

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO AL FUEGO DE LA MADERA DE PINO PONDEROSA (*Pinus ponderosa* DOUGL. EX LAWS) IMPREGNADA CON SOLUCIONES HIDROSOLUBLES.

TESTING THE BEHAVIOUR OF PONDEROSA PINE (*Pinus ponderosa* DOUGL. EX LAWS) WOOD IMPREGNATED WITH WATER-SOLUBLE SOLUTIONS WHEN EXPOSED TO FIRE.

Tonello, María Laura^{1,2}; Keil, G.^{3,2}; Maly, L.^{4,2}; Canosa, G.^{5,6}; Giúdice, C.^{7,6}

¹ Dra. Ing. Forestal, marialauratonello@yahoo.com.ar

² Laboratorio de Investigaciones en Madera, LIMAD, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, av. 60 y 119, La Plata,

³ Msc. Ing. Forestal, gabrielkeil@yahoo.com.ar

⁴ Ing. Forestal, lauramaly@yahoo.com.ar

⁵ Dra. Ing. Química, guadalupecanosa@yahoo.com.ar

⁶ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Reg. La Plata - Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Pinturas, CIDEPINT(CIC-CONICET), av. 52 y 122, La Plata.

⁷ Dr. Ing. Químico, cagiudice@yahoo.com.ar

Resumen

La madera por ser combustible crea siempre “riesgo de incendio” y esto constituye una de las limitaciones a su mayor uso en la construcción. El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento al fuego de la madera de pino ponderosa impregnada con 8 formulaciones hidrosolubles: paraformaldehído (25, 50 y 100%); formulación de fosfato ácido de amonio, sulfato de amonio, ácido bórico y borato de sodio (10 y 15%); solución biopreservante (5%); formulación de fosfato monoamónico y decaborato de sodio (8%) y CCA comercial (2%). El comportamiento al fuego fue evaluado mediante los ensayos de Índice de Oxígeno e Intermitente, resultando que las formulaciones de fosfato monoamónico y decaborato de sodio y las compuestas de boro, proporcionaron una capacidad ignífuga eficiente, calificándolo como un material autoextinguible; mientras que las soluciones de paraformaldehído, el CCA y el biopreservante no proporcionaron propiedades retardantes de llama sobre esta madera.

Palabras clave: madera, impregnación, ignífugos, Índice de Oxígeno, Ensayo Intermitente.

Summary

Since wood is a combustible material, it is always at fire risk and therefore, this becomes one of the limitations for its use in construction. The aim of this paper is to test the behaviour when exposed to fire of Ponderosa pine wood impregnated with 8 water-soluble formulations: paraformaldehyde (25, 50 and 100%), formulation of ammonium acid phosphate, ammonium sulphate, boric acid and sodium borate (10 and 15%), biopreservation solution (5%), formulation of monoammonium phosphate and sodium decaborate (8%) and CCA commercial (2%). The fire reaction has been tested through the Oxygen Index and Intermittent tests. As regards the behaviour of monoammonium phosphate and sodium decaborate formulations and boron formulations when exposed to fire, both concentrations have provided Ponderosa pine wood with efficient fireproof capacity, thus

making it self-extinguishing. The solutions of paraformaldehyde, the CCA and the bio-preservation solution have not provided the ponderosa pine wood with flame retardant properties.

Key words: wood, impregnate, fireproof, Oxygen Index, Intermittent Tests.

