempo que aparece la primera ignición y comprobar si el material tiene capacidad de extinguir la llama una vez se ha producido y si existe goteo de material durante la combustión. Por este motivo se evalúan el número de inflamaciones en un periodo determinado y controlar el goteo de las muestras, tanto inflamadas como no inflamadas.



Ilustración 25: Ensayo de goteo en laboratorio del fuego EPSEB; Fuente: Elaboración propia

El equipo necesario para este ensayo consiste en:

- Radiador de 500W de potencia con una superficie de 10cm de diámetro con un disco de cuarzo transparente. La superficie de radiación siempre se colocara a tres centímetros de la superficie de la muestra a ensayar. El radiador está sustentado por un eje vertical que permitirá rotar el radiador para retirarlo o acercarlo a las muestras durante el transcurso del ensayo.

- Soporte para las muestras de tipo anillo de 11cm de diámetro, sobre el cual se coloca una malla de tipo inoxidable para permitir el paso de las gotas en caso de haberlas. Este soporte está sustentado sobre una estructura y un pie metálico que le otorgan estabilidad.
- Recipiente relleno de algodón hidrófilo para la recepción de las gotas, en caso de que existan.
- Cabina accesible con puertas laterales para la colocación de las muestras.
- Extractor para evacuar los humos después de los ensayos, nunca se utilizará durante el ensayo.
- Cronómetro para calcular el tiempo

Para este ensayo se ha considerado conveniente la utilización de cuatro muestras impregnadas con Epsomita y Solubor, una muestra con polifosfato de Amonio y dos muestras blancas para poder comparar el comportamiento de las muestras de madera en cada caso.

El tiempo de duración del ensayo es de cinco minutos y el tiempo se inicia una vez colocamos el radiador sobre la muestra y dejamos que actúen. Cada vez que la muestra se inflame, se anotará el tiempo de ignición, a la vez que se realizará una cuenta de 3 segundos y pasaremos a retirar el radiador de la muestra hasta que esta se extinga, tiempo el cual volveremos a anotar para conocer la duración de la inflamación. Este proceso se repetirá durante el tiempo que dura en ensayo, para posteriormente analizar los datos obtenidos.

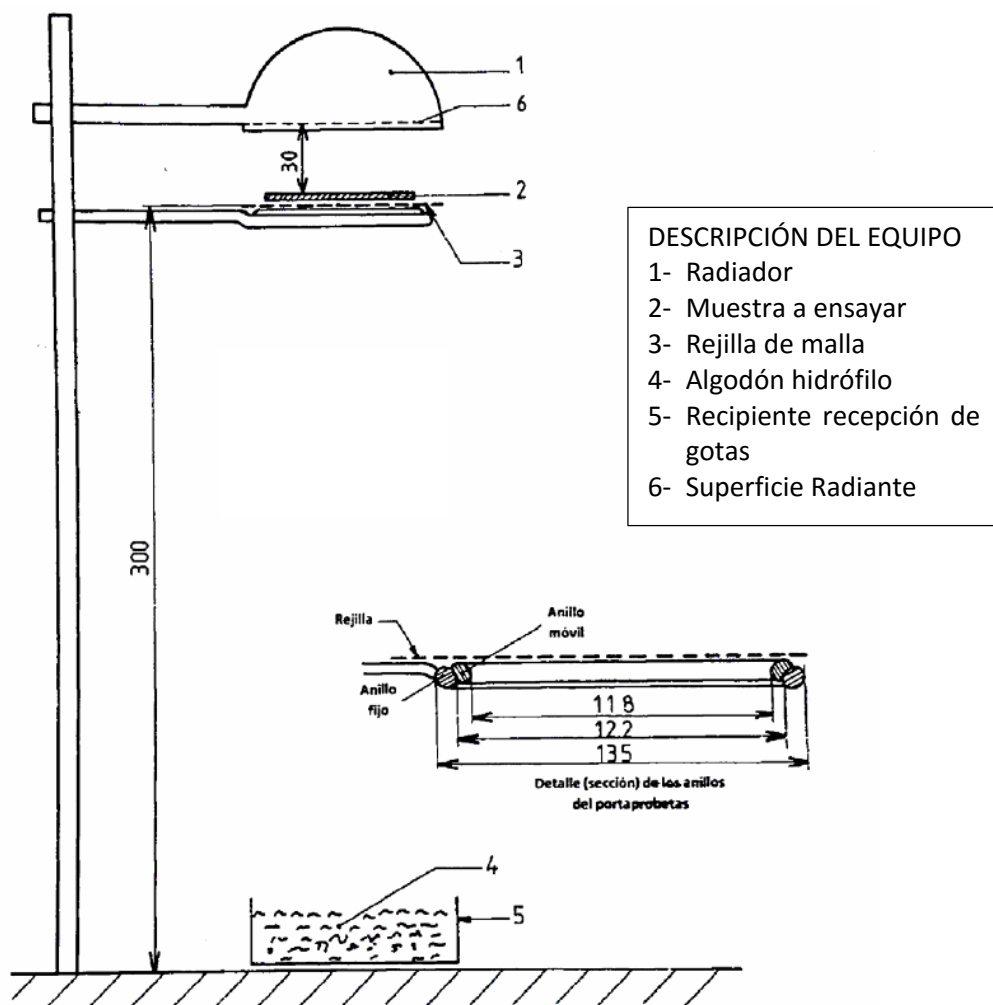


Ilustración 26: Esquema tipo del ensayo de goteo; Fuente: Rutland Plastics Limited. CO, UK



Ilustración 27: Ensayo de goteo en el radiador; Fuente: Elaboración propia



Ilustración 28: Muestras ensayadas en el ensayo de goteo; Fuente: Elaboración propia

4.8.2. Ensayo del índice de oxígeno (L.O.I.) (UNE-EN ISO 4589- A1:2006)

El ensayo del índice de oxígeno, también conocido como L.O.I. por sus siglas en inglés *Limiting Oxygen Index*, nos permite conocer cuál es el porcentaje de oxígeno mínimo que una pieza de medidas conocidas necesita para su combustión, según los criterios establecidos en la norma de ensayo (UNE-EN ISO 4589-A1:2006). Por tanto cuanto más elevado resulte su porcentaje de oxígeno, mejor será su comportamiento frente al fuego.

Para poder tener un orden de magnitud sobre su comportamiento hay que recordar que el nivel medio de oxígeno que tenemos en la tierra se sitúa en torno al 21%.

El equipo necesario para este ensayo consiste en:

- Recipiente de ensayo en dos partes, la mitad inferior es un soporte metálico que otorga rigidez al conjunto, distribuye la mezcla de oxígeno y sirve de soporte para la segunda mitad, que consiste en un vidrio resistente al calor de unos 45cm de altura y 9.5cm de diámetro.
- Eje central, con soporte para la correcta sujeción de las muestras. Este soporte mantiene las muestras en el centro de la estructura, garantizando que recibe el mismo porcentaje de oxígeno en todas las caras.
- Bombonas de gas nitrógeno y oxígeno
- Caudalímetro mezclador de gases para garantizar la correcta proporción de oxígeno en cada ensayo.
- Cronometro para cuantificar la duración del ensayo
- Flexómetro para medir la longitud carbonizada.



Ilustración 29: Muestras cortadas en tiras preparadas para realización del L.O.I.; Fuente: Elaboración propia

Para la realización de este ensayo se han tenido que realizar cortes sobre las muestras para poderlas ensayar. La elección del corte no es aleatoria ya que se ha elegido un corte tangencial para lograr mantener una impregnación lo más homogénea posible en la totalidad de la muestra. Esto nos ayudara a poder comparar las muestras entre sí, e incluso en obtener un comportamiento homogéneo durante el ensayo.

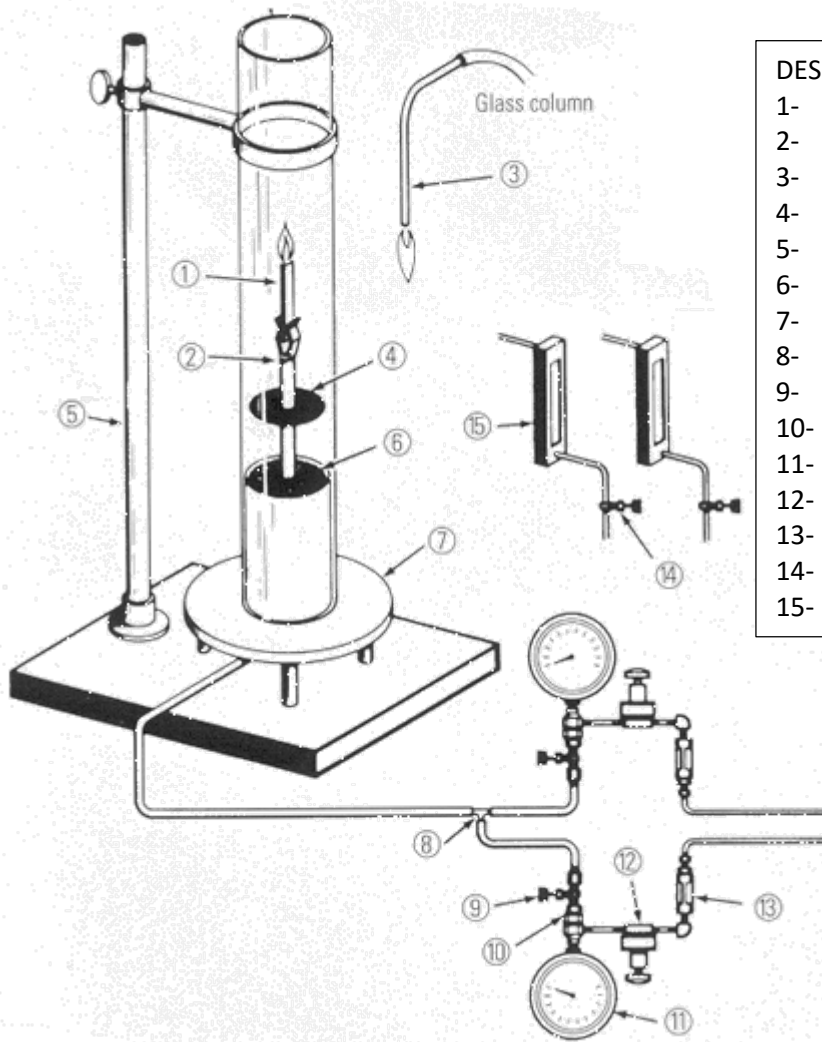
El fin del ensayo se basa en la comprobación de dos parámetros para determinar si la muestra quema o no. Se considerará que la muestra quema a un determinado porcentaje de oxígeno, si mantiene la combustión durante más de tres minutos o si la muestra se consume una longitud superior a 5cm durante esos 3 minutos. El efecto de afterglow, una vez la llama se ha apagado, se tratará como combustión ya que la muestra sigue consumiéndose y si supera los 3 minutos o los 5cm se considerará como que la muestra quema.

Cuando una muestra quema, se debe reducir el nivel de oxígeno de los sucesivos ensayos hasta encontrar el porcentaje de oxígeno mínimo en que la muestra no quema. El objetivo del ensayo es encontrar esa barrera entre que la muestra quema y no quema para poder determinar el valor de índice límite de oxígeno.

Como podemos observar en la ilustración 30, dependiendo del nivel de oxígeno la combustión de la pieza es completamente diferente y se ha ido reduciendo el nivel de oxígeno hasta encontrar su % óptimo.



Ilustración 30: Muestra 317 - P.Silvestre - L.O.I.



DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

- 1- Muestra a Ensayar
- 2- Soporte
- 3- Aporte de Llama
- 4- Malla anti-suciedad
- 5- Soporte (opcional)
- 6- Difusor de gas
- 7- Base metálica
- 8- Mezclador de gases
- 9- Válvula de cierre
- 10- Derivación manómetro
- 11- Manómetro
- 12- Regulador de presión
- 13- Filtro antihumedad
- 14- Válvula de agujas
- 15- Rotámetro de gases

Ilustración 31: Esquema tipo del ensayo del índice de oxígeno; Fuente: Rutland Plastics Limited. CO, UK

4.8.3. Ensayo con bunsen

La realización de este ensayo no se encuentra definida por la normativa UNE, aunque nos muestra información bastante importante y que puede ser útil a nivel comparativo. Este ensayo se basa en un ensayo utilizado en el artículo “Intumescent Thermoplastic Elastomer Fire Shield Material” de Ismart A. Abu-Isa (Abu-Isa, 2002).

Este ensayo busca monitorizar el comportamiento, de muestras de sección y peso conocidas, bajo la llama directa de un mechero bunsen a intensidad constante durante un periodo de tiempo establecido. Para la monitorización se utilizarán termopares colocados en diferentes posiciones para monitorizar la temperatura en las diferentes caras de la madera y así poder observar mediante gráficos el comportamiento de los diferentes tratamientos realizados en las muestras y observar puntos característicos.

El equipo necesario para este ensayo consiste en:

- Estructura de soporte para mantener las muestras a una altura elevada para poder colocar el bunsen en la parte posterior
- Un mechero bunsen regulable
- Un datalogger para registrar las temperaturas cada 10s
- Cuatro termopares
- Cronómetro

Para la realización del ensayo se colocarán las muestras sobre la estructura metálica. Y se colocarán termopares con la siguiente disposición:

- T1 – Zona Central Inferior (TCinf), para controlar la temperatura de la muestra en contacto directo con la llama.
- T2 – Zona Central Superior Izquierda (TCsuplq), para controlar la temperatura de la muestra en la zona central.
- T3 – Zona Central Superior Derecha (TCsupDcha), para controlar la temperatura de la muestra en la zona central.
- T4 – Zona Exterior Superior (TEsup), para controlar la temperatura en la zona más alejada de la llama.

Tanto el termopar T2 como T3 miden exactamente la misma medida, ya que se sitúan a pocos milímetros de diferencia, el objetivo de esta medida es encontrar la máxima precisión, y como veremos en el apartado de anexos hay diferencias sensibles entre las lecturas de los dos termopares, probablemente debidas a problemas de taraje o de mal estado de los mismos.

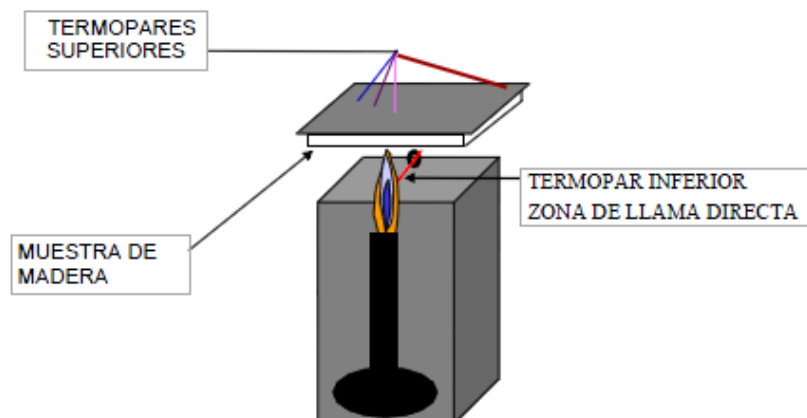


Ilustración 32: Esquema del ensayo del Bunsen; Fuente: (Abu-Isa, 2002)

Los criterios de realización del ensayo consisten en exponer las muestras a la llama directa del bunsen durante un período de 30 minutos y monitorizar el comportamiento mediante termopares. La altura de la llama deberá ser siempre la misma, 6cm de altura, medida que coincide con la altura de colocación de la muestra para que esté en contacto con la llama. Tanto al inicio como al final del ensayo se realizará un pesaje de las muestras.



