

DETERMINACION DEL COMPORTAMIENTO AL FUEGO DE LA MADERA MEDIANTE UN METODO SENCILLO

A. I. GARCIA-VALCARCEL

Dpto. de Protección Vegetal

R. CALVO HARO

Sección Estadística. Área de Informática Científica

CIT-INIA

Apdo. 8111, 28040 Madrid, ESPAÑA

RESUMEN

Se describe un método sencillo y eficaz para valorar el comportamiento al fuego de la madera. El método está basado en el seguimiento de la pérdida de peso que experimenta la madera cuando se somete a la acción de una fuente de calor. Mediante este procedimiento se determinan los fenómenos fundamentales implicados en la reacción al fuego de la madera.

La representación del porcentaje de pérdida de peso de la madera ensayada frente al tiempo, sigue un modelo matemático mediante el cual se pueden cuantificar dichos fenómenos, permitiendo estudiar y comparar el comportamiento al fuego de diversas especies de madera (chopo, pino y haya).

PALABRAS CLAVE: Reacción al fuego

Pérdida de peso

Chopo

Pino

Haya

INTRODUCCION

La normativa existente en cuanto a la clasificación de la reacción al fuego de un material, suele basar sus resultados en medidas de la temperatura y de los tiempos en que se producen ciertos fenómenos como inflamación, propagación de la llama, extinción de la llama, carbonización, etc. (ASTM E 136, ASTM E 162, ASTM E 286, DIN 4102, BS 476, NFP 92-501, UNE 23721), siendo escasos los ensayos que se basan en la medida de la pérdida de peso del material (ASTM E 69), cuando éste se expone a una fuente de calor.

En el presente estudio se fija la atención en la pérdida de peso que experimenta la madera en determinadas condiciones de ensayo, por considerar ésta una medida relevante ya que en un incendio, la cantidad de gases, humos y calor, procedentes del material combustible, se traduce en una pérdida de masa del mismo, que varía en el tiempo dado que el avance del fuego se desarrolla en dos sentidos: por extensión y por penetración.

En los primeros instantes de aparición de la llama, el fuego se extiende sobre la superficie del material en mayor cuantía que penetra. Al agotarse dicha exten-

Recibido: 14-1-93

Aceptado para su publicación: 10-5-93

sión todo el material se pierde por penetración y la pérdida se hace notoria cuando la llama alcanza su valor máximo.

Por tanto, las medidas de la pérdida de peso y de la rapidez con la que dicha materia se pierde en el tiempo, proporcionará información acerca del fenómeno de pirólisis-combustión que sufre un material cuando se encuentra bajo la acción de una fuente de calor.

El objetivo de este trabajo es establecer una metodología sencilla que permita:

1. Estudiar, mediante el seguimiento de la pérdida de peso en el tiempo, el comportamiento de tres especies de madera (chopo, pino y haya), cuando se someten a la acción de una fuente de calor continua, con el fin de valorar su reacción al fuego.
2. Determinar un modelo matemático, mediante el cual se calculen los fenómenos más importantes que inciden en la reacción al fuego a la hora de clasificar las especies de madera citadas en su comportamiento al fuego.

MATERIAL Y METODOS

Madera

Se eligieron tres especies de madera, de características fisicoquímicas diferentes, que se suelen emplear como patrones en ensayos relacionados con la tecnología de la madera. Las probetas de madera empleadas son de las especies: haya (*Fagus sylvatica* L), pino (*Pinus sylvestris* L) y chopo (*Populus* sp).

Para la preparación de estas probetas de ensayo, se utilizan trozas verdes descortezadas procedentes de árboles jóvenes donde el duramen no se había desarrollado. Se procede al desenrollado de dichas trozas para obtener cilindros o «curros» de su parte central, con lo que los anillos son más o menos concéntricos. Se secan lentamente en cámaras climáticas hasta obtener una humedad en la madera del 18 p. 100 aproximadamente.

Mediante cortes transversales de los curros se obtienen discos a los que se practica un orificio circular en su centro. Los discos se tornean obteniendo superficies lisas y cantos redondeados de dimensiones: diámetro interno 3 cm, diámetro externo 9,5 cm y anchura 1,8 cm, que constituyen las probetas a ensayar.

Estas probetas se aclimatan, en cámara a $20 \pm 3^\circ\text{C}$ de temperatura y 65 ± 5 p. 100 de humedad relativa, hasta peso constante antes de proceder a su ensayo.

