

INFORME DE ENSAYES DE COMPORTAMIENTO AL FUEGO

Nº Informe :

Fecha :

SERVICIO : **ENSAYES DE COMPORTAMIENTO AL FUEGO: PROPIEDADES DE IGNICIÓN**

REALIZADO POR : Ing. Lehadán Celedón

SOLICITADO POR : Industrial y Comercial Ciprés Ltda.

At. : Sr. René Miranda

DIRECCIÓN : Moneda 812, Oficina 801

COMUNA : Santiago

TELÉFONO : 427 9408

CORRELATIVO : INF-IPF-014-07

ANTECEDENTES : IPF-046-06

OT – OE – 01

Este estudio se basa en los resultados obtenidos en los ensayos realizados en conformidad con la prueba de Ignición de la **Norma ASTM E1321-97a “Standard Test Method for Determining Material Ignition and Flame Spread Properties”**, en el Laboratorio del Área de Ingeniería de Protección Contra el Fuego de DICTUC, Avenida Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile.

M.Sc. Orelvis González C.
Jefe Sección

División Ingeniería y Gestión de la Construcción
División Ingeniería Mecánica y Metalúrgica

La información contenida en el presente informe o certificado constituye el resultado de un ensayo, calibración o inspección técnica específica acotado únicamente a las piezas, partes, instrumentos o patrones o procesos analizados, lo que en ningún caso permite al solicitante afirmar que sus productos han sido “certificados por DICTUC”, ni reproducir en ninguna forma el logo, nombre o marca registrada de DICTUC, salvo que exista una autorización previa y por escrito de DICTUC.	INF-IPF-014-07
---	----------------

Resumen Ejecutivo

Con el fin de obtener las propiedades de ignición de muestras de pino radiata protegidas con distintas dosis del producto “**AF 7000**”, se realizaron las pruebas de ignición establecidas en la norma ASTM E1321-97a “Standard Test Method for Determining Material Ignition and Flame Spread Properties”.

Se ensayaron pruebas de probetas protegidas con el producto *AF7000* con 1, 3 y 5 manos de aplicación. Cada una de estas aplicaciones se sometió a 2 distintos flujos de calor, a fin de evaluar en cada caso, los tiempos de ignición asociados a esos flujos.

En base a los resultados, el mandante solicitó que se completara la serie de ensayos de ignición sobre las muestras con aplicación de **3 manos de AF7000**.

Los ensayos de ignición corresponden a la medición del tiempo de ignición, bajo un flujo de calor superficial específico, y a la determinación del mínimo flujo de calor para que ésta ocurra. Por su parte, en los ensayos de propagación de llama se registra el avance de la llama sobre la superficie del material, en función del tiempo, bajo un flujo de calor determinado por el ensayo de ignición. A partir de ambos ensayos se obtienen diversos parámetros, los cuales se resumen en las siguientes tablas:

Tratamiento	Flujo crítico de ignición, $\dot{q}''_{o,ig}$ (kW/m ²)	Temperatura mínima de ignición, $T_{o,ig}$ (°C)	Inercia térmica, $k\rho c$ (kW/m ² K) ² s
3 manos de AF7000	12	338	1,16

Tabla 1
Resultados Ensaye de Ignición

Tratamiento	Flujo crítico de Propagación, $\dot{q}''_{o,s}$ (kW/m ²)	Temperatura mínima de Propagación, $T_{s,min}$ (°C)
3 manos de AF7000	9,3	294

Tabla 2
Resultados Ensaye de Propagación

Los resultados presentados en este informe, son válidos exclusivamente para las muestras recibidas en el laboratorio y para las condiciones descritas. De esta forma, los ensayos realizados en ningún caso constituyen una certificación de tipo o lote del producto.

1. Introducción

El señor René Miranda, en representación de Industrial y Comercial Ciprés Ltda., solicitó al Área de Ingeniería en Protección Contra el Fuego (IPF) de DICTUC, desarrollar un conjunto ensayos de ignición y propagación de llama, en probetas de madera, protegido con una aplicación del producto AF7000.

Los ensayos se realizaron según el procedimiento establecido en la norma **ASTM E1321-97a(2002)** "*Standard Test Method for Determining Material Ignition and Flame Spread Properties*".

Este documento contiene los resultados obtenidos en los ensayos realizados.

2. Objetivo

El objetivo de los ensayos es documentar el comportamiento de probetas de madera, frente a la acción del fuego, desde el punto de vista de su ignición y propagación de llama.

3. Características de las Probetas

Las probetas ensayadas tienen dimensiones de 155 por 155 mm y 6 mm de espesor. Corresponden a probetas de pino radiata protegidas con distintas dosis del producto AF7000.

4. Metodología

Cada tipo de probeta se ensayó según lo indicado en la norma ASTM E1321, la cual por ser una normativa internacional, se describe con detalle a continuación.

4.1. Norma ASTM E1321-97a "Standard Test Method for Determining Material Ignition and Flame Spread Properties"

Esta norma establece una metodología de ensayos tendiente a determinar, de manera cuantitativa, la respuesta al fuego, en cuanto a ignición y propagación de llama, de una probeta representativa del material a ensayar.