Ilustración 34: Ensayo de llama directa con Bunsen;
Fuente: Elaboración propia

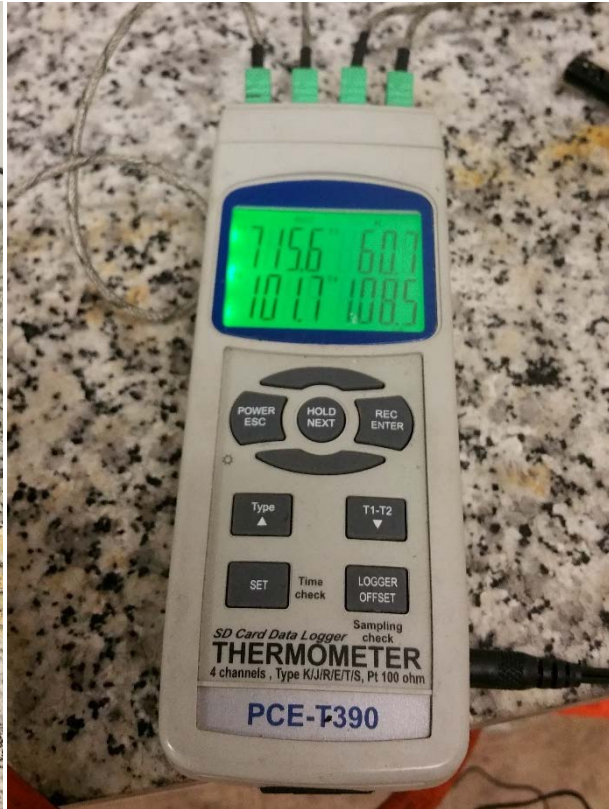


Ilustración 33: Datalogger registrando ensayo;
Fuente: Elaboración propia

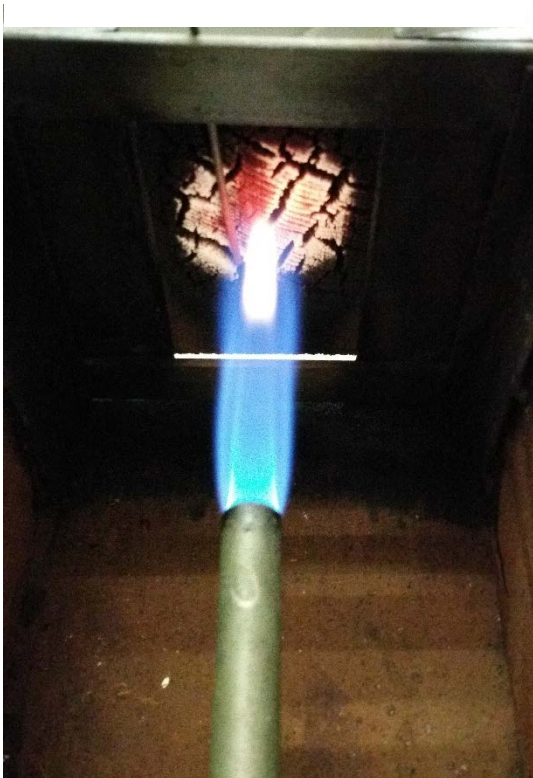


Ilustración 35: Muestra ensayada;
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 36: Parte inferior durante el ensayo;
Fuente: Elaboración propia

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez detallado todo el proceso realizado durante la fase experimental, llegamos al último punto y fin del proyecto, el análisis de los resultados. En este punto se tratarán de forma objetiva los resultados obtenidos para poder extraer conclusiones.

Dependiendo de cada ensayo realizado, se han obtenido diferentes valores que nos definirán el comportamiento de las muestras impregnadas con las diferentes soluciones, epsomita, Solubor y polifosfato de amonio. Siguiendo el mismo esquema que en la descripción de ensayos, los resultados se van a dividir en:

- Ensayo de goteo
- Ensayo del índice de oxígeno (L.O.I.)
- Ensayo del bunsen

5.1. Ensayo de goteo

En este ensayo, como hemos comentado en su descripción, se tienen en cuenta varios parámetros a estudio. Pese a que las impregnaciones se han realizado conjuntamente, se han separado los ensayos según la tipología de madera para poder observar si se aprecian diferencias significativas entre ellas.

En este análisis del ensayo de goteo, se han considerado relevantes el número medio de igniciones, el tiempo medio de la primera ignición (T_{m0} Ignición), la duración medias de la llama (D_m llama) siempre en valores medios para tener en cuenta todas las muestras ensayadas y el porcentaje de pérdida de peso de la muestra tras la realización del ensayo.

Lo que se busca con este ensayo es que las muestras no se inflamen y en el caso de hacerlo, que estas inflamaciones sean de la menor duración posible. Se considerará un comportamiento más eficiente en una muestra con muchas inflamaciones, pero de una duración corta, que una muestra con pocas inflamaciones, pero de una duración larga.

Es importante para los ensayos de reacción de materiales, que estos no contribuyan a la propagación de la llama, de ahí a que cuando haya una ignición de la muestra es importante que se apague rápidamente. Esto demostrará que la contribución de la madera al fuego es baja, ya que al retirar la fuente de ignición automáticamente el fuego se extingue.

Para obtener un resultado que pueda ser comparable se han realizado ensayos con muestras sin tratar sobre las cuales se irán comparando la eficacia de las soluciones utilizadas.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 5.1: Resumen ensayo de goteo en muestras Pino Laricio; Fuente: Elaboración propia

TRATAMIENTO	Muestras ensayadas	% Impreg.	Nº Medio Igniciones	T_{m0} Ignición (s)	D_m Llama (s)	% Pérdida peso
Sin tratar	2	0	8	28	31	2,7
Epsomita (25%)	2	19,8	18	37	12	5,5
Solubor (25%)	2	21,6	27	57	5	9,6
APP FR CROS 134	1	30,4	0	0	0	8,4

Como podemos observar en la tabla 5.1, las muestras de pino Laricio que han sido impregnadas con Epsomita han aumentado en cuanto al número de igniciones un 125% respecto a la madera sin tratar, el tiempo de la ignición inicial se ha retrasado un 32%, la duración media de la llama se ha reducido un 60% y la pérdida de peso de la muestra a aumentado un 103%

Para las muestras impregnadas en Solubor las igniciones han aumentado un 237% pasando de 8 a 27, el tiempo de ignición inicial se ha retrasado un 103% aumentando más del doble que una madera sin tratar, la duración media de la llama se ha reducido un 84% y la pérdida de peso a aumentado en un 255%.

En la muestra tratada con polifosfato de amonio FR CROS 134, no se ha producido ninguna inflamación, siendo la muestra que mejor se ha comportado de las tres analizadas en cuanto a inflamabilidad gracias a la capa de carbonización creada. En cuanto a la pérdida de peso, ha aumentado un 211%.

Tabla 5.2: Resumen ensayo de goteo en muestras de Pino Silvestre

TRATAMIENTO	Muestras ensayadas	% Impreg.	Nº Medio Igniciones	T _{mo} Ignición (s)	D _m Llama (s)	% Pérdida peso
Sin tratar	2	0	3	21	86	1,3
Epsomita (25%)	2	21,5	16	26	16	5,3
Solubor (25%)	2	26,6	30	37	5	7,0
APP FR CROS 134	1	33,1	0	0	0	10,5

Las muestras de pino Silvestre, como podemos observar en la tabla 5.2, cuando no han sido tratadas se comportan de una forma muy diferente cuando se le aplican las impregnaciones. Las muestras impregnadas con Epsomita aumentan un 430% el número de igniciones, pasando de 3 a 16, un aumento del 24% del tiempo de ignición inicial, una reducción del 81% de la duración media de la llama y un aumento de la pérdida de peso del 307%

Para las muestras impregnadas con Solubor las igniciones han aumentado un 900% pasando de 3 a 30, el tiempo de la ignición inicial se ha retrasado un 76%, una duración media de la llama se ha reducido en un 94% y un aumento de la pérdida de peso del 438%

Para el polifosfato de amonio FR CROS 134, al igual que en las muestras de pino Laricio, no se ha producido ninguna inflamación que se pueda valorar. Lo que junto con los datos de las impregnaciones podemos observar como las prestaciones son muy superiores al resto de productos. En cuanto a la pérdida de peso, ha aumentado un 707% respecto a la muestra sin tratar.

Los resultados analizados demuestran un buen comportamiento del polifosfato de amonio gracias a la capa de carbonizada que crea, la cual hace que no haya ninguna ignición valorable y únicamente aparecen ráfagas que combustionan súbitamente los gases que desprende la muestra, estas llamas parece que flotan sobre la madera ya que nunca llegan a estar en contacto directo. Por otro lado también encontramos un inconveniente durante la realización de los ensayos. Las muestras de polifosfato de amonio desprendían gran cantidad de humos negros de tipo denso, las cuales lo penalizan respecto al resto de productos analizados, donde la cantidad de humos son de menor cantidad, menos densos y de una tonalidad menos opaca y blanquecina. En ninguna de las muestras ha habido goteo de ningún tipo y cómo podemos observar en las tablas no hay una gran diferencia entre las muestras de pino Laricio y Silvestre.



Ilustración 37: Muestra 216 P.Silvestre (sin tratar), Muestra 108 P. Laricio (Polifosfato); Fuente: Elaboración propia

Otro dato que puede parecer extraño es la gran diferencia que existe entre las muestras sin tratar y las que han sido impregnadas en cuanto a la pérdida de peso. En las muestras sin tratar apenas hay una pérdida de peso entre el 1-3% mientras que las impregnadas oscilan entre el 5-10%. Este fenómeno se puede explicar teniendo en cuenta diversos factores. Si observamos la duración de las igniciones, se aprecia que estas son mucho más prolongadas debido a que no hay ningún producto que las extinga. Este fenómeno, a primera vista, puede parecer que afectaría a las muestras con un incremento de la pérdida de peso, pero nada más lejos de la realidad, las igniciones largas en realidad se producen con una llama intensa en los primeros instantes, pero se reduce rápidamente, quedando una llama muy pequeña que quema durante un periodo muy prolongado, de ahí que haya una pérdida de peso relativamente inferior al resto de las muestras. Por otro lado también influye que las muestras con retardantes de llama se encuentran sometidas durante un periodo de tiempo más grande bajo la acción de la fuente de calor y por tanto se descomponen más productos, debido a la pirólisis. También parte del retardante de llama que va actuando, dependiendo de su mecanismo actuador (liberando agua, creando una capa de protección, etc.), también aligera las muestras.



Ilustración 38: Muestra 408 P.Laricio (Epsomita), Muestra 315 P.Silvestre (Solubor)

Tanto en la ilustración 36 como la 37 observamos otro rasgo característico que las tablas no reflejan. Si observamos las imágenes detenidamente podemos encontrar un patrón común en tres de las cuatro muestras. Siempre queman, en mayor medida, por la zona del duramen. Esto se debe a que la impregnación es siempre mayor en la zona de la albura que en el duramen, por tanto las muestras combustionan por la zona con menos producto impregnado.

5.2. Ensayo del índice de oxígeno (L.O.I.)

Para la realización del ensayo del índice de oxígeno se ha considerado el uso de una sola muestra por cada tipo de solución y especie, por tanto tendremos ocho muestras a ensayar. Como vimos en la descripción del ensayo, su objetivo es conocer cuál es porcentaje de oxígeno mínimo necesitan las muestras para quemar. Cuanto más elevado sea este porcentaje, más eficiente será su comportamiento en cuanto a la reacción al fuego.

Como valor de medida, al igual que en los otros ensayos, utilizaremos muestras sin tratar para comparar con las muestras impregnadas. Otro marcador interesante es tener en cuenta el porcentaje de oxígeno que tenemos en la atmosfera, que es del 21%, para intuir si su comportamiento se encuentra por encima o por debajo de esta marca.

Tabla.5.3: Resumen ensayo Índice de Oxígeno

ESPECIE	% OXÍGENO			
	Sin tratar	Epsomita (25%)	Solubor (25%)	APP FR CROS 134 (63%)
Pino Silvestre	19-20	31-32	31-32	61-62
Pino Laricio	19-20	28-29	25-26	58-59

Como podemos observar, las muestras sin tratar se encuentran entorno al 19-20%, mientras que las muestras tratadas se encuentran todas por encima del 25%. La epsomita tiene un comportamiento muy similar al Solubor, quedando incluso ligeramente por encima (3%) en las muestras de pino Laricio. Mención aparte el polifosfato de amonio, que como podemos observar su comportamiento es excelente si lo comparamos con los otros dos productos llegando a doblar sus porcentajes.



Ilustración 39: Izq. Muestra 319 P.Laricio (Sin tratar); Dcha. 317 P.Silvestre (Epsomita); Fuente: Elaboración propia

Otra tendencia, que muestran las tablas, es la diferencia sensible entre las muestras de pino Laricio y Silvestre. Si bien cuando estas están sin tratar se comportan prácticamente de la misma forma, ambas muestras están entre el 19-20%, cuando realizamos las impregnaciones podemos observar como las muestras de pino Silvestre logran obtener mejores resultados, varios puntos por encima, comparados con las muestras de pino Laricio. Esto se debe a que las muestras de pino Laricio son más densas, pesan más, que las muestras de pino Silvestre. Esta diferencia de densidades hace que sea más fácil impregnarse en la madera menos densa ya que en su estructura interna se encuentran vasos más grandes por los que la solución penetra. En cambio en las muestras de pino Laricio, donde su estructura interna tiene vasos más pequeños la solución tiene menos capacidad de penetrar.



Ilustración 40: Ensayo positivo de L.O.I. con combustión total de la muestra; Fuente: Elaboración propia

Si analizamos individualmente por cada especie y solución podemos observar como el pino Silvestre tanto con la solución de Epsomita como con Solubor los resultados son idénticos, ambos tienen una mejora del 60% respecto de las muestras sin tratar. Las muestras impregnadas con polifosfato quedan fuera de una escala comparativa ya que obtienen unos valores de mejora del 210%. Esto es debido a que la solución utilizada penetra alrededor del 63% mientras que el resto de productos utilizados no alcanza más del 25-26%.

En cambio en las muestras de pino Laricio podemos observar que la Epsomita mejora un 45% respecto a las muestras sin tratar mientras que el Solubor se queda en un 30%. Esta diferencia puede deberse a varios factores como las características propias de la madera, que pueden hacer variar sustancialmente los resultados debido a su anisotropía. Aunque en este ensayo hay que tener en cuenta otras causas externas, ya que aunque intentemos realizar los cortes para que las fibras impregnadas sean lo más homogéneas posibles, las capas más externas de la madera, por ejemplo el primer corte, siempre van a estar más impregnadas que la última lámina que se corte. De hecho se han descartado en todos los ensayos del L.O.I. las primeras capas para evitar incrementar estos errores e intentar obtener unos resultados con las máximas garantías posibles.

5.3. Ensayo del Bunsen

Durante la realización del ensayo del bunsen se han registrado las diferentes temperaturas tanto en la parte inferior de la pieza (contacto directo con la llama) y en la parte superior (dos termopares centrales y uno en el extremo). Para simplificar los resultados obtenidos vamos a analizar las temperaturas en base al termopar superior central izquierdo y el central inferior, así podremos comparar la temperatura entre la parte inferior y la superior de las muestras.

Seleccionaremos las muestras con los porcentajes más próximos de cada tipo de solución y especie intentando que no se complique la comprensión del gráfico, ya que si se superponen todas las muestras analizadas puede resultar incomprensible. Al igual que en el resto de ensayos también se utilizará una muestra sin tratar para comparar los resultados.