Introducción

El fuego es considerado uno de los principales agentes de destrucción de objetos fabricados parcial o totalmente con madera. La madera por ser un material combustible, crea siempre el “riesgo de incendio”; esto constituye una de las limitaciones a su mayor uso en la construcción. La protección de los materiales leñosos frente al fuego está limitada a un efecto retardante, ya que ninguna sustancia química puede transformar la madera en material incombustible, dentro de los márgenes de tratamiento económico. Existe una gran variedad de sustancias que ofrecen resultados positivos sobre la demora en la propagación del fuego, la permanencia de la combustión y de la brasa. La acción de los retardantes reduce en el tiempo la pérdida de peso que sufre la madera por carbonización de la masa leñosa, al mismo tiempo que puede limitar la tendencia a la permanencia de la llama y/o brasa que aparece en la madera encendida. En la actualidad no se ha profundizado en el tema de impregnantes con productos de acción ignífuga sobre madera de pino ponderosa, si bien es impregnada con preservantes para usos en postes rurales debido a que su madera presenta una baja durabilidad natural. (Spavento, 2011). El pino ponderosa es una especie que se utiliza en múltiples productos y que tiene la gran ventaja de ser conocido en el mercado norteamericano, característica atractiva para la exportación hacia esos países. Es la conífera de rápido crecimiento más empleada y con gran potencial para forestar vastas extensiones en la región Andino Patagónica Argentina, mostrando crecimientos significativamente mayores que en los lugares de origen en los Estados Unidos (Gonda et al., 2009). Es una especie con una densidad baja, rango entre 351 a 550 kg.m⁻³ (Keil et al, 2013), se trabaja fácilmente, tanto a mano como con herramientas mecánicas, aunque en ciertos casos la resistencia de las piezas aserradas puede verse reducida por el denso agrupamiento de nudos, producto de la ramificación uninodal característica. Otra característica que presenta esta especie es que su madera seca fácilmente. Actualmente esta especie representa el 70% de las plantaciones implantadas en la provincia de Neuquén. El volumen existente de madera de pino ponderosa en la provincia llega a 2.212.964 m³ (Gonda et al., 2009). De acuerdo con lo expuesto y considerando la falta de estudios sobre la impregnación de esta especie con productos de acción ignífuga y de ensayos de comportamiento al fuego, es que se planteó el objetivo principal de este trabajo.

El **objetivo** de este trabajo fue evaluar el comportamiento al fuego de la madera de pino ponderosa impregnada con 8 formulaciones hidrosolubles: paraformaldehído (25, 50 y 100%); formulación de fosfato ácido de amonio, sulfato de amonio, ácido bórico y borato de sodio (10 y 15%); solución biopreservante (5%); formulación de fosfato monoamónico y decaborato de sodio (8%) y CCA comercial (2%).

Materiales y métodos

El trabajo se desarrolló en 5 etapas: obtención de probetas, realización de ensayos físicos, impregnación de probetas, evaluación del comportamiento frente al fuego y análisis de resultados.

Obtención de probetas

Se trabajó con material proveniente del sudoeste de la provincia de Neuquén, extraído de la zona del lago Melliquina (40°27'23"S-71°13'52"O). Los ejemplares muestreados tenían una edad de 22 años. En la **tabla 1** se detallan las dimensiones de las probetas para cada ensayo.

Tabla 1: Dimensión de las probetas de madera.

Table 1: Dimension of the wood samples.

Ensayo	Norma	Dimensión (mm)
Contenido de humedad	IRAM 9532	20x20x20
Densidad	IRAM 9544	20x20x20
Impregnación	IRAM 9600	10x10x100
Índice de Oxígeno	ASTN 2863	10x10x100
Intermitente	UTN-LP	20x10x100

Ensayos físicos

Las propiedades físicas estudiadas en las probetas de maderas sin impregnar fueron: contenido de humedad (CH), (IRAM 9532) y densidades aparentes normal (Dn) y anhidra (Do) (IRAM 9544).

Impregnación de probetas

Se realizaron 8 procesos de impregnación con probetas de diversas dimensiones según los ensayos posteriores a realizar. Las soluciones impregnantes fueron P 100: paraformaldehído al 100%; P 50: paraformaldehído al 50%; P 25 : paraformaldehído al 25%; B 15: mezcla de bórax, ácido bórico y amoníaco al 15%; B 10: mezcla de bórax, ácido bórico y amoníaco al 10%; FB 8: solución fosfato/borato al 8%; CCA 2: arseniato de cobre cromatado comercial al 2% y Bio 5: biopreservante en desarrollo al 5% de concentración. Las formulaciones a base de boro se muestran en las **tablas 2 y 3**.