Dentro de los resultados obtenidos se encuentra el mínimo flujo de calor y la temperatura superficial para que exista ignición en el material, además de la inercia térmica de éste. Por otra parte, también se encuentra el mínimo flujo de calor y la temperatura superficial para que exista propagación de llama.

Los resultados obtenidos mediante esta normativa, son estrictamente válidos sólo para las condiciones establecidas por ella, y para las muestras ensayadas. En ningún caso los resultados pueden ser extrapolados para otras condiciones de ensaye o para certificar lotes o tipos de productos.

4.1.1. Procedimiento general

El procedimiento consiste en dos tipos de ensayos. En el primero de ellos, un panel de prueba de 155 por 155 mm se somete a un flujo de calor superficial constante, mediante un panel radiante, determinándose el tiempo hasta que ocurre la ignición. En el segundo ensaye, un panel de 155 por 800 mm se somete a una distribución de flujo de calor superficial, utilizando el mismo panel radiante del test de ignición, registrándose el avance del frente de llama en función del tiempo. En ambos ensayos el panel de prueba se orienta en posición vertical, estando previamente acondicionado de la manera descrita más adelante. Con los datos obtenidos experimentalmente, se procede luego a calcular diferentes parámetros que caracterizan la ignición y propagación de llama.

4.1.2. Descripción del equipamiento

A continuación se describe, en términos generales, el equipamiento utilizado para realizar los ensayos de ignición y propagación de llama. Este equipo en su conjunto recibe el nombre de LIFT, por su sigla en Inglés (Lateral Ignition Flame Transport).

Estructura principal: Consiste en una estructura metálica, compuesta por dos secciones. Una de ellas es utilizada para soportar el panel radiante que provee el flujo de calor y la otra para sostener la probeta a ensayar, ambos en posición vertical. Estas dos secciones están dispuestas de manera que el panel radiante enfrente a la probeta, formando ángulo relativo entre ellos de 15°.

Marco metálico para la probeta: La probeta se coloca dentro de un marco metálico, el cual permite insertarlo de manera fácil en la estructura principal. Para facilitar el procedimiento se disponen de cinco marcos metálicos, pudiéndose así preparar varias probetas a la vez.

Panel radiante: Mediante un panel radiante (a gas) se provee el calor necesario para los ensayos. Este panel está formado por un material refractario, el cual se vuelve incandescente al momento de ser encendido. La superficie del panel produce un área de radiación de aproximadamente 280 por 483 mm. Por un costado del panel se alimenta el aire y el combustible necesario para la combustión.

Alimentación aire/combustible: Para lograr una combustión controlada, se dispone de medidores de flujo tanto para el gas como para el aire. La alimentación de gas corresponde a la red de gas natural dispuesta en el laboratorio, mientras que la de aire se realiza mediante el uso de un ventilador dispuesto para tal efecto.

Piloto: Para lograr la ignición del material, sobre la probeta se sitúa una llama piloto, cuya función es encender los gases emanados del panel a medida que éste se calienta. De esta forma, la ignición debiera comenzar en la parte superior del panel, para luego estar toda la superficie en llamas. Esta llama piloto se forma mediante una mezcla de aire y acetileno, y cuya longitud debe ser de aproximadamente 180 mm.

Panel “Dummy”: Corresponde a un panel de material incombustible (“Dummy”), sobre el cual se sitúa un instrumento capaz de medir el flujo de calor que el panel radiante entrega a las probetas. Este “Dummy” es de 155 por 800mm y posee varios puntos en los cuales se puede situar el medidor de flujo de calor. Como se describe más adelante, los dos puntos de interés para medir el flujo de calor sobre el “Dummy” están ubicados a 50 y 350 mm del extremo más cercano al panel radiante.

Flujómetro de calor y pirómetro: Sobre el “Dummy” se instala un flujómetro de calor, con el cual se mide la potencia que el panel radiante entrega a la superficie de la probeta. Este instrumento de medición corresponde específicamente a un transductor de flujo de calor refrigerado por agua. Adicionalmente, se utiliza un pirómetro que registra la temperatura superficial del panel radiante. Este instrumento permite verificar que la potencia del panel radiante no varíe durante los ensayos. Esto se hace registrando la temperatura indicada por el pirómetro al momento de medir la potencia con el flujómetro de calor y corroborando que dicha temperatura no cambie en el tiempo.

Cronómetro: Mediante la utilización de un cronómetro se registran los tiempos, tanto de ignición como de propagación de llama.

En las **Figuras 1, 2 y 3**, se muestra el equipamiento utilizado para los ensayos.