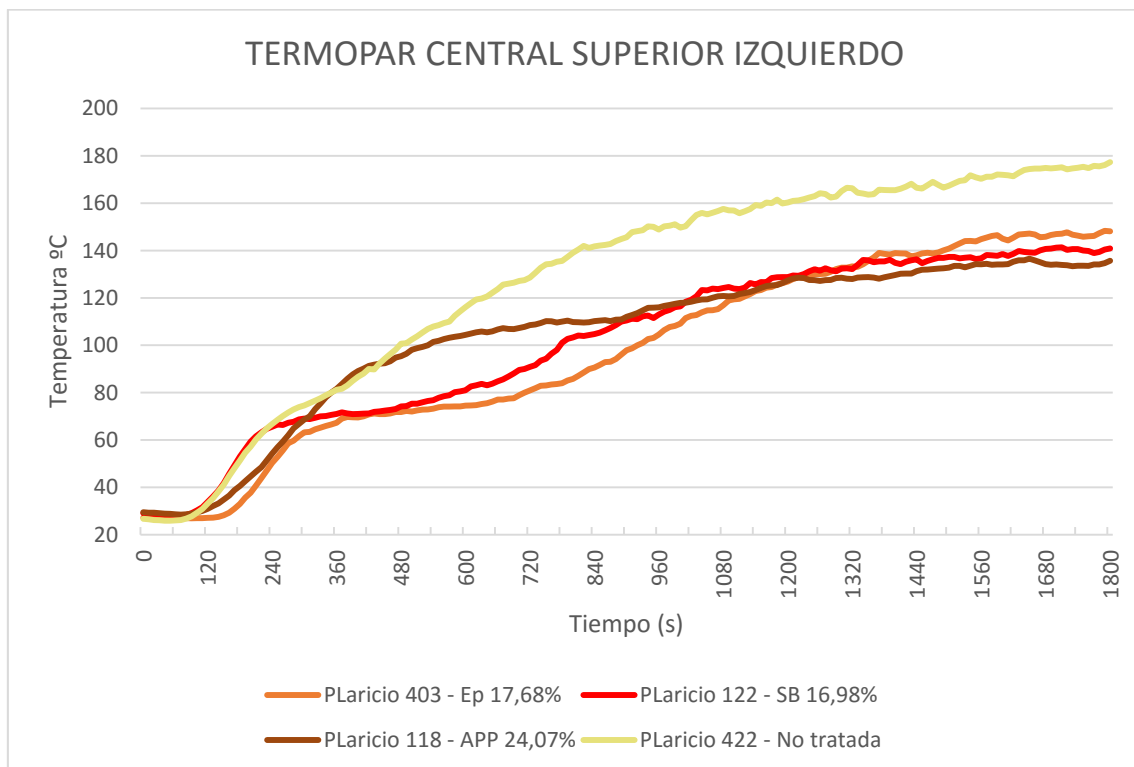


Ilustración 41: Evolución TC_{suplq} en muestras de Pino Laricio; Fuente: Elaboración propia

En el gráfico de la ilustración 41, con muestras de pino Laricio, observamos como las muestras impregnadas tanto con Epsomita como con Solubor tienen un comportamiento bastante similar aunque con ciertos matices debidos a su composición. La Epsomita libera agua a partir de los 40°C, de ahí a que su curva inicial se prolongue más que en el resto de productos, logrando suavizar su incremento de temperatura aunque finalmente queda por encima del resto de soluciones. El Solubor en cambio inicialmente trabaja como si la madera no estuviese tratada, aunque a partir de los tres minutos su curva se suaviza, entorno a los 70°C, y su curva se suaviza para llegar a una temperatura inferior a los 30min que la Epsomita. El Polifosfato de amonio en cambio en los primeros minutos se comporta prácticamente igual que la Epsomita pero su mecanismo de acción, basado en crear una capa de carbonización, no resulta efectiva hasta que alcanza los 100°C cuando reduce de forma considerable, después de la madera sin tratar, es la muestra que más rápido llega a los 100°C, aunque finalmente su curva de temperaturas es la

que menor incremento presenta, quedándose en los 133°C mientras que la Epsomita llega a los 150°C y el Solubor a los 140°C.

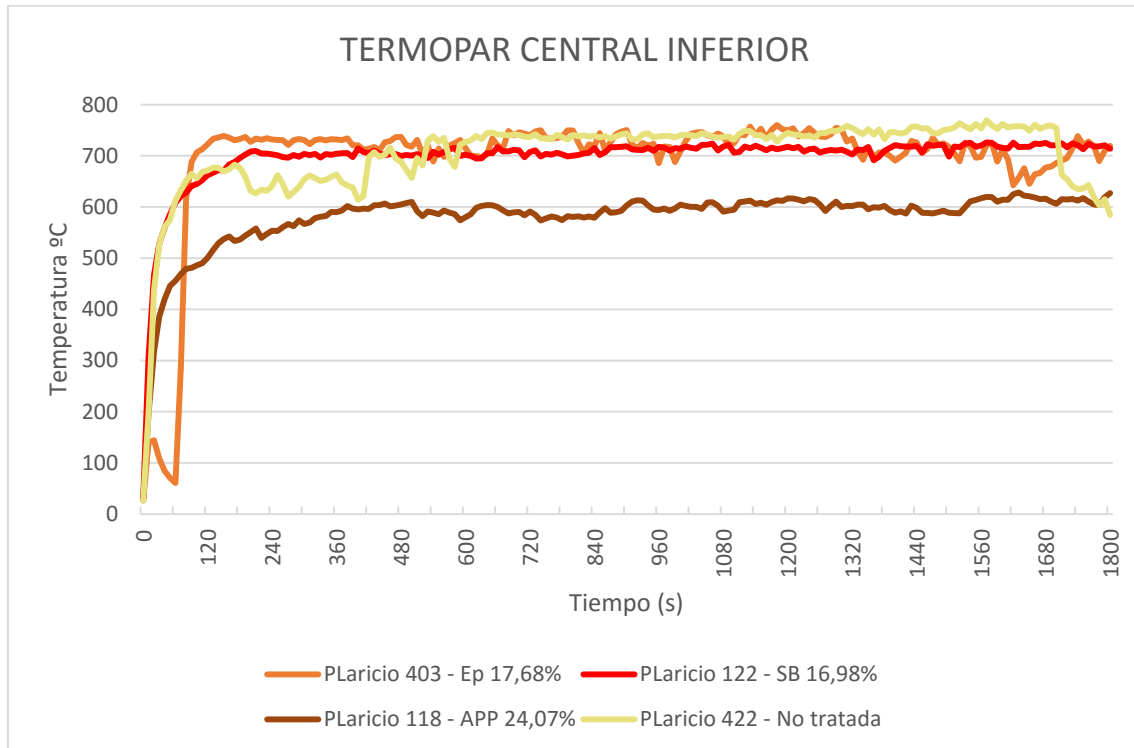


Ilustración 42: Evolución TCinf en muestras de Pino Laricio; Fuente: Elaboración propia

Si observamos las temperaturas en el termopar situado en la cara expuesta a la llama podemos observar algunas variaciones. Aunque la temperatura de la llama sea siempre la misma, observamos como por ejemplo el polifosfato de amonio forma su capa de espuma carbonizada y en menos de 4 minutos ya tiene una temperatura estable entorno a los 600°C, la más baja de todas las soluciones utilizadas debido a que el termopar queda envuelto en esa capa de protección quedando aislado de la llama directa. En cambio la epsomita, el Solubor y la madera sin tratar tienen una gran similitud en sus curvas de temperatura alcanzando los 700-750°C.

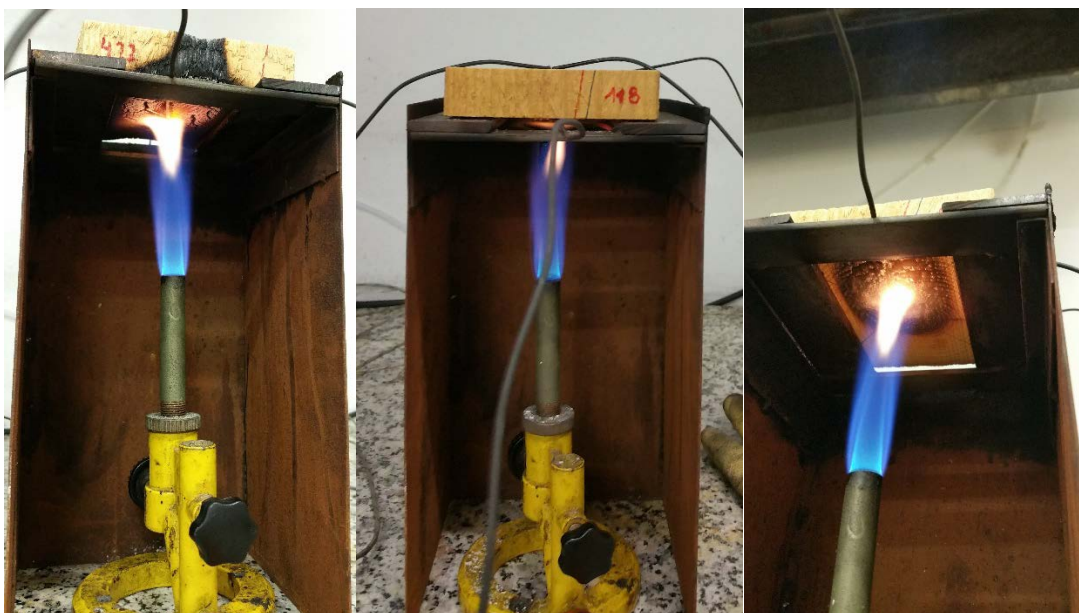


Ilustración 43: Izqda. Muestra 422 P.Laricio (sin tratar); Centro y Derecha. Muestra 118 PLaricio (App); Fuente: Elaboración propia

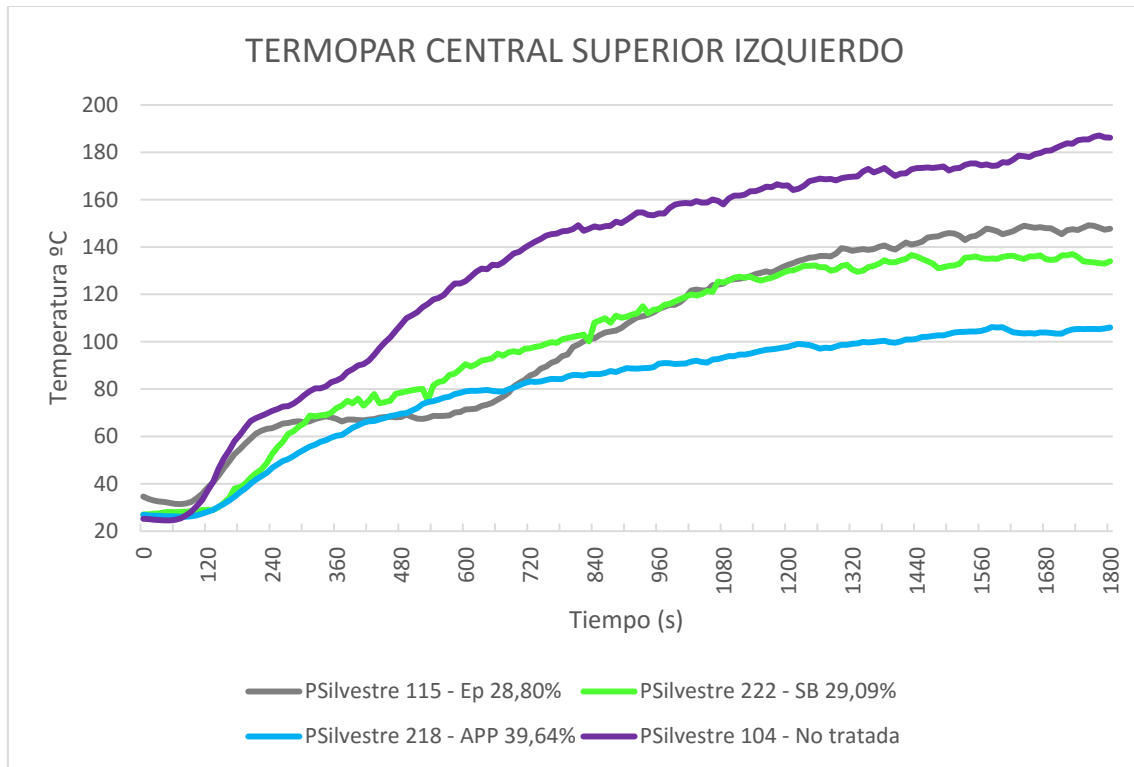


Ilustración 44: Evolución TCsuplq en muestras de Pino Silvestre; Fuente: Elaboración propia

En las muestras de pino Silvestre (Ilustración 44), podemos encontrar un patrón de comportamiento similar en el caso de la Epsomita, con una estabilidad de temperaturas entorno a los 70°C, gracias a la liberación de su agua de composición, manteniéndose durante 14 minutos por debajo de los 100°C, aunque al igual que en las muestras de pino Laricio es la que más temperatura alcanza hasta llegar a los 150°C.

La muestra impregnada en Solubor presenta un calentamiento progresivo en los primeros 5 minutos y posteriormente podemos observar una curva continua con una pendiente bastante plana, quedándose en una temperatura máxima entorno a los 135°C.

En la muestra impregnada con polifosfato de amonio sí que podemos observar un comportamiento diferencial respecto al pino Laricio. Si el primero llegaba a los 100°C en apenas 8 minutos, la muestra de pino Silvestre apenas logra rebasarlos durante todo el ensayo, aunque si nos fijamos en la cantidad impregnada es sensiblemente superior en la muestra de pino Silvestre, pudiendo influir en la curva de temperaturas.



Ilustración 45: Muestra 218 P.Laricio (App) en ensayo del bunsen y después de realizarlo; Fuente: Elaboración propia

El comportamiento de la muestra sin tratar se encuentra muy por encima de todas las muestras tratadas, llegando a lograr una temperatura de 185°C, comparadas con las impregnadas con

polifosfato de amonio que alcanzan una temperatura de 105°C, 80°C de diferencia, un 43% menos.