Tabla 2: Formulación de las soluciones a base de boro (B 15 y B 10).

Table 2: Formulating solutions based on boron.

Compuestos	Formulación	Porcentaje en peso sólido
Fosfato ácido de amonio	$\text{PO}_4\text{H}(\text{NH}_4)_2$	10
Sulfato de amonio	$\text{SO}_4(\text{NH}_4)_2$	60
Ácido bórico	H_3BO_3	20
Borato de sodio	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	10

La solución fue elaborada en el CIDEPINT.

Tabla 3: Formulación de fosfato monoamónico y decaborato de sodio (FB 8).

Table 3: Formulation of monoammonium phosphate and sodium decaborato

Compuestos	Porcentaje en peso sólido
Fosfato monoamónico	6,8
Decaborato de sodio	1,2
Agua c.s.p.	100,0

La solución fue desarrollada por la Empresa Química Bosques S. A.

La impregnación se realizó aplicando el procedimiento Bethell o de “célula llena” (IRAM 9600, 1998). Las probetas, secadas por debajo del punto de saturación de las fibras, fueron colocadas dentro del cilindro de impregnación. Luego se generó un vacío de 600 mm de Hg durante 10 minutos donde se consiguió extraer el aire del interior del cilindro y aquel del interior de los lúmenes celulares. Conservando el vacío, se inundó el cilindro con la solución impregnante y luego se aplicó presión hasta alcanzar un nivel máximo de $0,49 \text{ N.mm}^{-2}$, manteniéndola por 5 minutos. Posteriormente se drenó lentamente del cilindro el sobrante de solución, que no ingresó en la madera, disminuyendo la presión gradualmente. Se realizó un vacío final, de la misma magnitud y tiempo que el inicial, para extraer la solución excedente de la superficie de la madera.

Inmediatamente posterior a la impregnación, el 20% de las probetas fueron cortadas por la mitad en su longitud a fin de corroborar la **penetración** del impregnante, observándola a ojo desnudo y sin reactivos, en la escuadría de las mismas. Previo y posteriormente a la impregnación, se pesaron las probetas en balanza analítica de 0,01 g de precisión y se determinó el volumen con calibre micrométrico, para determinar el valor de **absorción**. Luego se obtuvo el valor de la **retención nominal**, expresada en kg de preservante por metro cúbico de madera y se determinó la **retención real**, corregida por densidad según norma IRAM 9600 (1998).

El ensayo de impregnación se llevó a cabo en la Empresa Química Bosques S.A. ubicada en el partido de Florencio Varela, provincia de Buenos Aires.

Ensayos de comportamiento frente al fuego

Se analizó la resistencia frente al fuego de las probetas impregnadas mediante el ensayo de **Índice de Oxígeno (OI) y el Ensayo Intermitente**. Estas experiencias se realizaron en la Planta Piloto del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Pinturas (CIDEPINT). El **Ensayo OI**, objeto de la norma ASTM 2863, determina la mínima concentración de oxígeno en una mezcla con nitrógeno que puede mantener la combustión de un material en condiciones de equilibrio, como la combustión de una vela. El valor se expresa en porcentaje en volumen. La importancia de esta determinación no solo radica en medir la facilidad de combustión de los sustratos para comparar resultados, sino que un valor de OI mayor al 28% permite clasificar el sustrato como autoextinguible. Para esta experiencia se utilizó el equipo modelo Atlas OI-1015 y el método operativo en cada ensayo fue el siguiente: se dispuso la probeta en el soporte de tal manera que el borde superior de la misma, esté a 100 mm como mínimo de la parte superior del tubo y, en función de la experiencia adquirida, se seleccionó la concentración de oxígeno deseada. Se ajustaron seguidamente los valores de caudal para obtener, a través del tubo, la concentración de oxígeno deseada a una velocidad de 4 cm.s^{-1} , resultado de la relación entre el flujo de la mezcla en $\text{cm}^3.\text{s}^{-1}$ y la superficie de la columna en cm^2 . Se dejó purgar el sistema previamente durante 30 segundos y se procedió luego a provocar la combustión de la probeta con la ayuda del sistema de encendido, habiéndose puesto en marcha el cronómetro. Es importante mencionar que el ensayo OI no es representativo del comportamiento real del material en contacto con el fuego, pero es uno de los métodos preferidos en el desarrollo de tratamientos retardantes del fuego debido a que permite la obtención de valores numéricos reproducibles.