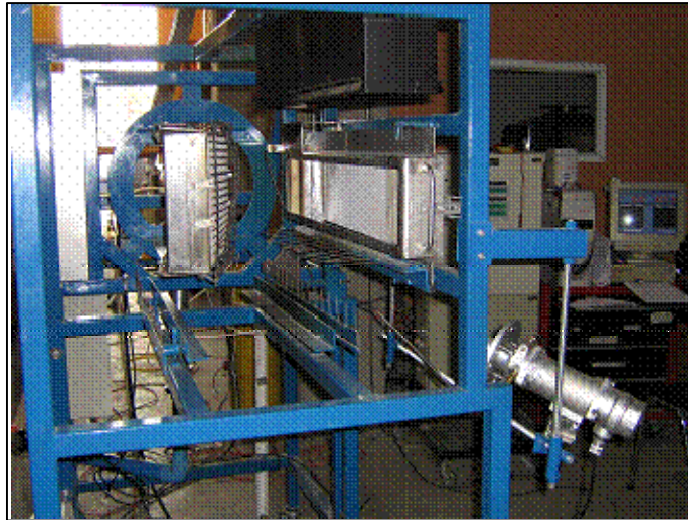


Figura 1
Vista General del LIFT

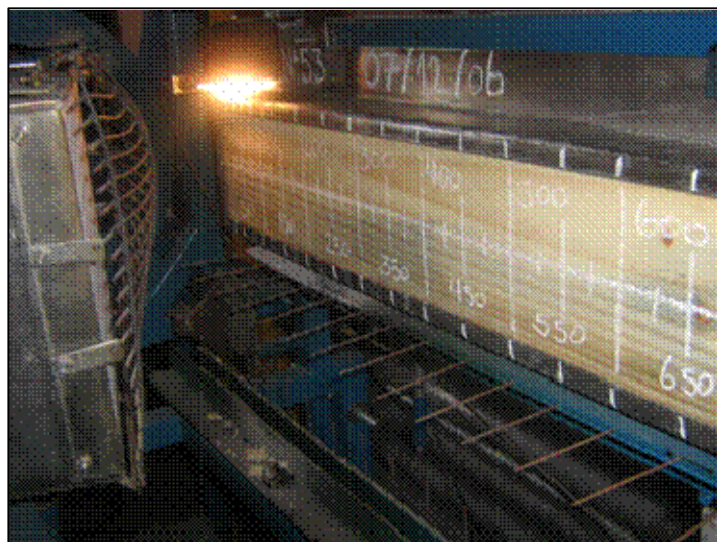


Figura 2
Vista de una a Probeta durante un Ensaye de Propagación

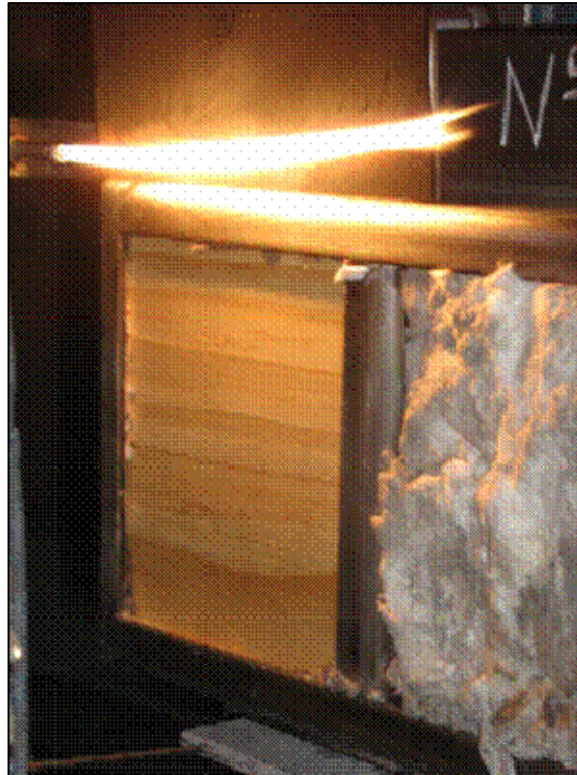


Figura 3

Vista de una a Probeta durante un Ensayo de Ignición

4.1.3. Características de las probetas y calibración del panel radiante

Las probetas a utilizar deben ser representativas del material a ensayar y de dimensiones de 155 por 155mm, para el caso del test de ignición, y de 155 por 800 mm para el test de propagación de llama. Dichas probetas deben ser acondicionadas en un ambiente a 23°C y 50% de humedad relativa, como se muestra en la **Figura 4**.

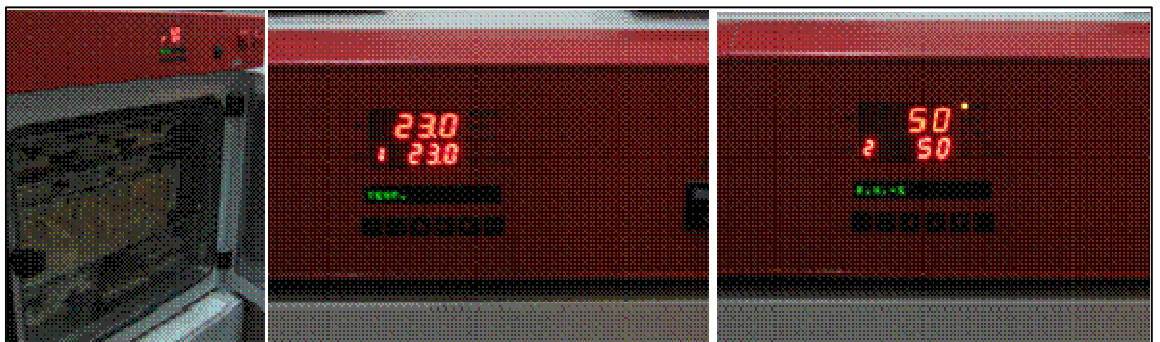


Figura 4

Condiciones de Acondicionamiento de las Probetas Ensayadas

Una vez situada en el marco, la cara no expuesta de la probeta debe ser cubierta con un panel de material no combustible, de tal manera que no se produzcan pérdidas de calor en esa cara.