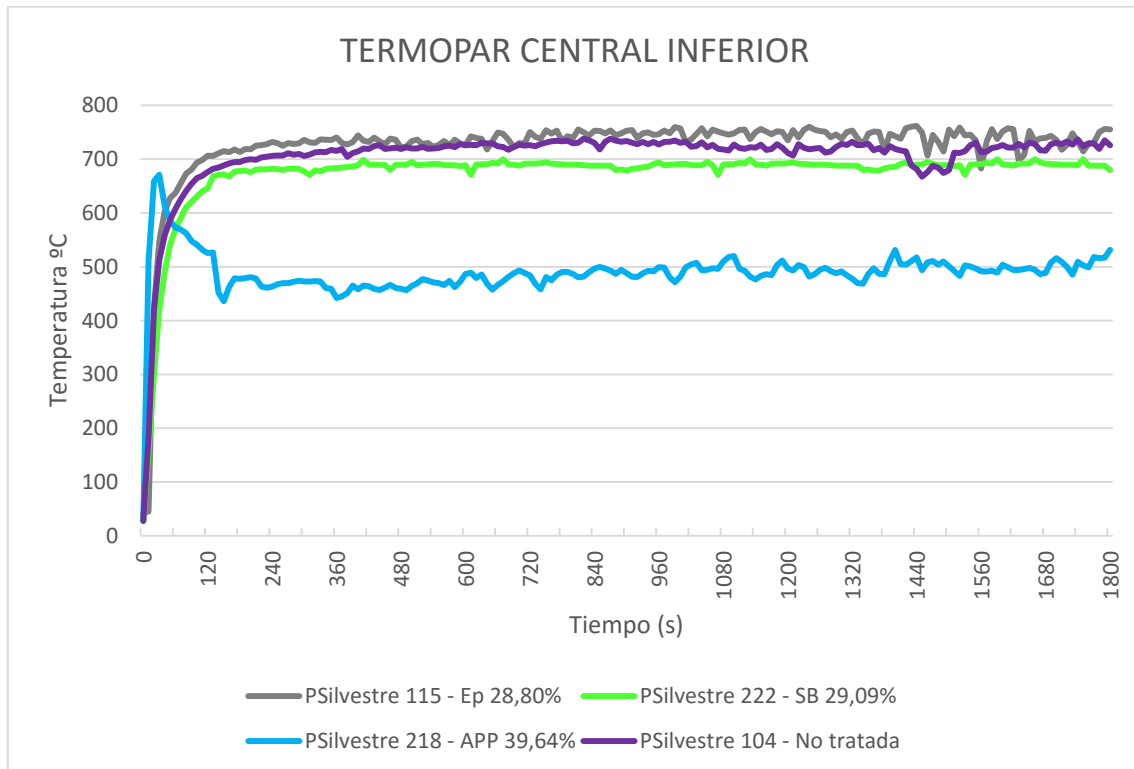


Ilustración 46: Evolución TCinf en muestras de Pino Silvestre; Fuente: Elaboración propia

Analizando las temperaturas en el termopar situado en la parte inferior de la muestra podemos observar como el polifosfato de amonio se mueve en la zona de los 500°C de temperatura, aunque inicialmente experimento un pico máximo de 680°C, hasta formar la capa de protección, corroborando el comportamiento comentado en anteriormente.

Como podemos observar en la ilustración 46, tanto la epsomita, el Solubor, y las maderas sin tratar tienen una curva de ascenso y estabilización prácticamente con las mismas pendientes. Las diferencias en el rango de temperaturas pueden deberse a la colocación de los termopares o de la llama, al no quedar siempre colocados en el mismo lugar puede inducir a pequeñas variaciones de temperaturas.

Una vez comparados los resultados según la especie de madera, también resulta interesante poder comparar las muestras según el tipo de solución utilizada para poder observar cómo se comportan las muestras dependiendo de la tipología de especie sobre la que se impregnan.

Para realizarlo utilizaremos las mismas graficas pero divididas en tres gráficos donde nos mostrarán por separado las muestras impregnadas con Epsomita, las impregnadas con Solubor y las de Polifosfato de amonio y con todas las muestras ensayadas de cada solución.

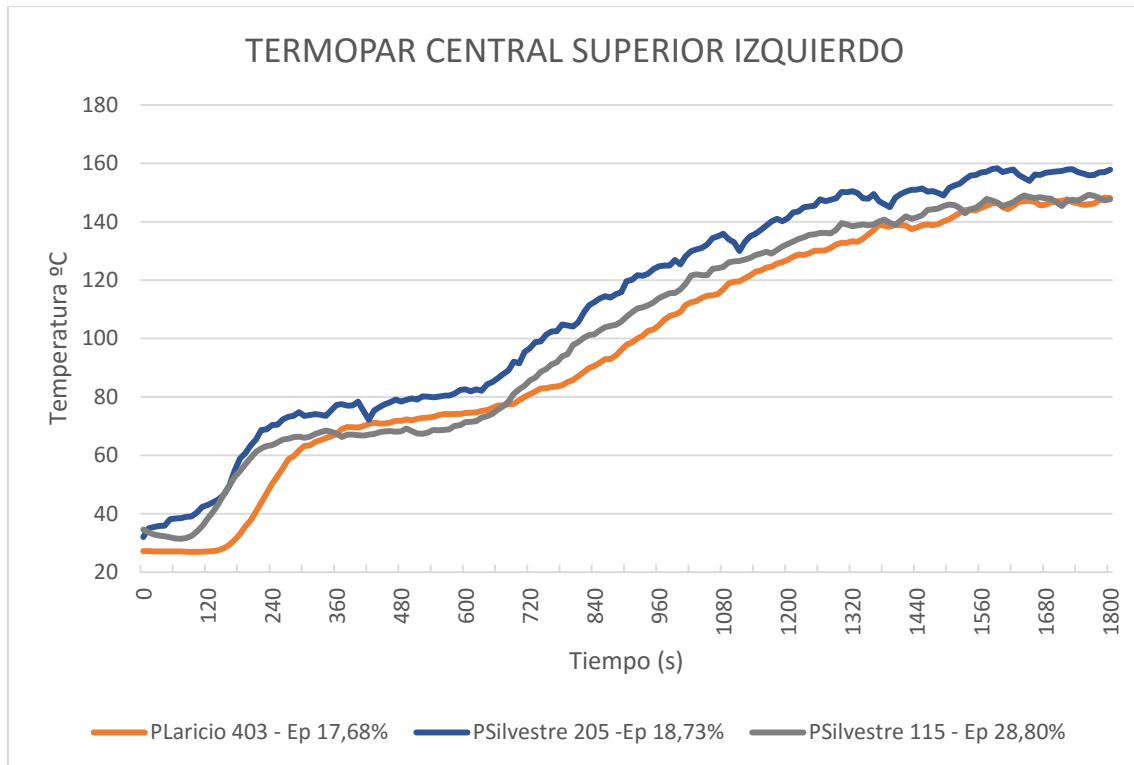


Ilustración 47: Evolución TCsuplqz en muestras con Epsomita; Fuente: Elaboración propia

Como podemos observar en la gráfica las tres muestras tienen un comportamiento muy similar, las únicas condiciones que lo hacen variar son la diferencia en el nivel de impregnación y la especie de madera. Las muestras de pino silvestre tienen una curva muy similar aunque desplazada una de la otra a causa del nivel Epsomita que en uno es del 18% y el otro del 28%. En cambio la muestra de pino Laricio logra un desfase inicial más prolongado para acabar llegando a la misma temperatura que la muestra de pino silvestre con un 10% más de epsomita. Aunque pueda parecer extraño que una muestra con un 10% más de producto llegue a la misma temperatura, hay que recordar que se trata de dos especies diferentes, con densidades diferentes y con una estructura interna que puede variar. Con un análisis más profundo, y pudiendo ensayar más muestras se podría tener una estadística con mayor precisión.

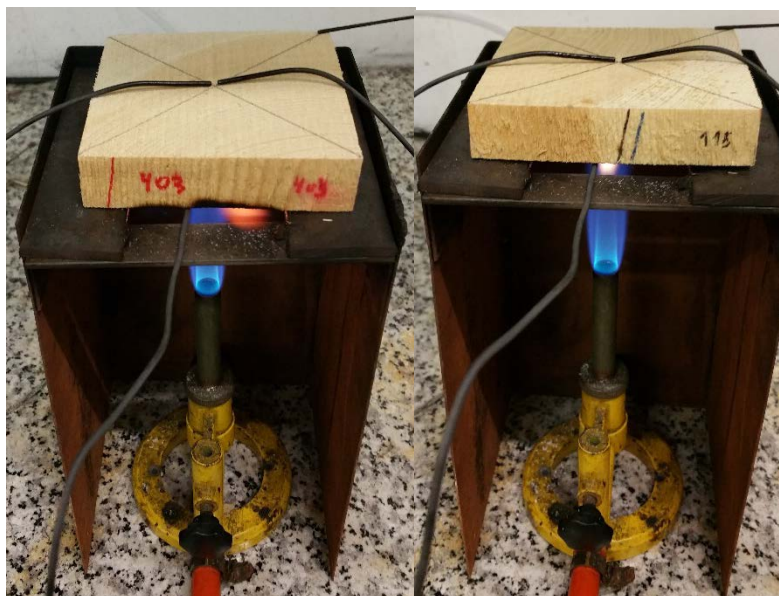


Ilustración 48: Muestra 403 P.Laricio (Ep 17,68%); Muestra 115 P.Silvestre (28,80%); Fuente: Elaboración propia

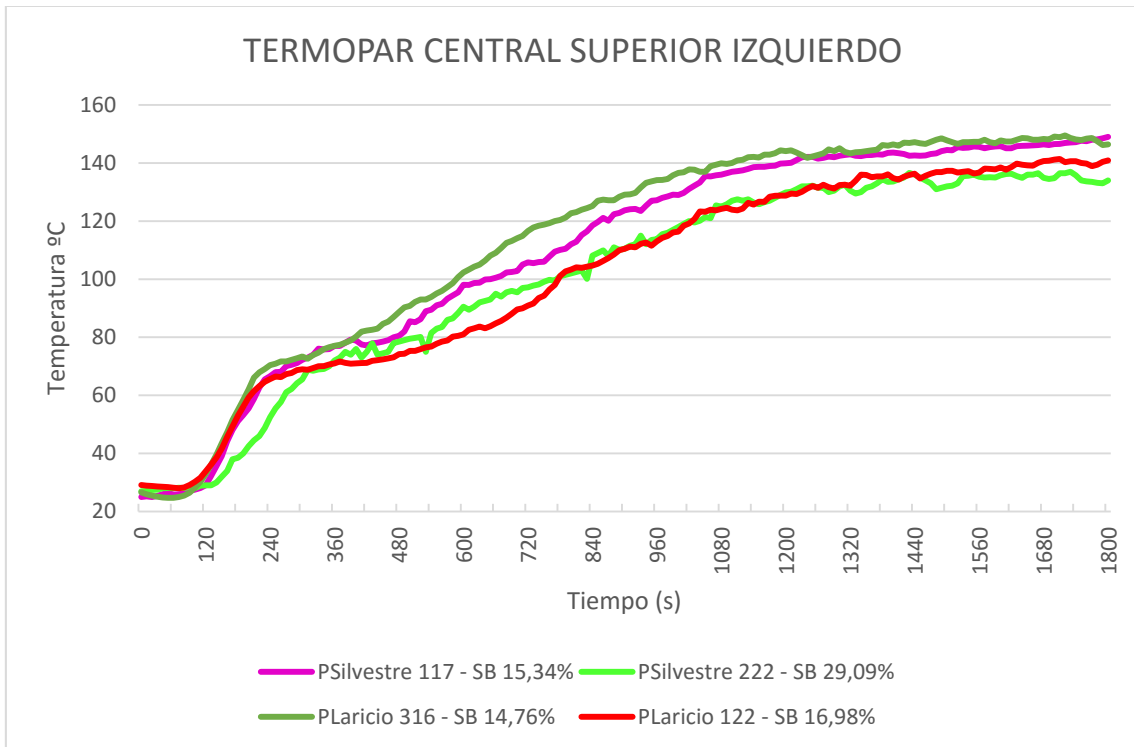


Ilustración 49: Evolución TCsuplqz en muestras con Solubor; Fuente: Elaboración propia

Como podemos observar las diferencias entre ambas especies son mínimas. Todas empiezan con una fuerte subida de temperatura en los 5 minutos primeros, para realizar posteriormente un ascenso prolongado y bastante homogéneo, donde las diferencias las marcan el nivel de impregnación y la especie de la madera. Llama la atención que con la pequeña diferencia a nivel de impregnación de las muestras de pino Laricio ambas se sitúen en los extremos por arriba y por abajo. En cambio las muestras de pino Silvestre que tienen alrededor de un 15% de diferencia en cuanto a nivel de impregnación no sea mayor su diferencia de temperaturas.

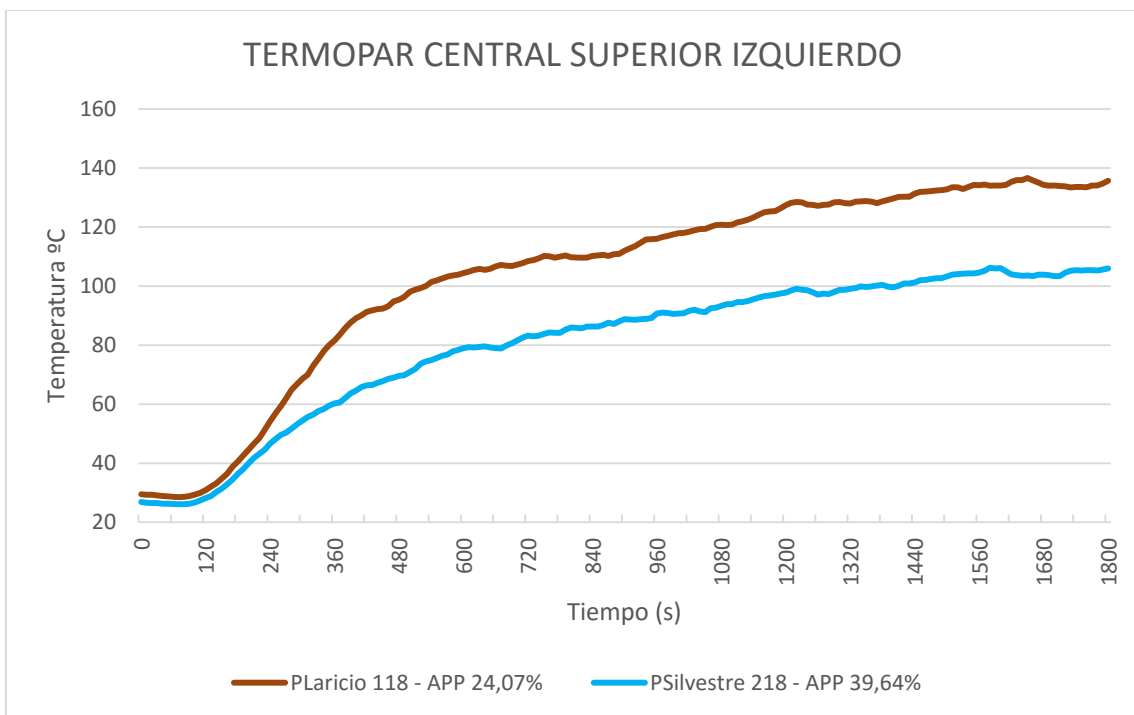


Ilustración 50: Evolución TCsuplqz en muestras con Polifosfato de amonio; Fuente: Elaboración propia

Las muestras de polifosfato de amonio han logrado mantener una temperatura por debajo del resto de muestras ensayadas, gracias a su capa de espuma carbonizada. Aunque si los comparamos con la Epsomita, no presentan las zonas planas, correspondientes a la liberación del agua, que logran retrasar el incremento de temperaturas en las primeras fases del ensayo. Cabe recordar que no todos los datos del polifosfato han sido satisfactorios ya que la gran presencia de humos negros y densos. Debido a la falta de solución se han podido ensayar unas pocas muestras, aunque como se observa las temperaturas máximas alcanzadas siempre han sido menores que en el resto de productos.

5.4. Comparación de resultados con otros estudios sobre la Epsomita

Durante el proceso de reflexión y estructuración del proyecto uno de los puntos interesantes que se definieron fue la posibilidad de realizar una pequeña comparativa o correlación entre las líneas de investigación ya desarrolladas en otros proyectos para poder obtener una información más exacta y amplia del comportamiento de las maderas ensayadas. Esto puede resultar útil ya que de otra manera sería imposible de realizar un estudio tan amplio con un margen tan escaso de tiempo.

El proyecto realizado por **Carmen Isábal Revilla** (Revilla, 2015), citada en varias partes durante el transcurso del proyecto, trabajaba con una solución de Epsomita entorno al 50%, punto de saturación. De su estudio y conclusiones se desprende un buen comportamiento de la Epsomita durante la realización de los ensayos. El problema es la gran cantidad de producto necesaria para lograr esta impregnación tan elevada.

Por tanto uno de los objetivos era comprobar si el comportamiento de la Epsomita variaba en exceso si se reducía su cantidad. A continuación se adjunta un gráfico de la temperatura en el termopar superior de las muestras del ensayo Bunsen para realizar una comparación.