El **Ensayo Intermitente** consiste en someter el frente inferior de la probeta a la acción intermitente de la llama de un mechero Bunsen, dispuesto en un ángulo de 45°. La llama se ajusta de manera de alcanzar 10 mm de altura del cono azul y el orificio de salida del mechero se coloca a 15 mm de la superficie en examen. La probeta se somete a la acción de la llama durante 20 s, con períodos de descanso de 10 s. Se repite el ciclo de exposición fuego/reposo si la llama se autoextingue dentro de los 5 s de retirado el mechero y la zona carbonizada no excede los 8 cm². Las exigencias de este ensayo determinan que para soluciones o pinturas que se aplicarán en servicio sobre un sustrato combustible deberán presentar una calificación de **Aprobado** y clasificación **Clase A**.

Análisis estadísticos

Se calcularon las variables físicas, se obtuvieron los valores estadísticos descriptivos básicos (media, desvío, coeficiente de variación, rango y gráficos de dispersión) y se testearon estadísticamente la distribución normal de las variables y los valores atípicos hallados. Por último, se realizó un ANOVA para testear la respuesta de la absorción de las probetas a las distintas soluciones impregnantes.

Resultados y discusión

Propiedades físicas

Los valores de contenido de humedad y densidades aparentes para el Pino ponderosa se presentan en la **tabla 4**.

Tabla 4: Valores de CH%, Dn y Do para Pino ponderosa.

Table 4: Moisture content values and densities of ponderosa pine.

Parámetro estadístico	CH	Dn	Do
Media	12,30 (%)	0,39 (kg.dm ⁻³)	0,37(kg.dm ⁻³)
Coeficiente de variabilidad	3,18 (%)	9,53 (%)	9,31 (%)

Según se observa en la tabla el contenido de humedad (CH) obtenido se ubicó en el rango especificado para la determinación de las propiedades físicas (Coronel, 1994) y apto para la impregnación de la madera en autoclave (IRAM 9600). De acuerdo a los valores de densidad aparente normal (Dn) la madera de Pino ponderosa resulta liviana, ya que sus valores resultaron entre 0,351 y 0,550 kg.dm⁻³.

Impregnación

En la impregnación por autoclave se observó una penetración total en toda la esquadria de la pieza de la probeta. Los valores de retención obtenidos fueron contrastados con los valores especificados en la norma IRAM 9600 para productos preservantes, ya que no existe en el país una normalización de este tipo para productos ignífugos. En la **tabla 5** se presentan los valores promedios de absorción y retención (nominal y real) para cada uno de los tratamientos.

Tabla 5: Valores promedio de la impregnación de los 8 tratamientos.
Table 5: Average values for the impregnation of the 8 treatments.

Tratamiento	Absorción (kg.m ⁻³)*	Retención nominal (kg.m ⁻³)	Retención real (kg.m ⁻³)	Penetración (%)
B 10	448,00 a	44,80	36,82	Total
B 15	499,07 a	74,86	61,53	Total
P 25	608,03 b	234,70	192,92	Total
P 50	504,53 a	252,26	207,36	Total
P 100	636,10 b	636,10	522,87	Total
FB 8	551,35 ab	44,10	36,25	Total
Bio 5	542,02 ab	27,10	22,27	Total
CCA 2	636,87 b	8,78	7,224	Total

*Letras distintas denotan diferencias significativas (Tukey, $p < 0,05$ %).