Por su parte, el ángulo formado entre el panel radiante y la cara expuesta de la probeta debe ser calibrado en 15°. Como consecuencia de este ángulo, el flujo de calor superficial que recibe la probeta corresponde a una distribución dada por la **Tabla 3**.

Posición en la Probeta, mm	Potencia, kW/m ²
0	49,5
50	50,5
100	49,5
150	47,1
200	43,1
250	37,8
300	30,9
350	23,9
400	18,2
450	13,2
500	9,2
550	6,2
600	4,3
650	3,1
700	2,2
750	1,5

Tabla 3

Distribución del Flujo de Calor Superficial sobre la Probeta cuando forma un Ángulo de 15° con el Panel Radiante y la Potencia (a 50 mm) es 50,5 kW/m²

En la **Tabla 3** la posición en la probeta se mide a partir del extremo más cercano al panel radiante. La Norma establece que verificando la potencia a 50 y a 350 mm, el ángulo formado entre el panel radiante y la probeta corresponderá a 15°.

4.1.4. Procedimiento experimental

A continuación se describe, el procedimiento experimental utilizado, tanto para ignición como para propagación de llama, basado en la norma ASTM E1321-97a "Standard Test Method for Determining Material Ignition and Flame Spread Properties". Primero se menciona el procedimiento previo a los dos ensayos, y luego se describe cada uno de ellos en particular.

Procedimiento previo:

- a) Se inserta en la estructura principal, un panel de material incombustible de 155 por 800 mm, como medida de protección ante la radiación producida por el panel radiante.
- b) Se activa el paso de aire del panel radiante.
- c) Una llama externa se sitúa aproximadamente a 2 cm de la superficie del panel radiante.
- d) Se abre el paso de gas y se enciende el panel radiante.
- e) Regulando el flujo de aire y de gas, se ajusta el funcionamiento del panel radiante y se deja estabilizar por 15 minutos.

Test de ignición:

- a) Se retira el panel de material incombustible y se inserta el "Dummy" con el flujómetro de calor inserto a 50 mm del extremo más cercano al panel radiante.
- b) Se ajusta la potencia del panel radiante de modo que el flujómetro de calor indique 30 kW/m^2 .
- c) Se enciende el piloto de acetileno, ajustando el largo de la llama en 180 mm aproximadamente.
- d) El sistema se deja estabilizar por 3 minutos.
- e) Se registra la medición de temperatura indicada por el pirómetro, con el propósito de monitorear la potencia del panel radiante durante el test.
- f) Se registra el flujo de calor \dot{q}''_e indicado por el flujómetro de calor.
- g) Se registra la temperatura ambiente, T_∞ .
- h) Posteriormente se retira el "Dummy" y se inserta la probeta a ensayar.
- i) Estando la probeta completamente situada en la estructura principal, se inicia el conteo de tiempo mediante el cronómetro.
- j) Se registra el tiempo en el cual se enciende la parte superior de la probeta, correspondiendo ésta al tiempo de ignición, t_{ig} .
- k) El test concluye si después de 20 minutos no ocurre ignición.
- l) Si la ignición ocurre, se disminuye la potencia del panel radiante en aproximadamente 5 kW/m^2 , repitiendo el test hasta determinar un flujo para el cual no ocurra ignición.
- m) Si la ignición no ocurre, se aumenta la potencia del panel radiante en aproximadamente 5 kW/m^2 , repitiendo el test hasta identificar un flujo para el cual ocurra ignición.

DICTUC es una filial de la Pontificia Universidad Católica de Chile

- n) Se determina el flujo mínimo de ignición, $\dot{q}''_{o,ig}$, acotando los flujo para ignición/no ignición dentro de un rango de aproximadamente 2 kW/m².
- o) Una vez encontrado el flujo mínimo para que exista ignición, se ajusta la potencia del panel radiante en incrementos de 10 kW/m² y se repite desde el paso e) al j), hasta llegar a una potencia de 65 kW/m². De esta manera se obtiene una curva que relaciona el flujo de calor superficial sobre el panel, \dot{q}''_e , con el tiempo de ignición, t_{ig} .

Test de propagación:

- a) Se remueve la llama piloto.
- b) Estando el "Dummy" inserto en la estructura principal, se ajusta la potencia del panel radiante en aproximadamente 5 kW/m² por sobre la mínima radiación necesaria para exista ignición, $\dot{q}''_{o,ig}$, dejando estabilizar el sistema durante 3 minutos.
- c) Se registra la lectura del flujómetro de calor, \dot{q}''_e .
- d) Se extrae el "Dummy", se inserta la probeta a testear y comienza el conteo de tiempo.
- e) La probeta se calienta hasta alcanzar un estado de equilibrio térmico, tiempo después del cual se reubica la llama piloto, produciéndose la ignición. Si esto no ocurre, se repite el procedimiento, promoviendo la ignición de manera manual, moviendo el piloto sobre la superficie de la probeta.
- f) Una vez producida la ignición, se registra el avance del frente de llama sobre la línea central de la superficie expuesta en función del tiempo, con incrementos de 25 mm.
- g) El test concluye si la llama alcanza el final del panel ensayado o si se extingue.
- h) El test se repite para dos muestras adicionales.