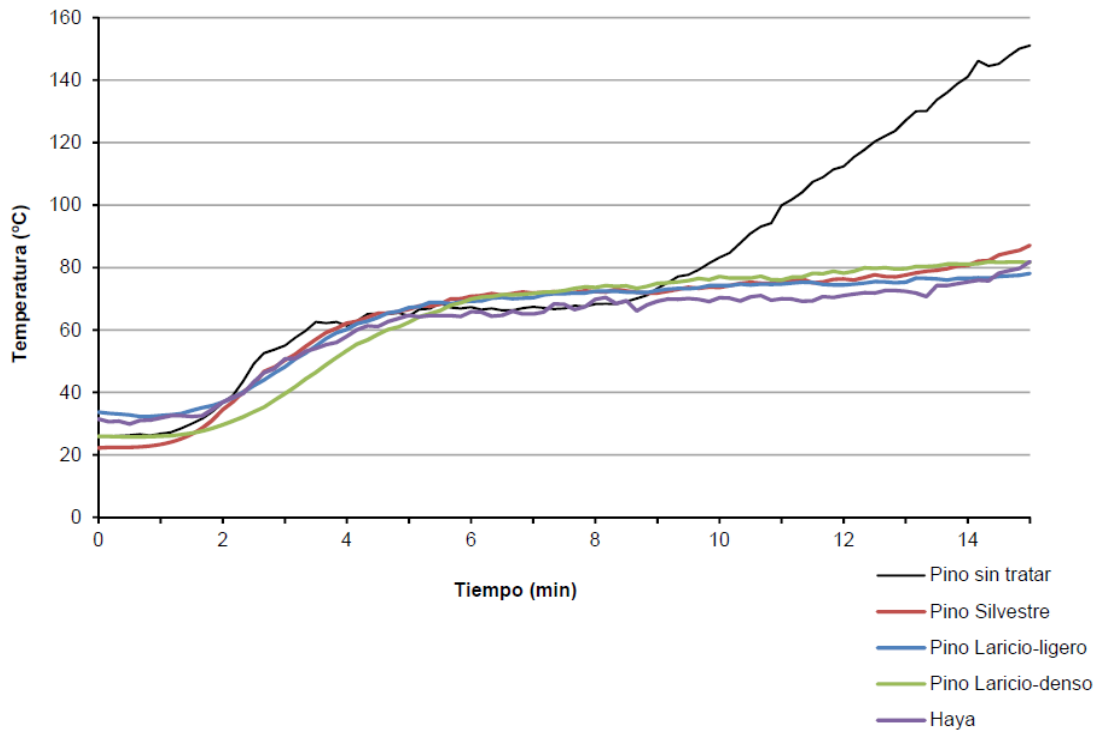


Ilustración 51: Evolución de la Tª en el termopar superior en muestras de Epsomita (53% de concentración); Fuente: (Revilla, 2015)

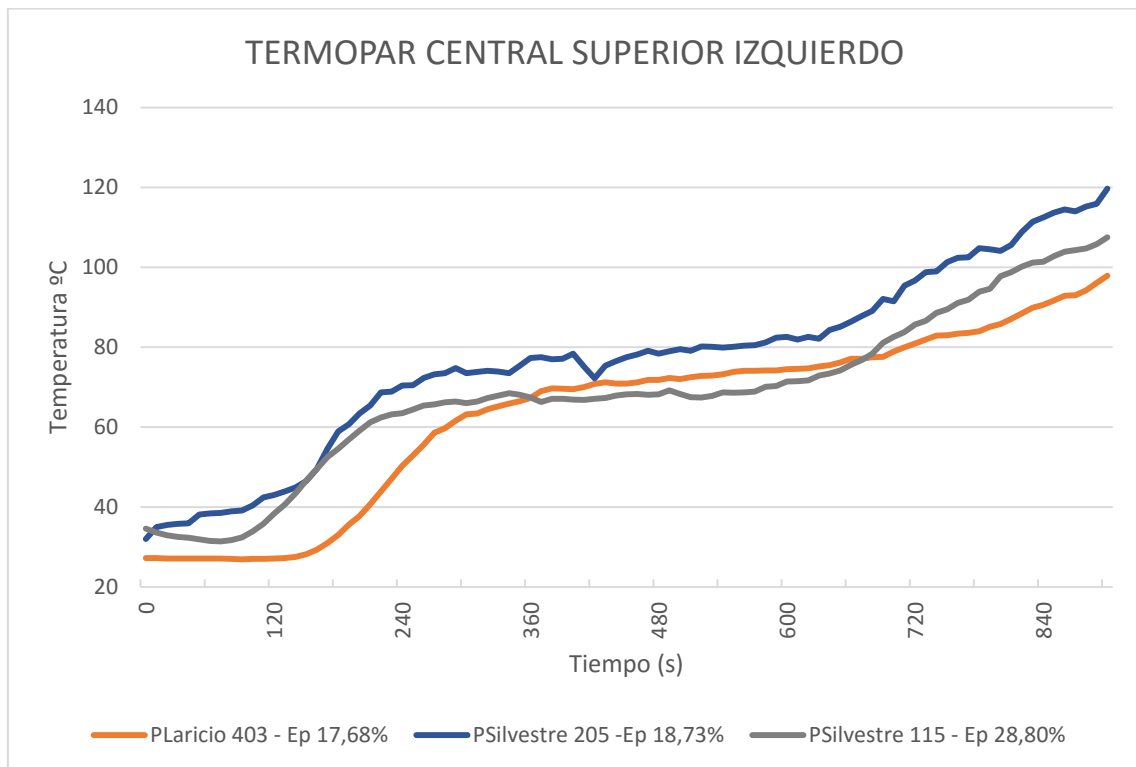


Ilustración 52: Evolución TCSupIzq en muestras con Epsomita; Elaboración propia

Como podemos observar en el ensayo realizado en el proyecto anterior tenía una duración de 15 minutos, por tanto se ha considerado evaluar únicamente el comportamiento para esa fracción de tiempo.

De la comparación de las muestras podemos obtener varias conclusiones, las muestras de pino Laricio tienen un desfase más pronunciado en la subida de temperatura, esto se debe a su densidad, ya que gracias a ella el flujo de calor tarda más en llegar a la cara superior. Ambas gráficas lo corroboran. Por otro lado la diferencia entre las cantidades impregnadas no son apreciables en los primeros 10 minutos del ensayo, aunque a partir de ahí en las muestras ensayadas en nuestro proyecto podemos apreciar como la curva de temperaturas empieza a aumentar, en cambio en el estudio realizado por Carmen Isábal, esa curva tiene una progresión con una pendiente prácticamente plana hasta el final del ensayo. Esto es debido al mecanismo de acción de la epsomita, como ya hemos comentado anteriormente, la epsomita libera agua diluyendo los gases combustibles, por tanto, al tener un nivel de impregnación más elevado, es lógico que la curva sea más suave. Hubiese sido interesante realizar un ensayo de una duración más elevada para poder unificar resultados.

Otro de los ensayos realizados es el ensayo del Índice de Oxígeno con el cual comprobábamos el porcentaje de oxígeno al que las muestras queman. La tabla comparativa es la siguiente:

Tabla 5.4: Comparativa L.O.I. para impregnaciones con Epsomita del 25 y 53%; Fuente: Elaboración propia

ESPECIE	% OXÍGENO	
	Epsomita (25%)	Epsomita (53%)
Pino Silvestre	31-32	40-41
Pino Laricio	28-29	40-41

Como podemos observar en este ensayo sí que se aprecian diferencias significativas obteniendo un incremento porcentual del nivel de oxígeno un 28% más elevado. Esto significa que las muestras tratadas con un 53% de Epsomita obtienen un mejor comportamiento en ambientes ricos en oxígeno que las muestras tratadas solamente con un 25%. El inconveniente principal es que para conseguir un incremento del 28% necesitamos el doble de solución, por tanto se puede valorar si se justifica o no.

Por último también se han realizado los ensayos de goteo los cuales vamos a comparar con los obtenidos en nuestra investigación para observar diferencias y similitudes.

Tabla 5.5: Resumen ensayo de goteo en muestras de Pino Silvestre; Fuente: Elaboración propia

TRATAMIENTO	Muestras ensayadas	% Impreg.	Nº Medio Igniciones	T _{mo} Ignición (s)	D _m Llama (s)	% Pérdida peso
Epsomita (25%)	2	21,5	16	26	16	5,3
Epsomita (53%)	-	-	8	53	11	-

En cuanto a los resultados, para pino Silvestre, podemos observar como las muestras de Epsomita con un 53% de solución tienen un comportamiento más eficiente que las impregnadas con un 25%, las igniciones se ha reducen un 50%, el tiempo de la primera ignición se retrasa el doble y la duración de la llama se reduce un 31%.

Tabla 5.6: Resumen ensayo de goteo en muestras de Pino Laricio; Fuente: Elaboración propia

TRATAMIENTO	Muestras ensayadas	% Impreg.	Nº Medio Igniciones	T _{m0} Ignición (s)	D _m Llama (s)	% Pérdida peso
Epsomita (25%)	2	19,8	18	37	12	5,5
Epsomita (53%)	-	-	5	87	35	-

Los resultados en los ensayos con pino Laricio encontramos unos valores que resultan muy parejos. Por un lado las igniciones cuando tenemos un porcentaje de Epsomita del 53% se reducen a 5 cuando con el 25% de Epsomita son de 18. El tiempo de la primera ignición se retrasa en 50 segundos cuando la Epsomita se encuentra al 53%. En cambio como dato interesante los tiempos de duración de la llama son superiores en las muestras del 53% de Epsomita alcanzando un 200%. Esto se debe a que las igniciones son mucho más cortas pero prolongadas.

Si observamos el periodo que las muestras queman 18 igniciones por 12 segundos de media dan un tiempo de combustión de 216 segundos, en cambio si realizamos ese mismo calculo con las muestras impregnadas con Epsomita al 53% obtenemos 5 igniciones por 35 segundos de media un total de 175 segundos de combustión, 41 segundos menos que las impregnadas con un 45%.

Es obvio que el comportamiento de las muestras impregnadas con un 53% de Epsomita se comportan mejor en los ensayos que las impregnadas con un 25%, pero queda patente que la distancia entre las dos muestras no es del doble en los ensayos por tanto es difícil justificar que utilizando el doble de solución vayamos a conseguir el doble de mejora en cuanto a la reacción al fuego.

6. CONCLUSIONES

Conclusión de la investigación

Una vez finalizados los ensayos y el análisis de los resultados, podemos concluir que todos los productos utilizados durante el proceso de impregnación han mejorado el comportamiento de las muestras de madera en gran medida.

Aunque no todas las soluciones se han tenido un comportamiento idéntico, podemos destacar el buen comportamiento del polifosfato de amonio en los tres ensayos realizados. Como punto negativo podemos destacar la presencia de humos densos y opacos durante la realización de los ensayos, hecho que le penaliza.

El principal objetivo de esta investigación ha pivotado en ensayar el comportamiento de la Epsomita en un grado de concentración del 25%, y aunque no ha sido el producto que mejor comportamiento ha demostrado, los ensayos han sido satisfactorios ya que ha mejorado el comportamiento respecto de la madera sin tratar en todos los ensayos, y por otro lado ha estado por encima en algunos ensayos de las muestras tratadas con Solubor (25% de concentración), aunque muy por debajo del Polifosfato de amonio (63%).

En cuanto a la comparación con las impregnaciones realizadas con soluciones de Epsomita al 53% (Revilla, 2015), se ha podido concluir que no se justifica doblar la cantidad de producto para lograr unos márgenes de mejora tan ajustados. El único ensayo que ha resultado más dispar es el ensayo del índice de oxígeno, donde las muestras tratadas con una solución de Epsomita al 53% lograban superar la prueba con un 10% más de oxígeno, aunque dependiendo de la orientación de las fibras y de la capa ensayada se trata de valores muy orientativos.

En cambio el ensayo del Bunsen las muestras se comportaban prácticamente igual hasta los últimos 3 minutos donde las tratadas al 25% comenzaban a subir de temperatura mientras las muestras al 53% no lo hacían hasta el final del ensayo, dejando esos 3 minutos de desfase, hubiese sido interesante realizar un ensayo de 30 minutos de duración para obtener una visión más precisa del comportamiento.

Se podría valorar la realización de una ampliación de las investigaciones sobre la Epsomita, con valores entre el 35-40% para tener una visión completa de su comportamiento, aunque los valores estimados de estos ensayos deberían quedar enmarcados entre los valores obtenidos en estos dos estudios.

Otro dato curioso observado durante el transcurso de las investigaciones son los porcentajes de impregnación de las maderas dependiendo de su ubicación y orientación en la jaula de impregnación. Se ha observado como las muestras colocadas horizontalmente en la parte baja de la jaula han logrado valores de impregnación entorno al 10% superior. Esto ha dejado otro punto de debate abierto sobre si la orientación y colocación de las muestras es relevante durante el proceso de impregnación. Si observamos las tablas de las impregnaciones realizadas los porcentajes en algunos casos tienen una fluctuación que puede resultar excesiva.

Conclusión personal

A nivel personal este proyecto me ha servido para reforzar conocimientos adquiridos durante los años de formación y por otro lado poner en práctica los conceptos trabajados durante el transcurso del master en asignaturas como "Evolución y control de incendios en Edificios", asignatura que despertó mi interés por la protección de los materiales en casos de incendio, y "Técnicas de diagnosis y caracterización de materiales" la cual me inspiró en profundizar mi conocimiento en los tratamientos de protección en la madera y que me han permitido colaborar en esta línea de investigación desarrollada por el laboratorio de materiales y el del fuego de la EPSEB.

7. REFERENCIAS

- Abu-Isa, I. A. (2002). Intumescent Thermoplastic Elastomer Fire Shield Material. *2002-01-1318*.
- Barreiro, S. (2011). *Protección de la madera*.
- Buezas, N. (2010). *Guía plásticos y fuego*. Valencia: Instituto tecnológico del plástico.
- Burhanettin, U. (2005). Influence of Pretreatment on Shear Strength of Various Wood Species. *Wiley InterScience*.
- Durán, S. M., & Mur, B. Z. (2012). *Protección de la madera frente al fuego mediante la combinación de diversos productos*. Barcelona: UPC - Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona.
- Eluyar. (2005). *Inventario y caracterización de residuos de madera tratada*. País Vasco: IHOBE - Sociedad Pública de Gestión Ambiental.
- European Commission, R. (1992). *Anon (1992) Toxicity and ecotoxicity of flame retardants used in the industry of upholstered furniture and related articles*. Bruselas.
- García, M. (2010). *Desarrollo de nuevas metodologías para la determinación de plastificantes y retardantes de llama organofosforados y sus derivados en muestras medioambientales*. Santiago de Compostela: Universidad de Santiago de Compostela.
- Giudice, C., & Pereyra, A. (2010). Silica nanoparticles in high silica/alkali molar ratio solutions as fire-retardant impregnants for woods. *Fire and Materials*.
- Guerra Gómez, P. (2011). *Análisis de retardantes de llama halogenados emergentes y su impacto en el medio ambiente y en humanos*. Barcelona.
- Hindersinn, R. (1990). MATERIALES IGNIFUGOS EGIPTO SIGLO V A.C. *Fire and Polymers: Hazards, Identification and Prevention*.
- Karel, G. (2011). *Plasma impregnation of wood with fire retardants*. Philippines: ELISEVER.
- Keskin, H. (2006). Effects of Impregnation Materials on Combustion Properties. *Journal of Applied Polymer Science*.
- Lacasta, A. M. (2016). *Fundamentos físico-químicos del fuego - Evolución y control del incendios en edificios*. Barcelona: Laboratorio del fuego, UPC-EPSEB.
- Levan, S., & Winardy, J. (1989). Effects of fire retardant treatments on wood strength. *22(113-131)*.
- Lewinnek, E. (2003). "Domestic and Respectable": Suburbanization and Social Control After the Great Chicago Fire. *Iowa Journal of Cultural Studies* 3.
- Lloyd, J. (1999). Remedial timber treatment with borates. *Proceedings of the 3rd International Conference on Urban Pests*. Guilford, UK: Robinsn, Rettich and Rambo.
- Lowden, L. A., & Terence, R. (2013). Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *2(4)*.
- Marney, D., Rusell, L., & Mann, R. (2008). Fire performance of wood (*Pinus Radiata*) treated with fire retardants and wood preservative. *32(357-370)*.
- Montalvo Luna, A. (2013). El origen del fuego.