En la tabla se observa que no hubo diferencias estadísticamente significativas en los valores de absorción entre los 8 tratamientos ensayados. Al estar afectados por distintas constantes, no es ilustrativo el promedio de las retenciones nominal y real, así como tampoco aporta información un análisis de ANOVA, ya que las diferencias entre tratamientos estarán dadas por las constantes que afectan el valor de la absorción para hacer los cálculos de retención nominal y real. Si bien la absorción depende de una serie de variables - tipo de madera, solución impregnante y condiciones de proceso, son las más significativas (Malkov, 2002) - el valor medio hallado en este trabajo resultó superior al citado por Otaño *et al.* (1999), para otras cuatro especies de *Pinus*, aplicando un tratamiento semejante. Los coeficientes de variación obtenidos se encontraron en un rango medio (entre 10-20%), acercándose al límite inferior del mismo.

Ensayos de comportamiento frente al fuego

En la **tabla 6** se sintetizan los resultados OI e Intermitente para la madera testigo sin impregnar y las probetas impregnadas con las 8 formulaciones ensayadas.

Tabla 6: Resultados de los ensayos de comportamiento al fuego.
Table 6: Test results fire behavior.

Producto	Concentración (%)	OI (% de O ₂)	Ensayo Intermitente
B10	10	>50	Clase A-Aprueba
B15	15	>50	Clase A-Aprueba
P50	50	24	Clase E-No aprueba
Bio5	5	24	Clase E-No aprueba
FB8	8	>45	Clase A-Aprueba
P25	25	26	Clase E-No aprueba
P100	100	24	Clase E-No aprueba
CCA2	2	22	Clase D-No aprueba
Testigo	-	25	Clase E-No aprueba

Según se puede observar los valores OI e Intermitente obtenidos para las soluciones de **paraformaldehído** fueron malos, comportándose igual o peor que el testigo. El uso del paraformaldehído no provocó retardancia de llama en los ensayos, lo cual de haber resultado positivo, hubiera agregado al paraformaldehído una propiedad a la ya reconocida eficiencia en su capacidad biocida, (Rams & Martínez, 2007). Las soluciones que contienen **mezcla a base de boro al 15% y al 10%** proporcionaron a las muestras de madera de Pino

ponderosa una capacidad ignífuga adecuada, de acuerdo a los ensayos realizados, calificándolo como un material autoextinguible, (Giudice, 2010). Valores menores de OI (37-50%), fueron encontrados por Pereyra & Giudice (2008) en madera de *Araucaria angustifolia*. Las soluciones que contienen **fosfato monoamónico** y **decaborato de sodio** proporcionaron buenas propiedades retardantes de llama sobre las probetas de madera. La **solución biopreservante y el CCA** no proporcionaron propiedades retardantes de llama sobre la madera de Pino ponderosa.

Conclusiones

La penetración fue total en toda la pieza de madera y los valores de absorción y retención real logrados en la impregnación profunda de Pino ponderosa fueron mayores a los obtenidos en otras especies de pinos y con otros preservantes hidrosolubles.

Las soluciones a base de boro, al 15 y al 10% y las de fosfato monoamónico y decaborato de sodio, proporcionaron a las muestras de madera de Pino ponderosa una capacidad ignífuga eficiente, de acuerdo a los ensayos realizados. Sería interesante continuar estos estudios ensayando soluciones en bajas concentraciones para evaluar su capacidad ignífuga, manteniendo la efectividad del tratamiento y reduciendo aún más su costo.

Las soluciones con paraformaldehído en las 3 concentraciones, el biopreservante y el CCA no proporcionaron propiedades retardantes de llama sobre la madera.