Equipo de pirólisis-combustión

El dispositivo empleado en este trabajo (García-Valcárcel *et al.*,) consta de las siguientes partes fundamentales:

- Un quemador (Fig. 1), que constituye la fuente de calor, formado por:
 - Un mechero Bunsen, conectado mediante un tubo elástico, a una botella de butano.
 - Un soporte adaptado al tubo del mechero sobre el que se coloca una plataforma metálica circular que lleva en su centro un pequeño tubo metálico que conduce la llama piloto.
 - Una pantalla cilíndrica que rodea toda la fuente de calor.

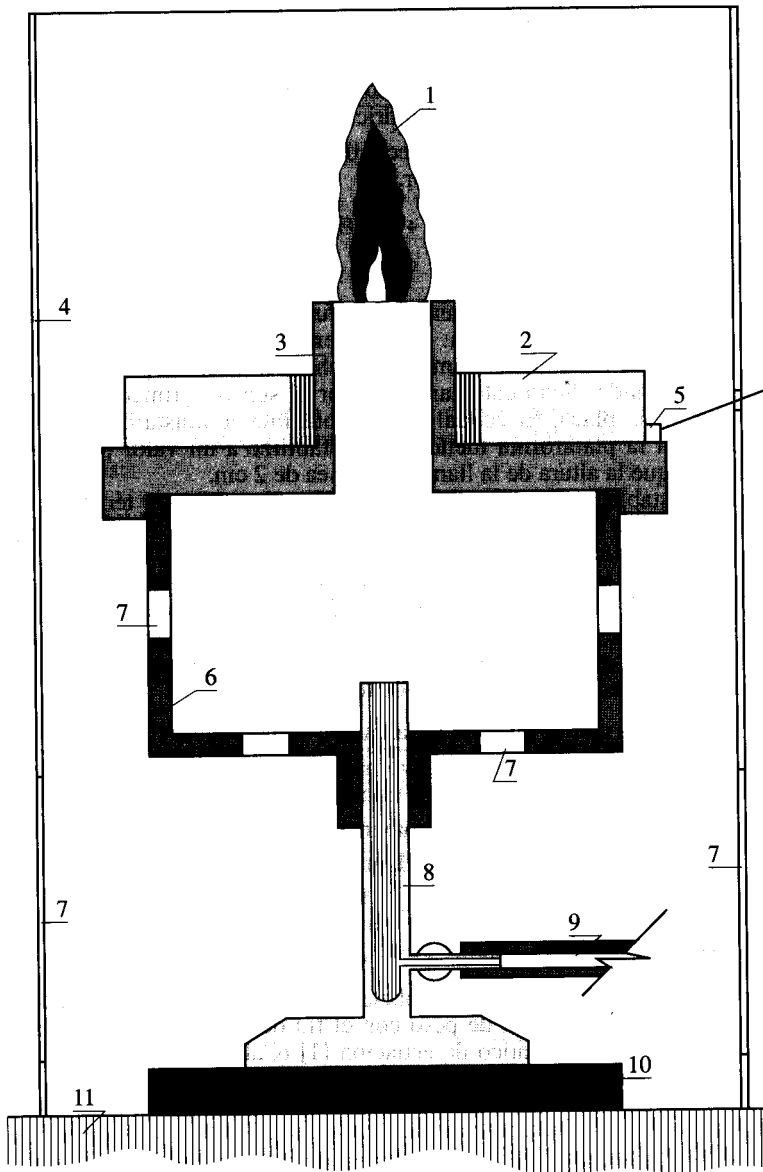


Fig. 1.—Quemador. 1- llama piloto; 2- probeta de ensayo; 3- plataforma metálica circular; 4- pantalla cilíndrica; 5- termopar móvil; 6- soporte adaptado al tubo del mechero; 7- espacios vacíos de entrada de aire; 8- mechero bunsen; 9- tubo elástico conectado a gas; 10- aislante térmico; 11- balanza monoplato

Burner. 1- pilot flame; 2- test specimen; 3- metallic and circular platform; 4- cylindrical shield; 5- thermocouple; 6- support adapted to bunsen tube; 7- clear spacing for air supply; 8- igniting bunsen; 9- elastic tube connected to gas supply; 10- thermic insulator; 11- balance

- Un extractor de gases y humos que extrae a razón de 400 m³/h, cuya base se encuentra situada a 40 cm del borde superior de la pantalla cilíndrica.
- Dos pirómetros: uno móvil situado sobre la placa metálica y otro fijo colocado en el tubo de extracción de humos y gases, a una altura de 55 cm del borde superior de la pantalla cilíndrica.
- Una balanza monoplato que aprecia 0,1 g, sobre la cual se sitúa un aislante térmico que soporta el quemador.