- Montón Lecumberri, J. (2012). *Clasificación estructural de la madera de Pinus radiata D. Don procedente de Cataluña mediante métodos no destructivos y su aplicabilidad en la diagnosis estructural*. Barcelona.
- Muñoz, J. L. (1984). NTP 99: Métodos de extinción y agentes extintores.
- Muñoz, R. (1968). *La madera y su resistencia al fuego*. MADRID: AITIM.
- Peraza Sánchez, F., & et al, a. (2004). *Especies de maderas*. Madrid: AITIM.
- Peraza, F. (2001). *Protección preventiva de la madera*. Madrid: AITIM.
- Protección Civil, R. (2010). <http://www.proteccioncivil.es/>. Obtenido de <http://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum12/vdm010.htm>
- Ramos Garcia, D. (2014). Retardantes de llama bromados y organofosforados en el aire de Barcelona. *Trabajo final de grado UB- Grado en Químca*.
- Revilla, C. (2015). *Mejora del comportamiento al fuego de la madera mediante la impregnación de productos*. Barcelona: UPC- Escuela Politecnica Superior de Edificación de Barcelona.
- Schartel, B. (2010). Phosphorus-based Flame Retardancy Mechanisms. 3.
- The Geneva Association, b. (2014). *World Fire Statistics*.
- Troitzsch, J. (1998). Overview of Flame Retardants. *Fire and Enviroment Protection Service*.
- Troitzsch, J. (2004). *Plastics Flammability, Handbook*. 3.
- Vaca de Fuentes, B. (1998). Tecnicas para la preservación de maderas. *Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Bolivia*.
- van Esch, D. G. (1997). *Flame Retardants: A General Introduction*. Bilthoven: World Health Organization.
- Vancells, L. (2013). *La importacia de una prematura detección de incendios*. Prevencion y Seguridad.
- Winter, K. (2015). *After 40 years, effect of Michigan's PBB crisis still not fully known*. Michigan, USA: Bridge Newspaper.
- Yasemin, A., Mehmet, D., & Bayramli, E. (2015). The effect of red phosphorus on the fire properties of intumescent pine wood f lour. *Fire and Materials*.

8. NOTMATIVAS CONSULTADAS

- CTE DB-SI. Código Técnico de la Edificación Documento Básico SI: Seguridad en caso de Incendio.
- 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.
- 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.
- UNE-EN 13183-1:2002. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa.
- UNE-CEN/TR 14734:2008. Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Determinación de la impregnabilidad de las especies de madera por productos protectores. Método de laboratorio.
- UNE-EN 350-2:1995. Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Durabilidad natural de la madera maciza. Parte 2: guía de la durabilidad natural y de la impregnabilidad de especies de madera seleccionadas por su importancia en Europa.
- UNE-EN 13183-2:2002. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica.
- UNE 23725:1990. Ensayos de reacción al fuego de los materiales de construcción. Ensayo de goteo aplicable a los materiales fusibles. Ensayo complementario
- Real Decreto 110/2008. Clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego



Escola Politècnica Superior
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERIA DE LA EDIFICACIÓN

TRABAJO FINAL DE MASTER

ESTUDIO DE NUEVOS RETARDANTES DE LLAMA PARA LA IGNIFUGACIÓN DE MADERA MACIZA

-ANEXOS-

Projectista: Fco. Javier Garcia Zumaquero
Director/s: Laia Haurie Ibarra
Joaquín Montón Lecumberri
Convocatòria: Abril 2015

ÍNDICE

1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS	3
1.1. Pino Silvestre	3
1.2. Pino Laricio	7
2. IMPREGNACIONES	11
3. Ensayo de goteo (UNE 23725:1990)	15
3.1. Muestras impregnadas de Epsomita.....	15
3.2. Muestras impregnadas con Solubor	18
3.3. Muestras impregnadas con polifosfato de amonio FR CROS 134.....	22
3.4. Muestras sin tratar	22
4. Ensayo del índice de oxígeno (L.O.I.) (UNE-EN ISO 4589- A1:2006)	24
4.1. Muestras impregnadas con Epsomita	24
4.2. Muestras impregnadas con Solubor	26
4.3. Muestras impregnadas con Polifosfato de amonio FR CROS 134.....	27
4.4. Muestras sin tratar	28
5. Ensayo con bunsen	29

1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

En estas tablas podemos encontrar todas las muestras caracterizadas mediante un calibre de precisión $\pm 0.01\text{mm}$, y pesadas con una báscula de precisión $\pm 0.01\text{g}$. Cada muestra pintada con un color de fondo diferente representa la impregnación con una solución diferente. Las muestras en amarillo están impregnadas con epsomita, las azules con Solubor, las verdes con polifosfato de amonio y las rojas solamente con agua.

1.1. Pino Silvestre

Caracterización de las muestras

PINO SILVESTRE 1/4

Muestra	Anchura	Profundidad	Altura	Peso	Densidad (Kg/m ³)
101	98,55	95,11	20,41	96,87	506,36
102	98,7	95,68	21,13	101,05	506,41
103	99,41	95,84	21,58	104,21	506,85
104	99,78	96,11	21,24	103,83	509,75
105	99,92	96,13	21,43	106,51	517,44
106	100,14	96,54	20,73	104,22	520,04
107	100,45	96,58	21,78	117,24	554,86
108	100,47	97,04	20,5	128,8	644,43
109	100,77	96,67	20,59	145,2	723,91
110	100,73	97,52	20,89	163,46	796,56
111	101,13	97,59	20,81	156,47	761,86
112	101,16	97,71	20,95	136,72	660,24
113	100,86	98,42	21,63	121,98	568,11
114	100,36	98,1	21,12	105,94	509,49
115	100,68	98,12	20,4	98,81	490,31
116	100,37	98,02	20,38	99,47	496,10
117	100,28	98,2	20,7	101,15	496,21
118	100,21	98,29	21,03	102,58	495,23
119	100,39	98,02	20,95	102,61	497,74
120	100,32	98,03	21,05	103,96	502,19
121	100,21	97,97	20,77	103,88	509,44
122	100,55	98,1	20,95	104,35	504,96
123	100,19	97,69	20,3	101,69	511,81
124	100,32	97,63	21,56	106,48	504,25
125	100,35	97,36	21,38	104,7	501,23
126	99,09	96,53	21,9	97,25	464,25

Caracterización de las muestras

PINO SILVESTRE 2/4

Muestra	Anchura	Profundidad	Altura	Peso	Densidad (Kg/m ³)
201	95,78	99,98	19,25	82,4	447,00
202	95,98	100,42	19,42	86,66	462,99
203	96,12	100,42	20,3	91,6	467,48
204	96,07	101,3	21,18	96,75	469,38
205	96,17	101,19	21,74	100,95	477,17
206	96,25	101,62	22,04	102,75	476,64
207	96,3	102	22,03	103,36	477,65
208	96,34	102,3	21,41	100,94	478,37
209	96,24	102,15	21,23	102,25	489,91
210	96,46	102,28	21,87	108,18	501,37
211	96,98	102,42	21,59	114,03	531,74
212	96,74	102,47	22,02	120,08	550,11
213	97,05	102,43	21,22	125,31	594,04
214	97,19	101,7	22,42	131,74	594,48
215	97,26	102,18	22,35	119,15	536,43
216	97,57	102,24	21,95	104,86	478,89
217	97,79	101,54	21,25	100,17	474,73
218	97,72	101,79	22,05	104,66	477,18
219	98,1	102,47	22,02	103,44	467,31
220	98,1	101,82	21,84	104,83	480,54
221	98,11	102,1	22,15	105,76	476,66
222	97,95	102,27	22,51	106,86	473,90
223	97,88	101,91	22	104,92	478,11
224	98,02	102,02	22,03	104,61	474,85
225	97,16	101,7	22,04	97,45	447,47

Caracterización de las muestras

PINO SILVESTRE 3/4

Muestra	Anchura	Profundidad	Altura	Peso	Densidad (Kg/m ³)
301	99,21	102,39	17,65	85,15	474,93
302	99,44	102,32	20,64	103,57	493,18
303	100,14	102,32	20,64	110,21	521,13
304	100,01	102,13	20,58	126,26	600,65
305	100,03	102,87	22,1	147,1	646,85
306	100,9	102,6	21,8	155,06	687,08
307	100,93	102,74	22,14	150,98	657,63
308	100,98	102,76	22,29	129,94	561,79
309	102,06	102,75	23,08	130,15	537,74
310	101,45	102,97	22,09	121,23	525,35
311	101,42	102,97	23,81	124,92	502,39
312	101,75	102,89	23,78	117,33	471,29
313	101,57	102,91	23,01	122,83	510,70
314	101,65	102,85	22,79	120,92	507,51
315	102,29	102,93	22,49	120,19	507,58
316	101,67	102,82	22,69	121,97	514,22
317	101,81	102,66	22,51	120,85	513,66
318	101,53	102,81	22,24	120,11	517,39
319	101,42	102,67	22,06	116,28	506,21
320	101,28	102,59	21,65	115,5	513,45
321	101,3	102,08	22,42	118,95	513,07
322	101,37	102,1	22,21	118,29	514,59
323	101,25	101,86	22,06	117,75	517,56
324	101,6	102,06	22,32	115,09	497,27
325	100,37	101,78	21,76	106,47	478,96

Caracterización de las muestras

PINO SILVESTRE 4/4

Muestra	Anchura	Profundidad	Altura	Peso	Densidad (Kg/m ³)
401	98,08	97,19	20,95	113,83	569,99
402	98,31	97,24	21,67	115,85	559,24
403	98,4	98,23	21,78	99,11	470,78
404	98,26	98,03	21,08	93,33	459,64
405	98,53	98,06	20,9	90,71	449,21
406	98,41	98,49	21,32	91,66	443,57
407	98,68	98,58	21,69	94,81	449,34
408	98,5	98,58	21,65	92,94	442,10
409	98,56	98,6	21,52	94,33	451,06
410	98,66	98,53	21,99	96,27	450,36
411	98,39	98,42	21,84	96,77	457,57
412	98,25	98,69	22,2	97,41	452,53
413	98,13	98,66	22,44	98,25	452,24
414	97,86	98,89	21,56	94,16	451,29
415	97,8	98,68	21,56	94,57	454,50
416	97,5	98,55	22,46	97,94	453,83
417	96,94	98,51	21,02	93,35	465,05
418	96,83	98,62	21,66	96,63	467,17
419	96,57	98,39	22,72	101,67	470,97
420	96,86	98,42	22,37	105,85	496,36
421	96,53	98,72	22,34	113,25	531,97
422	96,75	98,95	21,92	122,87	585,52
423	97,06	98,7	21,76	136,79	656,20
424	98,26	98,65	22,46	141,42	649,57
425	97,65	98,6	22,89	134,57	610,60

MEDIAS DEL PINO SILVESTRE					
Muestra	Anchura	Profundidad	Altura	Peso	Densidad (Kg/m ³)
Medias	99,05	99,99	21,61	110,78	517,20

1.2. Pino Laricio

Caracterización de las muestras

PINO LARICIO 1/4

Muestra	Anchura	Profundidad	Altura	Peso	Densidad (Kg/m ³)
101	102,13	94,92	19,73	94,46	493,87
102	101,9	95,33	21,55	104,49	499,14
103	102,11	95,98	21,32	106,62	510,27
104	102,33	95,81	21,87	113,29	528,36
105	102,47	97,4	21,62	123,04	570,21
106	101,94	97,72	21,67	127,55	590,87
107	101,83	97,96	21,39	115,1	539,44
108	101,49	98,38	20,98	110,68	528,36
109	101,37	98,7	21,43	112,07	522,69
110	101,13	99,13	21,4	111,9	521,59
111	101,02	98,96	21,51	111,88	520,29
112	100,78	98,76	21,33	111,28	524,17
113	100,66	98,86	21,35	113,25	533,04
114	100,34	98,8	20,8	111,9	542,67
115	100,31	99,23	20,84	123,79	596,76
116	99,74	99,16	20,81	120,17	583,87
117	99,35	99,26	21,15	109,96	527,21
118	99,35	98,93	21,67	112,12	526,42
119	99,14	98,46	21,4	111,45	533,53
120	98,72	98,64	21,39	110,71	531,52
121	98,47	98,56	21,78	113,01	534,63
122	98,12	98,32	21,79	112,91	537,13
123	97,84	98,43	21,78	114,48	545,79
124	97,85	98,74	21,42	122,02	589,60
125	97,64	99,06	21,24	122,13	594,49
126	97,01	97,83	21,75	101,63	492,35

Caracterización de las muestras

PINO LARICIO 2/4

Muestra	Anchura	Profundidad	Altura	Peso	Densidad (Kg/m ³)
201	101,88	100,23	20,84	110,84	520,85
202	102,11	100,28	21,53	125,16	567,73
203	102,29	100,62	21,8	116,97	521,32
204	102,14	101,25	21,9	118,13	521,59
205	102,1	101,21	22,27	119,41	518,89
206	102,09	101,21	21,74	120,33	535,68
207	101,7	101,3	21,67	119,23	534,07
208	101,6	101,28	21,94	120,81	535,12
209	101,7	101,25	21,75	119,4	533,13
210	101,38	101,08	21,62	117,77	531,57
211	101,09	100,8	21,53	116,05	528,97
212	100,92	100,68	21,12	114,34	532,82
213	100,86	100,62	20,56	111,65	535,10
214	100,55	100,6	21,26	113,77	529,04
215	100,38	100,57	20,93	112,25	531,25
216	100,21	100,39	21,13	111,5	524,53
217	99,98	100,36	20,38	107,98	528,04
218	99,73	100,12	21,55	114,11	530,31
219	99,42	100,26	21,58	117,73	547,31
220	99,12	100,53	21,82	132,97	611,56
221	100,8	100,77	21,68	153,53	697,18
222	100,68	101,31	21,86	140,88	631,83
223	100,95	101,2	21,7	120,78	544,81
224	100,93	101,08	21,59	117,93	535,41
225	100,95	101,01	21,73	115,85	522,84
226	100,11	100,88	22,93	113,38	489,61