El estudio presentado condujo al desarrollo de nuevas formulaciones de soluciones impregnantes con poderes retardantes del fuego, con la intención de realizar ensayos experimentales conducentes a clasificar aquellas que otorguen una mayor seguridad a las personas y a los bienes materiales.

Agradecimientos

Al Lic. Ricardo Camera, de la Empresa Química Bosques S.A., por facilitar la planta piloto donde se realizaron los ensayos de impregnación. A la Ingeniera Paula Alfieri por la asistencia en la preparación de los productos impregnantes.

Bibliografía

- ASTM 2863. (2006). American Society For Testing And Materials. Measuring The Minimum Oxygen concentration Support Candle- Like Combustion of Plastic.
- Coronel, E. O. (1994). "Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de la madera. Aspectos teóricos y prácticos para la determinación de las propiedades y sus aplicaciones". 1 Parte: "Fundamentos de las propiedades físicas de la madera". ITM - UNSE. 187 pp.
- Giúdice, C. (2010). "Determinación del Índice de Oxígeno". Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional de La Plata, Departamento de Ingeniería Química, Cátedra de Protección de Materiales, Práctica de Laboratorio N°1: 7 pp.
- Gonda, H.; Mohr Bell, D.; Sbrancia, R.; Lencinas, J.; Bava, J.; Monte, C.; Montoro, A.; Siebert, A.; García, E.; Menéndez, J.; Lutz, G.; Rocchia, A.; Van Houtte, J.; Toth, A.; Tolone, G. & Salimbeni, J. (2009). "Inventario del Bosque Implantado en la Provincia de Neuquén". Ecogestión 2009. Primera reunión sobre planificación y legislación forestal. 18 pp.
- IRAM 9532. (1963). Método de determinación de humedad. Instituto de Racionalización de Materiales. 14 pp.
- IRAM 9544. (1985). Método para la determinación de la densidad aparente. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. 10 pp.
- IRAM 9600. (1998). "Preservación de maderas-Maderas preservadas mediante procesos con presión en Autoclave". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. 23 pp.
- Keil, M; M. Refort & E. Spavento. (2013). Propiedades físicas de la madera de *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws, proveniente de la provincia de Neuquén, Argentina. II Jornadas Forestales Patagonia Sur. Calafate, Argentina. Resumen número 16 en actas ISBN 978-987-679-238-7.
- Malkov, S. (2002). Studies on liquid penetration into softwood chips. Experiments, Models and Applications. Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology to be presented with due permission of the Department of Forest Products Technology, Helsinki University of Technology for public examination and debate in Council Room at Helsinki University of Technology (Espoo, Finland) on the 22nd of November, at 12 noon. 76 p.
- Otaño, M.; G. Keil; M. Luna; B. Díaz & R. Marlats. (1999). "Impregnación de Maderas de *pinus radiata*, *p. pinaster*, *p. pinea* y *p. halepensis*: relación entre la absorción de preservantes hidrosolubles y sus características físicas y mecánicas". Revista de la Facultad Agronomía. La Plata. ISSN 0041-8676. 104 (1): 75-84.
- Pereyra A. M. & C. A. Giúdice. (2008). Silicatos de Etilo con Diferente Grado de Hidrólisis como Material Impregnante Ignífugo para Maderas. Maderas. Ciencia y tecnología 10(2): 113-127.
- Rams & Martinez, S. L. (2007). "Paraformaldehído: Ficha de Datos de Seguridad (FDS)". T 3 Química. 3 pp.
- Spavento, E. (2011). "Identificación de productos y mercados potenciales para el sector forestal", en el marco del "Proyecto BIRF LN 7520 AR - Manejo Sustentable de Recursos Naturales Componente 2 – Plantaciones Forestales Sustentables. Ministerio de Agricultura de la Nación. Informe Final de 259 pp.