4.1.5. Cálculos

Una vez realizados los ensayos anteriormente señalados, se procede a calcular valores para distintas propiedades de ignición y propagación de llama. A continuación, se señalan los cálculos realizados.

Test de ignición:

- a) Se grafica $\frac{\dot{q}''_{o,ig}}{\dot{q}''_e}$ versus $\sqrt{t_{ig}}$.

DICTUC es una filial de la Pontificia Universidad Católica de Chile

- b) Se realiza un ajuste lineal a los datos graficados anteriormente.
- c) La pendiente de la recta obtenida en el punto b) corresponde a un parámetro designado por b .
- d) Usando el flujo de calor crítico para que ocurra ignición, $\dot{q}''_{o,ig}$, y el gráfico mostrado en la **Figura 5**, se obtiene la temperatura mínima de ignición, T_{ig} .

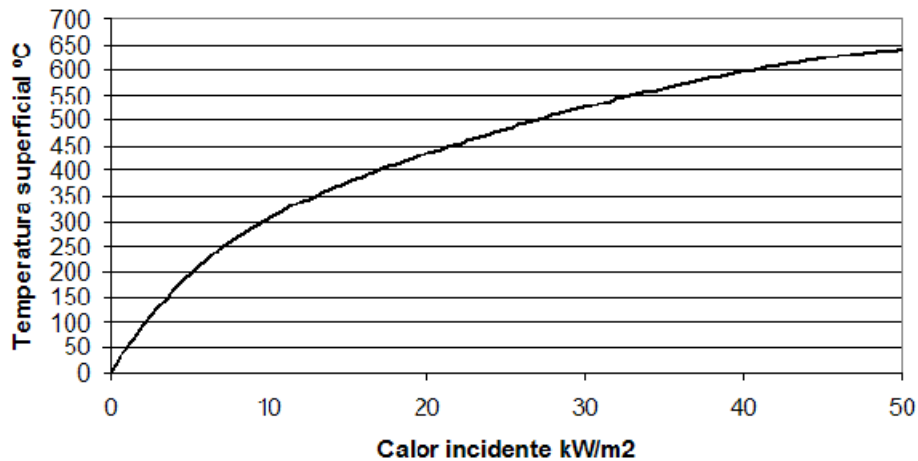


Figura 5

Temperatura Superficial de Equilibrio como Función del Calor Radiante que Recibe la Probeta

- e) Utilizando la siguiente fórmula se determina la inercia térmica del material:

$$k\rho c = \frac{4}{\pi} \left(\frac{h}{b} \right)^2$$

donde h se calcula mediante la siguiente expresión:

$$h = \frac{\dot{q}''_{o,ig}}{T_{ig} - T_{\infty}}$$

Test de propagación de llama:

- a) Usando la distribución de flujo dada en la **Tabla 5** se calcula la invariante $F(x) = \frac{\dot{q}''_e(x)}{\dot{q}''_e(50)}$, donde $\dot{q}''_e(50)$ corresponde al flujo de calor a 50 mm según la **Tabla 5** y $\dot{q}''_e(x)$ al flujo de calor en el punto x de la misma tabla.

- b) Posteriormente se calcula el flujo de calor en la posición x de la probeta, utilizando la potencia del panel radiante, \dot{q}''_e , registrada en el punto c) del procedimiento del test de propagación, y la siguiente fórmula:

$$\dot{q}''_e(x) = F(x) \cdot \dot{q}''_e$$

- c) Utilizando los registros de posición de la llama en función del tiempo (x, t) , se calcula la velocidad del frente de llama para una posición dada. Esto se realiza considerando tres posiciones consecutivas de la llama y realizando un ajuste de mínimos cuadrados mediante la siguiente fórmula:

$$V = \frac{\sum tx - \frac{\sum t \sum x}{3}}{\sum t^2 - \frac{(\sum t)^2}{3}}$$

- d) Se grafica $V^{-1/2}$ en función de $\dot{q}''_e(x)$, donde la posición x debe ser el punto medio de los tres puntos considerados en el ajuste realizado en c).
- e) En el gráfico anterior se ajusta una línea recta.
- f) La pendiente de la recta representa $-C$. El flujo de calor correspondiente al punto donde la llama se detiene corresponde a $\dot{q}''_{o,s}$, el cual representa el flujo crítico de calor para que exista propagación. Con este último valor y la **Figura 5** se encuentra $T_{s,\min}$, la cual es la temperatura mínima para que exista propagación.

5. Resultados

5.1. Prueba de ajuste

La prueba de ajuste consistió en exponer 3 distintas dosis de aplicación del producto AF7000 (1, 3 y 5 manos) a dos flujos de calor (20 y 25 kW/m²) midiéndose los tiempos de ignición en cada caso. En total se ensayaron 6 muestras. Los resultados se muestran en la **Tabla 4** y **Gráfico 1**.