Caracterización de las muestras

PINO LARICIO 3/4

Muestra	Anchura	Profundidad	Altura	Peso	Densidad (Kg/m ³)
301	96,32	100,25	19,25	120,27	647,03
302	96,2	100,93	21,99	135,03	632,43
303	96,55	101,37	22,66	133,85	603,53
304	96,7	101,01	21,88	120,8	565,23
305	96,65	100,85	22,45	116,99	534,63
306	96,69	101,34	22,05	107,12	495,79
307	97,25	100,94	21,47	103,76	492,32
308	97,32	100,63	21,33	104,59	500,69
309	96,9	100,23	20,99	102,89	504,71
310	97,29	100,03	20,79	102,58	507,00
311	96,77	99,66	20,41	102,34	519,93
312	97,1	99,16	20,61	106,96	539,00
313	97,57	99,45	21,38	112,9	544,21
314	97,38	99	22,27	116,53	542,77
315	97,54	99,11	21,59	111,58	534,61
316	97,31	98,8	20,89	104,05	518,07
317	96,82	98,89	21,77	107,74	516,89
318	96,51	98,9	21,76	106,1	510,84
319	96,61	98,86	21,27	103,8	510,96
320	96,12	99,05	20,71	101,05	512,49
321	96,19	98,87	21,69	106,23	514,98
322	96,15	99,02	21,7	105,99	513,02
323	96,16	99,04	20,06	99,02	518,31
324	96,83	99,26	21,56	105,76	510,37
325	96,85	99,15	21,7	106,31	510,18
326	96,43	99,11	21,89	103,42	494,34

Caracterización de las muestras

PINO LARICIO 4/4

Muestra	Anchura	Profundidad	Altura	Peso	Densidad (Kg/m ³)
401	95,62	92,75	20,08	91,17	511,95
402	95,42	92,6	21,41	99,04	523,53
403	95,61	92,57	22,06	102,54	525,19
404	95,75	92,85	22,23	103,89	525,67
405	96,28	92,85	22,27	103,4	519,38
406	96,34	92,17	22,25	104,26	527,71
407	96,52	92,44	22,32	104,17	523,08
408	96,31	92,22	22,28	104,13	526,22
409	96,67	92,2	22,37	104,42	523,72
410	96,54	91,75	22,23	103,57	525,99
411	96,61	91,86	22,24	104,11	527,48
412	96,48	92,1	21,93	102,3	524,98
413	96,44	92,26	22,27	104,55	527,63
414	96,48	91,78	22,21	104,39	530,79
415	96,32	92,05	21,89	103,44	532,97
416	96,66	92,18	21,89	104,27	534,60
417	96,59	92,32	22,51	106,67	531,42
418	96,74	92,81	22,64	108,34	532,98
419	97,22	92,87	22,5	108,36	533,40
420	97,04	92,86	22,49	108,96	537,65
421	97,05	93,02	22,39	108,14	535,01
422	97,2	93,08	22,34	108,07	534,69
423	97,01	92,77	22,6	104,07	511,67
424	96,2	92,47	22,09	100,66	512,25

MEDIAS DEL PINO LARICIO					
Muestra	Anchura	Profundidad	Altura	Peso	Densidad (Kg/m ³)
Medias	98,65	97,88	21,60	111,66	535,64

2. IMPREGNACIONES

A continuación se muestran las tablas generadas a partir de la impregnación de las diferentes soluciones.

IMPREGNACIONES CON EPSONMITA 25%

Muestras Impr.	PESO SECADO A 60°			Impregnación		PESO SECADO A 40°		Producto Impregnado			
	Inicial	a 15h	Perdida	2 vacíos	Ganancia	a 15 días	Perdida	Cantidad Impr.	%Peso %Solución		
Pino Silvestre	103	104,21g	89,43g	-14,78g	191,59g	102,16g	111,57g	-80,02g	22,14g	24,76%	21,67%
	205	100,95g	86,80g	-14,15g	164,76g	77,96g	103,06g	-61,70g	16,26g	18,73%	20,86%
	313	122,83g	102,27g	-20,56g	190,04g	87,77g	121,10g	-68,94g	18,83g	18,41%	21,45%
	405	90,71g	78,55g	-12,16g	138,45g	59,90g	90,55g	-47,90g	12,00g	15,28%	20,03%
	Media								12,00g	15,28%	20,03%
	a 15 días					a 7 días					
115	98,81g	81,55g	-17,26g	158,01g	76,46g	104,45g	-53,56g	22,90g	28,08%	29,95%	
212	120,08g	100,12g	-19,96g	141,31g	41,19g	112,93g	-28,38g	12,81g	12,79%	31,10%	
317	120,85g	98,69g	-22,16g	179,04g	80,35g	122,70g	-56,34g	24,01g	24,33%	29,88%	
408	92,94g	78,52g	-14,42g	127,35g	48,83g	92,97g	-34,38g	14,45g	18,40%	29,59%	
Media								14,45g	18,40%	29,59%	
	a 15h					a 15 días					
103	106,62g	91,70g	-14,92g	157,51g	65,81g	104,12g	-53,39g	12,42g	13,54%	18,87%	
204	118,13g	98,89g	-19,24g	171,52g	72,63g	112,82g	-58,70g	13,93g	14,09%	19,18%	
305	116,99g	99,58g	-17,41g	189,23g	89,65g	118,43g	-70,80g	18,85g	18,93%	21,03%	
403	102,54g	88,74g	-13,80g	165,88g	77,14g	104,43g	-61,45g	15,69g	17,68%	20,34%	
Media								15,69g	17,68%	20,34%	
	a 15 días					a 7 días					
112	111,28g	91,36g	-19,92g	135,48g	44,12g	103,56g	-31,92g	12,20g	13,35%	27,65%	
215	112,25g	91,72g	-20,53g	141,03g	49,31g	105,71g	-35,32g	13,99g	15,25%	28,37%	
317	107,74g	90,48g	-17,26g	154,16g	63,68g	109,03g	-45,13g	18,55g	20,50%	29,13%	
408	104,13g	87,31g	-16,82g	144,53g	57,22g	105,33g	-39,20g	18,02g	20,64%	31,49%	
Media								18,02g	20,64%	31,49%	
	a 15 días					a 7 días					
								17,44%		29,16%	
								18,42%		24,41%	
								267,05g			

% Solución en Muestras

-827,13g

267,05g

17,44%

24,41%

% Impregnación por Peso

18,42%

29,16%

IMPREGNACIONES CON BORATO 25%

Muestras	Impr.	PESO SECADO A 60°			Impregnación		PESO SECADO A 40°			Producto Impregnado			
		Inicial	a 72h	Perdida	2 vacíos	Ganancia	15días	Perdida	Cantidad Impr.	% por peso	%Solución		
Pino Silvestre	1	119	102,61g	87,13g	-15,48g	176,59g	89,46g	107,49g	-69,10g	20,36g	23,37%	22,76%	
		415	94,57g	82,56g	-12,01g	136,34g	53,78g	93,72g	-42,62g	11,16g	13,52%	20,75%	
		a 12h											
	2	117	101,15g	91,54g	-9,61g	174,04g	82,50g	105,58g	-68,46g	14,04g	15,34%	17,02%	
		208	100,94g	92,40g	-8,54g	154,98g	62,58g	101,43g	-53,55g	9,03g	9,77%	20,18%	
		a 15 días											
Media											15,50%	20,18%	
a 72h											Media	28,18%	40,67%
Pino Laricio	1	316	104,05g	90,30g	-13,75g	151,74g	61,44g	103,63g	-48,11g	13,33g	14,76%	21,70%	
		412	102,30g	88,68g	-13,62g	165,12g	76,44g	105,82g	-59,30g	17,14g	19,33%	22,42%	
		a 12h											
	2	117	109,96g	100,03g	-9,93g	153,49g	53,46g	104,91g	-48,58g	4,88g	4,88%	22,06%	
		217	107,98g	97,65g	-10,33g	154,51g	56,86g	103,84g	-50,67g	6,19g	6,34%	22,06%	
		a 15 días											
Media											11,33%	22,06%	
a 15 días											Media	20,37%	30,84%
Pino Laricio	2	122	112,91g	92,81g	-20,10g	162,23g	69,42g	108,57g	-53,66g	15,76g	16,98%	22,70%	
		223	120,78g	98,16g	-22,62g	156,67g	58,51g	116,38g	-40,29g	18,22g	18,56%	31,14%	
		312	106,96g	90,30g	-16,66g	147,60g	57,30g	110,16g	-37,44g	19,86g	21,99%	34,66%	
		415	103,44g	87,02g	-16,42g	146,77g	59,75g	107,84g	-38,93g	20,82g	23,93%	34,85%	

% Solución en Muestras

-760,62g

270,72g

% Impregnación por Peso

18,42%

26,25%

IMPREGNACIONES CON POLIFOSFATO DE AMONIO FR CROS C-70

Muestras	Imppr.	PESO SECADO A 60º		Impregnación		PESO SECADO A 40º		Producto Impregnado			
		Inicial	a 15 días	Perdida	2 vacíos	Ganancia	15días	Perdida	Dif. Peso Seco	% por Peso	%Solución
P. Silvestre	1	99,02g	83,42g	-15,60g	143,84g	60,42g	121,00g	-22,84g	37,58g	45,05%	62,20%
P.Laricio	1	117,33g	96,50g	-20,83g	159,13g	62,63g	106,33g	-52,80g	9,83g	10,19%	15,70%

% Impregnación por Peso 50,14%
 % Solución en Muestr.: -75,64g 47,41g 38,95%

IMPREGNACIONES CON POLIFOSFATO DE AMONIO FR CROS 134

Muestras	Imppr.	PESO SECADO A 60º		Impregnación		PESO SECADO A 40º		Producto Impregnado				
		Inicial	a 15 días	Perdida	2 vacíos	Ganancia	15días	Perdida	Dif. Peso Seco	% por Peso	%Solución	
Pino Silvestre	319	116,28g	94,40g	-21,88g	162,78g	68,38g	137,49g	-25,29g	43,09g	45,65%	63,02%	
		418	2	96,63g	81,19g	-15,44g	125,91g	44,72g	109,13g	-16,78g	27,94g	34,41%
	123	3	101,69g	82,94g	-18,75g	146,65g	63,71g	122,88g	-23,77g	39,94g	48,16%	62,69%
		218	3	104,66g	86,79g	-17,87g	141,08g	54,29g	121,19g	-19,89g	34,40g	39,64%
Pino Laricio	324	115,09g	95,85g	-19,24g	158,79g	62,94g	135,55g	-23,24g	39,70g	41,42%	63,08%	
		407	4	94,81g	79,92g	-14,89g	122,00g	42,08g	106,36g	-15,64g	26,44g	33,08%
	225	2	115,85g	96,31g	-19,54g	149,04g	52,73g	129,74g	-19,30g	33,43g	34,71%	63,40%
		406	2	104,26g	87,32g	-16,94g	148,07g	60,75g	125,83g	-22,24g	38,51g	44,10%
108	3	110,68g	90,83g	-19,85g	133,95g	43,12g	118,41g	-15,54g	27,58g	30,36%	63,96%	
	211	3	116,05g	94,33g	-21,72g	150,10g	55,77g	130,16g	-19,94g	35,83g	37,98%	64,25%
118	4	112,12g	91,68g	-20,44g	126,03g	34,35g	113,75g	-12,28g	22,07g	24,07%	64,25%	
	324	4	105,76g	89,04g	-16,72g	140,45g	51,41g	121,48g	-18,97g	32,44g	36,43%	63,10%

% Impregnación por Peso 18,22%
 % Solución en Muestr.: -232,88g 401,37g 63,28%

IMPREGNACIONES CON AGUA

Muestras	Impr.	PESO SECADO A 60°					Impregnación		PESO SECADO A 60°		
		Inicial	a 72h	Perdida	a 144h	Perdida	2 vacios	Ganancia	a 15 días	Perdida	
Pino Rojo	220	1	104,83g	91,41g	-13,42g	90,48g	-0,93g	159,51g	69,03g	90,00g	-69,51g
	321		118,95g	101,62g	-17,33g	100,58g	-1,04g	188,65g	88,07g	100,02g	-88,63g
Pino Negro	120	1	110,71g	95,11g	-15,60g	94,13g	-0,98g	150,51g	56,38g	93,97g	-56,54g
	209		119,40g	101,77g	-17,63g	100,75g	-1,02g	162,29g	61,54g	100,60g	-61,69g

3. Ensayo de goteo (UNE 23725:1990)

Tal como hemos visto durante el desarrollo del proyecto, este ensayo se realiza en los materiales de la construcción fusibles de cualquier tipo de espesor para clasificar su comportamiento frente al fuego.

3.1. Muestras impregnadas de Epsomita

Especie	Pino Silvestre	Producto	Epsomita
Muestra	103	% Impreg.	24,76%

Peso inicial	112,41g	Peso Final	105,90 g	Perdida	6,51 g	% Perdida	5,8%
---------------------	---------	-------------------	-------------	----------------	--------	------------------	------

Igniciones	T. Ignición	Ignición	T. Extinción	Extinción	Duración
1	29"	29	34"	34	5
2	37"	37	42"	42	5
3	45"	45	50"	50	5
4	53"	53	58"	58	5
5	1'01"	61	1'05"	65	4
6	1'07"	67	1'24"	84	17
7	1'29"	89	1'43"	103	14
8	1'46"	106	1'58"	118	12
9	2'01"	121	2'22"	142	21
10	2'27"	147	2'41"	161	14
11	2'43"	163	2'56"	176	13
12	2'58"	178	3'10"	190	12
13	3'13"	193	3'25"	205	12
14	3'27"	207	3'45"	225	18
15	3'48"	228	4'00"	240	12
16	4'02"	242	4'13"	253	11
17	4,15"	255	4'27"	267	12
18	4'30"	270	4'53"	293	23
19	4'55"	295	5'18"	318	23
				<i>D_m</i>	<i>12,53s</i>

Especie	Pino Silvestre	Producto	Epsomita
Muestra	408	% Impreg.	18,40%

Peso inicial	92,32g	Peso Final	87,92 g	Perdida	4,40 g	% Perdida	4,8%
---------------------	--------	-------------------	---------	----------------	--------	------------------	------

Igniciones	T. Ignición	Ignición	T. Extinción	Extinción	Duración
1	24"	24	28"	28	4
2	31"	31	34"	34	3
3	38"	38	1'15"	75	37
4	1'24"	84	1'52"	112	28
5	2'00"	120	2'32"	152	32
6	2'40"	160	2'47"	167	7
7	2'50"	170	3'37"	217	47
8	3'43"	223	3'48"	228	5
9	3'51"	231	4'05"	245	14
10	4'09"	249	4'25"	265	16
11	4'27"	267	4'51"	291	24
12	4'54"	294	5'12"	312	18
<i>D_m</i>					19,58s

Especie	Pino Laricio	Producto	Epsomita
Muestra	408	% Impreg.	20,64%

Peso inicial	105,18g	Peso Final	99,62 g	Perdida	5,56 g	% Perdida	5,3%
---------------------	---------	-------------------	---------	----------------	--------	------------------	------

Igniciones	T. Ignición	Ignición	T. Extinción	Extinción	Duración
1	34"	34	38"	38	4
2	41"	41	45"	45	4
3	47"	47	52"	52	5
4	54"	54	59"	59	5
5	1'03"	63	1'08"	68	5
6	1'09"	69	1'20"	80	11
7	1'23"	83	1'36"	96	13
8	1'39"	99	1'52"	112	13
9	1'55"	115	2'04"	124	9
10	2'07"	127	2'20"	140	13
11	2'22"	142	2'36"	156	14
12	2'38"	158	3'19"	199	41
13	3'25"	205	3'55"	235	30
14	4'02"	242	4'12"	252	10
15	4'14"	254	4'40"	280	26
16	4'43"	283	5'05"	305	22
<i>D_m</i>					14,06s

Especie	Pino Laricio	Producto	Epsomita
Muestra	305	% Impreg.	18,93%

Peso inicial	119,74g	Peso Final	112,84 g	Perdida	6,90 g	% Perdida	5,8%
---------------------	---------	-------------------	-------------	----------------	--------	------------------	------