Tiempos de Ignición (s)		
Dosis	Flujo 1 20 kW/m ²	Flujo 2 25 kW/m ²
1 mano	216	131
3 manos	254	135
5 manos	342	140

Tabla 4

Tiempos de Ignición, en Segundos, para las Distintas Probetas y Flujos de Calor Aplicados

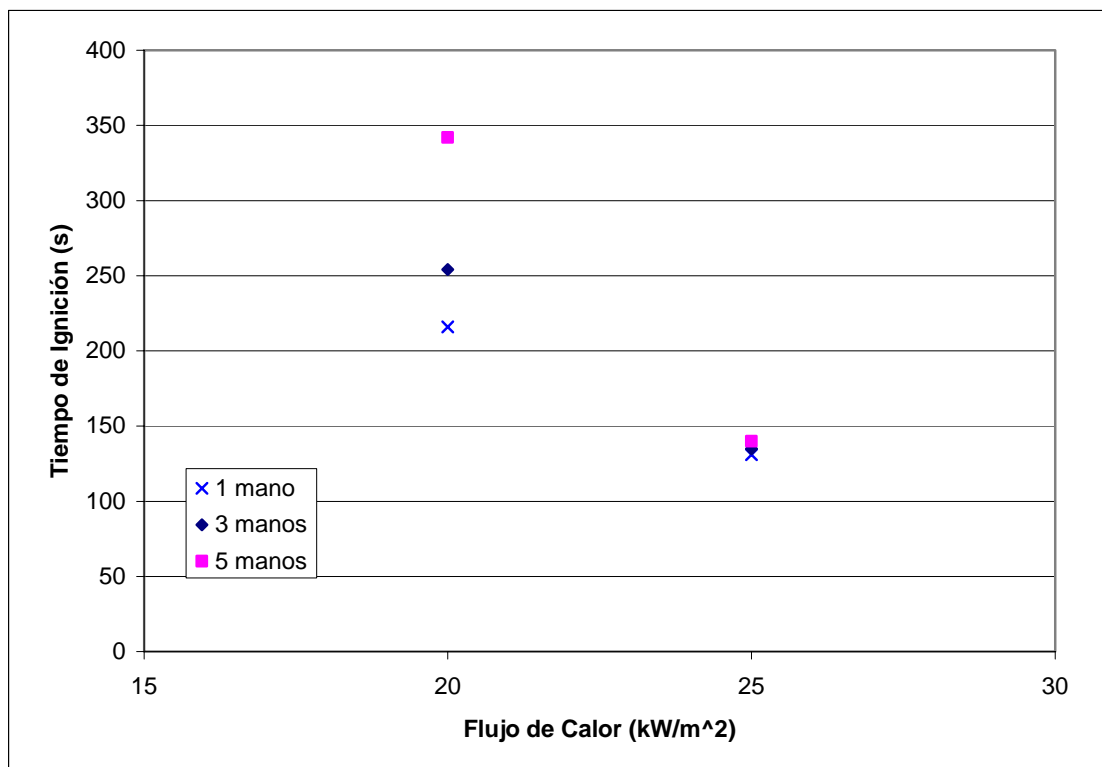


Gráfico 1

Tiempos de Ignición, en Segundos, para las Distintas Probetas y Flujos de Calor Aplicados

5.2. Prueba de ignición

En base a los resultados mostrados en 5.1, el cliente solicitó completar la prueba de ignición a las probetas con 3 manos del producto aplicada. Los resultados se muestran en la **Tabla 5** y **Gráfico 2**.

Flujo (kW/m ²)	Tiempo Ignición (s)
10	Sin ignición
12	1178
15	384
20	254
25	135
30	123
35	88
45	27
55	25
60	13

Tabla 5

Tiempos de Ignición, en Segundos, para las Distintas Probetas y Flujos de Calor Aplicados

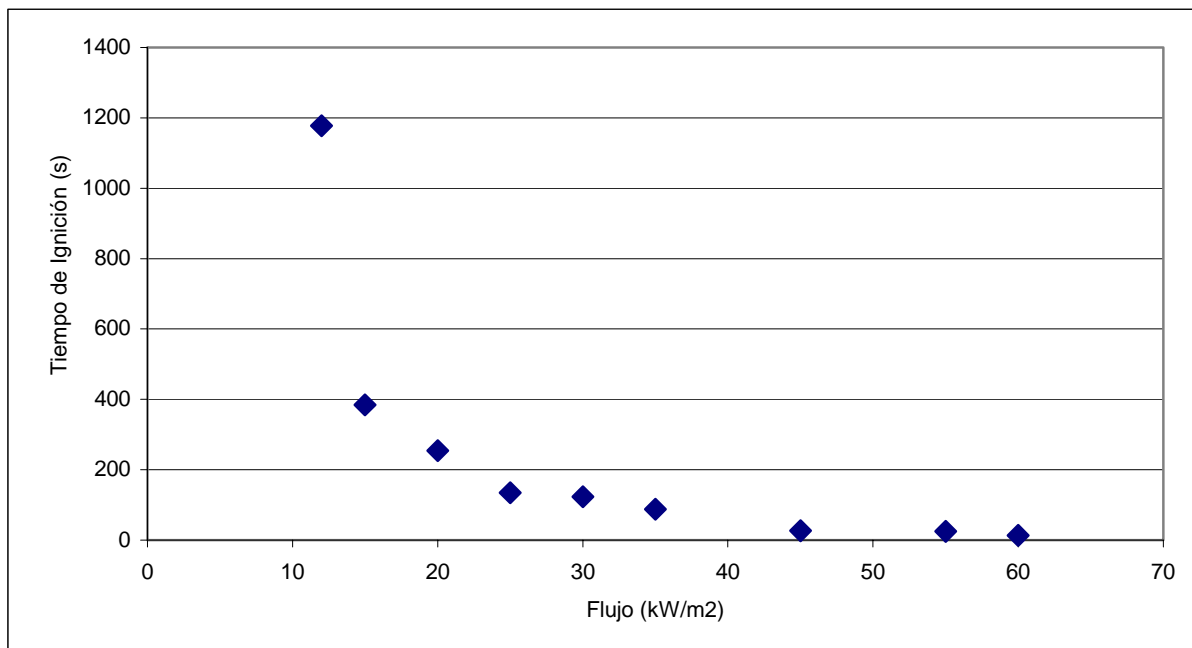


Gráfico 2

Tiempos de Ignición, en Segundos, para las Distintas Probetas y Flujos de Calor Aplicados

La siguiente tabla resume el flujo y temperatura mínima de ignición, además de la inercia térmica de las probetas ensayadas:

Tratamiento	Flujo crítico de ignición, $\dot{q}''_{o,ig}$ (kW/m ²)	Temperatura mínima de ignición, $T_{o,ig}$ (°C)	Inercia térmica, $k\rho c$ (kW/m ² K) ² s
3 manos de AF7000	12	338	1,16

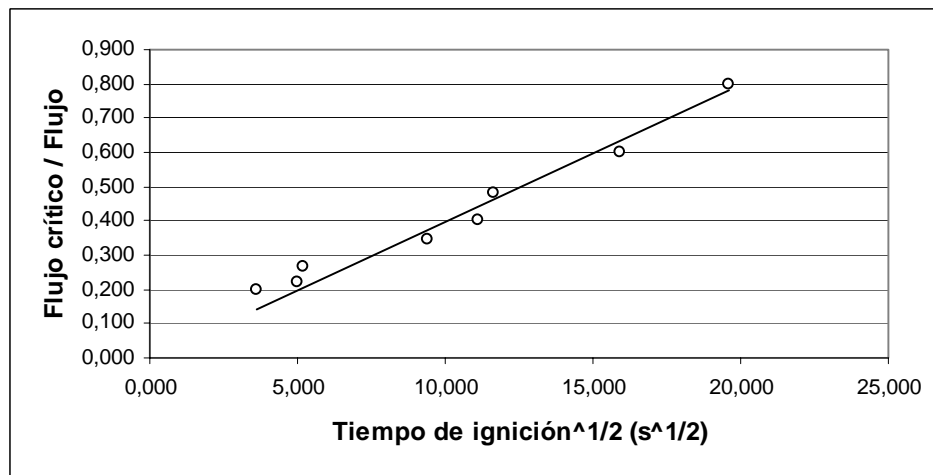


Gráfico 3

$$\frac{\dot{q}''_{o,ig}}{\dot{q}''_e} \text{ en función de } \sqrt{t_{ig}}$$

5.3. Test de propagación

En la siguiente tabla se presenta el flujo y temperatura mínima de propagación, obtenidos para las probetas:

Tratamiento	Flujo crítico de Propagación, $\dot{q}''_{o,s}$ (kW/m ²)	Temperatura mínima de Propagación, $T_{s,min}$ (°C)
A 3 manos de AF7000	9,3	294

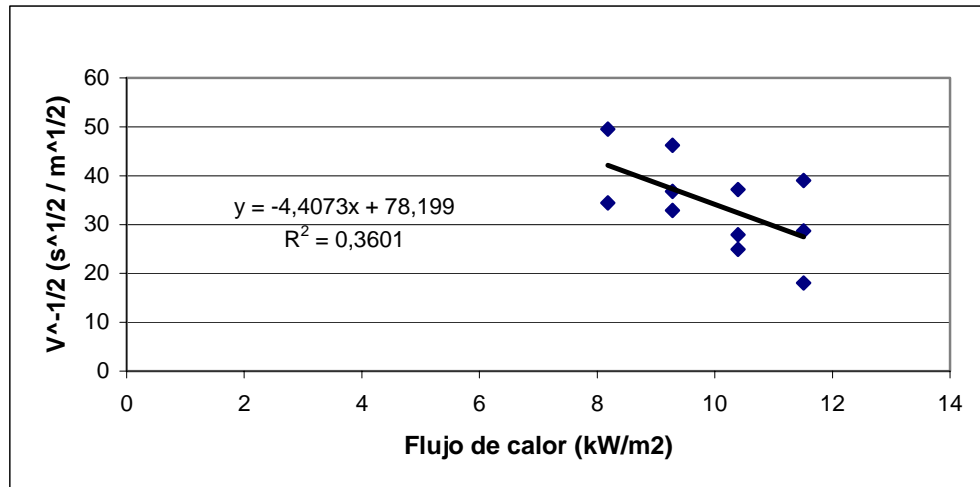


Gráfico 4
Resultados Test de Propagación
 $V^{-1/2}$ en función de $\dot{q}_e''(x)$

6. Análisis de los Resultados

El objetivo de estas pruebas fue documentar el comportamiento de la madera protegida con el producto frente a las pruebas de ignición y propagación antes descritas. No se contempló la ejecución de pruebas sobre madera sin proteger, que hubiesen servido como forma de comparación de los resultados obtenidos.