Igniciones	T. Ignición	Ignición	T. Extinción	Extinción	Duración
1	39"	39	45"	45	6
2	48"	48	52"	52	4
3	58"	58	1'01"	61	3
4	1'07"	67	1'10"	70	3
5	1'15"	75	1'18"	78	3
6	1'22"	82	1'26"	86	4
7	1'30"	90	1'36"	96	6
8	1'40"	100	1'44"	104	4
9	1'48"	108	1'54"	114	6
10	1'58"	118	2'17"	137	19
11	2'24"	144	2'32"	152	8
12	2'36"	156	2'55"	175	19
13	3'00"	180	3'07"	187	7
14	3'10"	190	3'44"	224	34
15	3'49"	229	3'56"	236	7
16	3'59"	239	4'12"	252	13
17	4'16"	256	4'37"	277	21
18	4'42"	282	4'53"	293	11
19	4'56"	296	5'13"	313	17
				<i>D_m</i>	<i>10,26s</i>

3.2. Muestras impregnadas con Solubor

Especie	Pino Silvestre	Producto	Solubor
Muestra	119	% Impreg.	23,37%

Peso inicial	107,34g	Peso Final	97,60 g	Perdida	9,74 g	% Perdida	9,1%
---------------------	---------	-------------------	---------	----------------	--------	------------------	------

Igniciones	T. Ignición	Ignición	T. Extinción	Extinción	Duración
1	34"	34	38"	38	4
2	45"	45	49"	49	4
3	54"	54	59"	59	5
4	1'05"	65	1'10"	70	5
5	1'15"	75	1'21"	81	6
6	1'26"	86	1'33"	93	7
7	1'38"	98	1'45"	105	7
8	1'50"	110	1'55"	115	5
9	2'01"	121	2'09"	129	8
10	2'12"	132	2'19"	139	7
11	2'22"	142	2'27"	147	5
12	2'30"	150	2'33"	153	3
13	2'37"	157	2'41"	161	4
14	2'45"	165	2'50"	170	5
15	2'53"	173	2'58"	178	5
16	3'02"	182	3'06"	186	4
17	3'09"	189	3'18"	198	9
18	3'21"	201	3'26"	206	5
19	3'30"	210	3'40"	220	10
20	3'43"	223	3'51"	231	8
21	3'54"	234	3'59"	239	5
22	4'01"	241	4'08"	248	7
23	4'11"	251	4'15"	255	4
24	4'18"	258	4'22"	262	4
25	4'25"	265	4'30"	270	5
26	4'34"	274	4'39"	279	5
27	4'42"	282	4'47"	287	5
28	4'50"	290	4'53"	293	3
29	4'57"	297	5'01"	301	4
				<i>D_m</i>	5,45s

Especie	Pino Silvestre	Producto	Solubor
Muestra	315	% Impreg.	29,92%

Peso inicial	127,03g	Peso Final	120,75 g	Pérdida	6,28 g	% Pérdida	4,9%
---------------------	---------	-------------------	-------------	----------------	--------	------------------	------

Igniciones	T. Ignición	Ignición	T. Extinción	Extinción	Duración
1	39"	39	45"	45	6
2	53"	53	56"	56	3
3	1'00"	60	1'03"	63	3
4	1'07"	67	1'10"	70	3
5	1'13"	73	1'16"	76	3
6	1'20"	80	1'23"	83	3
7	1'28"	88	1'31"	91	3
8	1'35"	95	1'39"	99	4
9	1'43"	103	1'46"	106	3
10	1'48"	108	1'53"	113	5
11	1'56"	116	2'02"	122	6
12	2'05"	125	2'08"	128	3
13	2'11"	131	2'16"	136	5
14	2'20"	140	2'26"	146	6
15	2'30"	150	2'37"	157	7
16	2'40"	160	2'49"	169	9
17	2'52"	173	3'00"	180	7
18	3'03"	183	3'06"	186	3
19	3'09"	189	3'18"	198	9
20	3'21"	201	3'28"	208	7
21	3'31"	211	3'35"	215	4
22	3'37"	217	3'48"	228	11
23	3'51"	231	3'54"	234	3
24	3'57"	237	4'05"	245	8
25	4'08"	248	4'11"	251	3
26	4'15"	255	4'21"	261	6
27	4'24"	264	4'28"	268	4
28	4'32"	272	4'40"	280	8
29	4'43"	283	4'49"	289	6
30	4'51"	291	5'05"	305	14
				<i>D_m</i>	<i>5,50s</i>

Especie	Pino Laricio	Producto	Solubor
Muestra	412	% Impreg.	19,33%

Peso inicial	107,45g	Peso Final	96,90 g	Perdida	10,55 g	% Perdida	9,8%
---------------------	---------	-------------------	---------	----------------	---------	------------------	------

Igniciones	T. Ignición	Ignición	T. Extinción	Extinción	Duración
1	49"	49	52"	52	3
2	58"	58	1'01"	61	3
3	1'08"	68	1'11"	71	3
4	1'17"	77	1'21"	81	4
5	1'26"	86	1'31"	91	5
6	1'36"	96	1'40"	100	4
7	1'43"	103	1'46"	106	3
8	1'50"	110	1'55"	115	5
9	2'01"	121	2'07"	127	6
10	2'15"	135	2'21"	141	6
11	2'24"	144	2'28"	148	4
12	2'32"	152	2'36"	156	4
13	2'40"	160	2'44"	164	4
14	2'47"	167	2'50"	170	3
15	2'53"	173	2'56"	176	3
16	2'59"	179	3'02"	182	3
17	3'06"	186	3'10"	190	4
18	3'13"	193	3'17"	197	4
19	3'21"	201	3'25"	205	4
20	3'29"	209	3'34"	214	5
21	3'37"	217	3'42"	222	5
22	3'45"	225	3'49"	229	4
23	3'54"	234	3'57"	237	3
24	4'01"	241	4'05"	245	4
25	4'09"	249	4'12"	252	3
26	4'16"	256	4'19"	259	3
27	4'24"	264	4'28"	268	4
28	4'31"	271	4'36"	276	5
29	4'39"	279	4'45"	285	6
30	4'49"	289	4'53"	293	4
31	4'58"	298	5'02"	302	4
				<i>D_m</i>	<i>4,03s</i>

Especie	Pino Laricio	Producto	Solubor
Muestra	415	% Impreg.	23,93%

Peso inicial	109,85g	Peso Final	99,65 g	Perdida	10,20 g	% Perdida	9,3%
---------------------	---------	-------------------	---------	----------------	---------	------------------	------

Igniciones	T. Ignición	Ignición	T. Extinción	Extinción	Duración
1	1'05"	65	1'10"	70	5
2	1'19"	79	1'23"	83	4
3	1'30"	90	1'36"	96	6
4	1'43"	103	1'49"	109	6
5	1'54"	114	1'58"	118	4
6	2'02"	122	2'05"	125	3
7	2'08"	128	2'15"	135	7
8	2'19"	139	2'24"	144	5
9	2'28"	148	2'38"	158	10
10	2'42"	162	2'47"	167	5
11	2'50"	170	3'00"	180	10
12	3'03"	183	3'08"	188	5
13	3'12"	192	3'21"	201	9
14	3'24"	204	3'29"	209	5
15	3'32"	212	3'40"	220	8
16	3'44"	224	3'48"	228	4
17	3'52"	232	3'59"	239	7
18	4'03"	243	4'09"	249	6
19	4'12"	252	4'20"	260	8
20	4'24"	264	4'30"	270	6
21	4'34"	274	4'41"	281	7
22	4'45"	285	4'51"	291	6
23	4'54"	294	4'59"	299	5
				<i>D_m</i>	<i>6,13s</i>

3.3. Muestras impregnadas con polifosfato de amonio FR CROS 134

Especie	Pino Silvestre	Producto	APP FR CROS 134
Muestra	407	% Impreg.	33,08%

Peso inicial	106,60g	Peso Final	95,42 g	Perdida	11,18 g	% Perdida	10,5%
---------------------	---------	-------------------	---------	----------------	---------	------------------	-------

Igniciones	T. Ignición	Ignición	T. Extinción	Extinción	Duración	
0	0	0	0	0	0	
					<i>D_m</i>	<i>0,00s</i>

Especie	Pino Laricio	Producto	APP FR CROS 134
Muestra	108	% Impreg.	30,36%

Peso inicial	118,40g	Peso Final	108,51 g	Perdida	9,89 g	% Perdida	8,4%
---------------------	---------	-------------------	----------	----------------	--------	------------------	------

Igniciones	T. Ignición	Ignición	T. Extinción	Extinción	Duración	
0	0	0	0	0	0	
					<i>D_m</i>	<i>0,00s</i>

3.4. Muestras sin tratar

Especie	Pino Silvestre	Producto	Sin tratar
Muestra	311	% Impreg.	0,00%

Peso inicial	104,42g	Peso Final	103,12 g	Perdida	1,30 g	% Perdida	1,2%
---------------------	---------	-------------------	----------	----------------	--------	------------------	------

Igniciones	T. Ignición	Ignición	T. Extinción	Extinción	Duración	
1	17"	17	22"	22	5	
2	25"	25	31"	31	6	
3	34"	34	4'42"	282	248	
4	4'48"	288	5'01"	301	13	
					<i>D_m</i>	<i>68,00s</i>

Especie	Pino Silvestre	Producto	Sin tratar
Muestra	216	% Impreg.	0,00%

Peso inicial	88,91g	Peso Final	87,72 g	Perdida	1,19 g	% Perdida	1,3%
---------------------	--------	-------------------	---------	----------------	--------	------------------	------

Igniciones	T. Ignición	Ignición	T. Extinción	Extinción	Duración
1	19"	19	2'23"	143	124
2	2'37"	157	4'41"	281	124
3	4'47"	287	5'54"	354	67
				<i>D_m</i>	<i>105,00s</i>

Especie	Pino Laricio	Producto	Sin tratar
Muestra	313	% Impreg.	0,00%

Peso inicial	97,08g	Peso Final	95,25 g	Perdida	1,83 g	% Perdida	1,9%
---------------------	--------	-------------------	---------	----------------	--------	------------------	------

Igniciones	T. Ignición	Ignición	T. Extinción	Extinción	Duración
1	26"	26	31"	31	5
2	35"	35	49"	49	14
3	54"	54	3'05"	185	131
4	3'13"	193	3'20"	200	7
5	3'24"	204	3'35"	215	11
6	3'37"	217	3'48"	228	11
7	3'50"	230	4'45"	285	55
8	4'54"	297	5'02"	302	5
				<i>D_m</i>	<i>29,88s</i>

Especie	Pino Laricio	Producto	Sin tratar
Muestra	213	% Impreg.	0,00%

Peso inicial	93,20g	Peso Final	90,01 g	Perdida	3,19 g	% Perdida	3,4%
---------------------	--------	-------------------	---------	----------------	--------	------------------	------

Igniciones	T. Ignición	Ignición	T. Extinción	Extinción	Duración
1	29"	29	35"	35	6
2	39"	39	2'13"	133	94
3	2'22"	142	2'31"	152	10
4	2'34"	154	2'58"	178	24
5	3'02"	182	3'11"	191	9
6	3'14"	194	3'51"	231	37
7	3'57"	237	4'31"	271	34
8	4'41"	281	5'23"	323	42
				<i>D_m</i>	<i>32,00s</i>

4. Ensayo del índice de oxígeno (L.O.I.) (UNE-EN ISO 4589- A1:2006)

El ensayo del índice de oxígeno, también conocido como L.O.I. por sus siglas en inglés *Limiting Oxygen Index*, nos permite conocer cuál es el porcentaje de oxígeno mínimo que una pieza de medidas conocidas necesita para su combustión, según los criterios establecidos en la norma de ensayo (UNE-EN ISO 4589-A1:2006). Por tanto cuanto más elevado resulte su porcentaje de oxígeno, mejor será su comportamiento frente al fuego.

4.1. Muestras impregnadas con Epsomita

EPSOMITA 25%			
P.Silvestre:	317	% Impregnación: 24,33%	
Oxígeno	30,0%	31,0%	32,0%
Lquemada	3,80cm	4,00cm	6,30cm
Tiempo	2'30"	2'35"	>3
Quema	NO	NO	SI
Observ.	Afterglow a 2'1"	Afterglow a 1'48"	Combustión Total




EPSOMITA 25%				
P.Laricio: 317		% Impregnación: 20,50%		
Oxigeno	31,0%	29,1%	27,1%	28,0%
Lquemada	9,40cm	4,10cm	2,00cm	2,00cm
Tiempo	>3'	>3'	23"	34"
Quema	SI	SI	NO	NO
Observ.	Combustión Total	Llama constante	Afterglow a 1'37"	Afterglow a 2'30"




4.2. Muestras impregnadas con Solubor

SOLUBOR 25%			
P.Laricio:	312	% Impregnación: 21,99%	
Oxigeno	23,1%	25,1%	26,0%
Lquemada	1,20cm	2,10cm	5,00cm
Tiempo	1'11"	2'22"	>3'
Quema	NO	NO	SI
Observ.	Afetrglow a 49"	Afterglow a 1'19"	Afterglow a 2'11"



SOLUBOR 25%			
P.Silvestre:	412	% Impregnación: 22,27%	
Oxigeno	26,0%	28,0%	31,1%
Lquemada	1,50cm	1,20cm	2,90cm
Tiempo	8"	7"	1'50"
Quema	NO	NO	NO
Observ.	+40" llama directa sin ignición	+40" llama directa sin ignición	Afterglow a 44"
			Afterglow a 2'30"



4.3. Muestras impregnadas con Polifosfato de amonio FR CROS 134


POLIFOSFATO DE AMONIO 63%							
P.Silvestre:	418	% Impregnación: 34,41%					
Oxigeno	36,1%	40,1%	50,0%	60,0%	65,1%	62,0%	61,1%
Lquemada	3,00cm	4,00cm	2,00cm	2,40cm	9,20cm	7,50cm	4,10cm
Tiempo	2'34"	1'01"	30"	1'10"	1'10"	1'05"	35"
Quema	NO	NO	NO	SI	SI	SI	NO
Observ.	Afterglow a 46"	Afterglow a 56"		Goteo inflamado	Combustión total		Afterglow a 27"




POLIFOSFATO DE AMONIO 63%			
P.Laricio:	225	% Impregnación: 34,71%	
Oxigeno	61,0%	59,1%	58,0%
Lquemada	9,70cm	6,00cm	4,50cm
Tiempo	2'05"	1'33"	1'39"
Quema	SI	SI	NO
Observ.		Afterglow a 1'02"	Afterglow a 50"



4.4. Muestras sin tratar

SIN TRATAR					
P.Laricio: 319		% Impregnación: 0,00%			
Oxigeno	29,0%	24,0%	18,0%	19,0%	20,0%
Lquemada	9,40cm	9,40cm	2,00cm	3,40cm	5,50cm
Tiempo	>3'	>3'	2'05"	2'47"	>3'
Quema	SI	SI	NO	NO	SI
Observ.	Combustión Total	Combustión Total	Afterglow a 1'40"	Afterglow a 1'08"	
					

SIN TRATAR			
P.Silvestre: 203		% Impregnación: 0,00%	
Oxigeno	19,0%	20,0%	
Lquemada	2,10cm	4,50cm	
Tiempo	1'38"	>3'	
Quema	NO	SI	
Observ.	Afterglow a 1'00"	Afterglow a 2'12"	
			

5. Ensayo con bunsen

Este ensayo busca monitorizar el comportamiento, de muestras de sección y peso conocidas, bajo la llama directa de un mechero bunsen a intensidad constante durante un periodo de tiempo establecido. Para no entorpecer la visión de los gráficos, en el proyecto se ha mostrado una versión recortada donde se han ido mostrando valores resumidos. Estas son las gráficas completas con todos los ensayos.