Sin embargo, existe bibliografía internacional que entrega información respecto a las propiedades de la madera de pino radiata sin tratamiento. Específicamente en este informe se citan datos extraídos de "Ignition Handbook", Vytenis Babrauskas, 2003, FSP-SFPE.

Los datos obtenidos en la bibliografía, y su comparación con los datos de ensayo, se muestran en la siguiente tabla:

	<i>Flujo min de ignición (kW/m²)</i>	<i>Temperatura de Ignición (°C)</i>	<i>Temperatura de Propagación (°C)</i>	<i>Fuente</i>
Pino Radiata protegido con AF7000	12,0	338	294	ensayo
Pino Radiata 11% HR	10,8	340		bibliográfica
Pino Radiata 0% HR			51	bibliográfica

La comparación con estos datos **no puede tomarse de una manera absoluta**, dado que corresponde a una referencia bibliográfica de estudio más que de ensayos. Además, dicha referencia es respecto a un pino radiata que no necesariamente es exactamente igual al ensayado en Chile, por lo que la comparación podría no ser válida.

En cualquier caso, y **considerando esas limitaciones**, la interpretación que se puede hacer es la siguiente:

- Respecto a la propagación, los datos muestran que el producto protegido requiere de alcanzar una temperatura mucho mayor (294 v/s 51°C) para poder propagar llama. Esto constituye el principal aporte del producto a la seguridad contra incendios, dado que ciertamente durante un incendio se alcanza antes una temperatura de 51°C que una de 294°C (ambas en la madera), durante ese lapso de tiempo la propagación de la llama en la madera con tratamiento es prácticamente nula. Es muy importante destacar que la comparación en este caso se hizo con datos de la bibliografía antes citada y que estos datos no pueden ser considerados necesariamente comparables a los obtenidos en ensayos, por lo mismo, la comparación hecha es meramente referencial.

7. Anexos

Se muestran fotografías tomadas durante la ejecución de las pruebas.



Fotografía 1
Vista de una probeta antes del ensaye



Fotografía 2
Vista de una probeta durante el ensaye



Fotografía 3
Vista de una probeta durante el ensaye, tras producirse la ignición

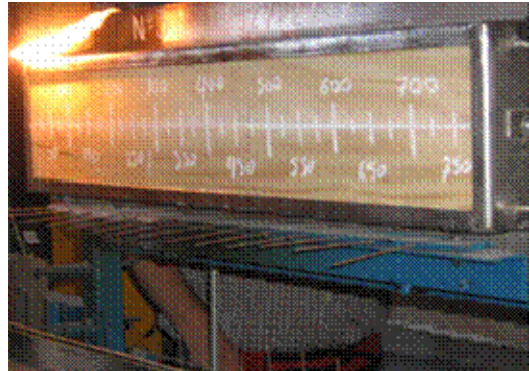


Fotografía 4
Vista de una probeta después del ensaye



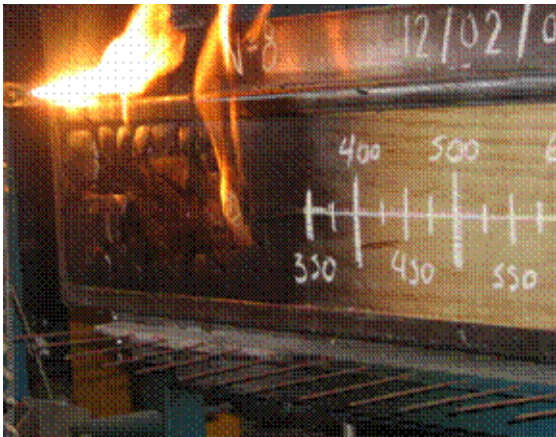
Fotografía 5

Vista de una probeta antes del ensaye de propagación



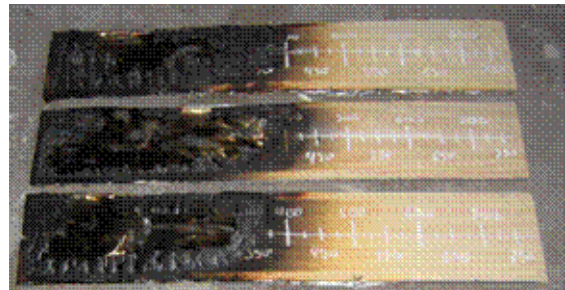
Fotografía 6

Vista de una probeta durante el ensaye de propagación



Fotografía 7

Vista de una probeta durante el ensaye de propagación



Fotografía 8

Vista de probetas después del ensaye de propagación