Procedimiento experimental

Antes de iniciar el ensayo de reacción al fuego de la madera se acondiciona el quemador de la siguiente manera: se pone en marcha el extractor de humos y gases y se calienta, mediante la llama del mechero Bunsen, la plataforma metálica circular, controlando dicho calentamiento por el sensor térmico móvil que descansa sobre dicha placa. El caudal del combustible se ajusta de manera que la temperatura en la plataforma metálica se estabilice a un valor predeterminado ($500 \pm 10^\circ\text{C}$) y que la altura de la llama piloto sea de 2 cm.

Una vez establecidas estas condiciones, se separa el sensor térmico, se tara la balanza a 0,0 g y se coloca la probeta a ensayar comenzando a registrar la pérdida de peso y temperatura cada 15 segundos, hasta un total de 20 minutos, tiempo en el que la probeta se ha convertido prácticamente en cenizas.

Se emplean cinco probetas por cada especie de madera estudiada.

Durante el ensayo se observan además, los tiempos en los que se producen ciertos fenómenos que servirán para cuantificar el comportamiento al fuego de cada una de las especies en estudio. Estos fenómenos son:

- Tiempo en el que se inicia la inflamación de la probeta (ti).
- Tiempo desde el inicio del ensayo hasta que la llama cubre toda la superficie de la probeta (extensión de la llama) (ts).
- Tiempo en el que se registra la máxima altura de llama del ensayo (tm).
- Tiempo en el que se extingue la llama en la superficie de la probeta (te).

Procedimiento estadístico

Los pesos obtenidos para cada probeta durante el ensayo, fueron transformados en porcentajes de pérdida de peso con el fin de comparar las tres especies y ajustados al modelo matemático de ecuación [1] (Calvo-Haro *et al.*, 1989), en el que «t» es el tiempo (en segundos), e «y» la pérdida de peso (%).

$$y = A \left(1 - \frac{1}{1 + (t/B)^D + (t/C)^E} \right) \quad [1]$$

El ajuste por el método de mínimos cuadrados de los valores experimentales a la ecuación [1] permite estimar, para cada ensayo, los valores de los parámetros A, B, C, D, y E.

Los tiempos de inflamación, extensión de la llama al total de la superficie de madera, máxima altura de llama y extinción de la misma, observados y anotados

durante el ensayo, se calculan también, a partir de la segunda derivada (ecuación [2]) de la ecuación [1]:

$$y'' = A \left(\frac{R3 \cdot R2 - 2R1^2}{R2^3} \right) \quad [2]$$

donde:

$$R1 = (D/B) \cdot (t/B)^{D-1} + (E/C) \cdot (t/C)^{E-1}$$

$$R2 = 1 + (t/B)^D + (t/C)^E$$

$$R3 = \frac{D(D-1)}{B^2} \cdot (t/B)^{D-2} + \frac{E(E-1)}{C^2} (t/C)^{E-2}$$

Entre los puntos señalados en la Figura 2b, correspondientes a la ecuación [2], y los fenómenos observados durante el ensayo se establecieron las siguientes correspondencias:

- Abscisa del primer punto donde la ordenada es cero = inicio de inflamación (t_i).
- Abscisa del máximo = extensión de la llama (t_s).
- Abscisa del tercer punto donde la ordenada es cero = máxima altura de llama del ensayo (t_m).
- Valor superior de la abscisa cuando la ordenada es -1×10^{-3} = extinción de la llama (t_e).

Con el fin de comprobar estas correspondencias, se efectúan cuatro análisis de varianza doble factorial, uno para cada uno de los fenómenos ocurridos en el ensayo de reacción al fuego.

$$x_{ijk} = \mu + M_i + E_j + ME_{ij} + \epsilon_{k(ij)}$$

x_{ijk} : Tiempo en el que se produce el fenómeno (inflamación, extendido de llama, máxima altura de llama o extinción de llama) según el método i (observado y estimado), la especie j (chopo, pino y haya) y la probeta k (cinco por cada especie).

M_i : Método de estimación,

E_j : Especie de madera.

La cuantificación del comportamiento al fuego, de cada una de las especies, se lleva a cabo mediante el estudio de los fenómenos (inflamación, extendido, máxima altura de llama y extinción de llama) ocurridos durante el ensayo, teniendo en cuenta tanto los tiempos en los que se producen estos fenómenos, calculados a partir de la segunda derivada del modelo matemático de ecuación [1] (abscisas de los puntos señalados en la Fig. 2b o Fig. 2a), como las pérdidas de peso experimentadas por la madera en estos tiempos (ordenadas de ecuación [1], Fig. 2a).

Así, para el estudio de las diferencias entre las especies de madera empleadas en este trabajo, se efectúan dos análisis de varianza de «diseño de medidas repetidas», uno en el que la variable dependiente x_{ijk} , es el tiempo en el que se producen los fenómenos más importantes implicados en la reacción al fuego, y otro

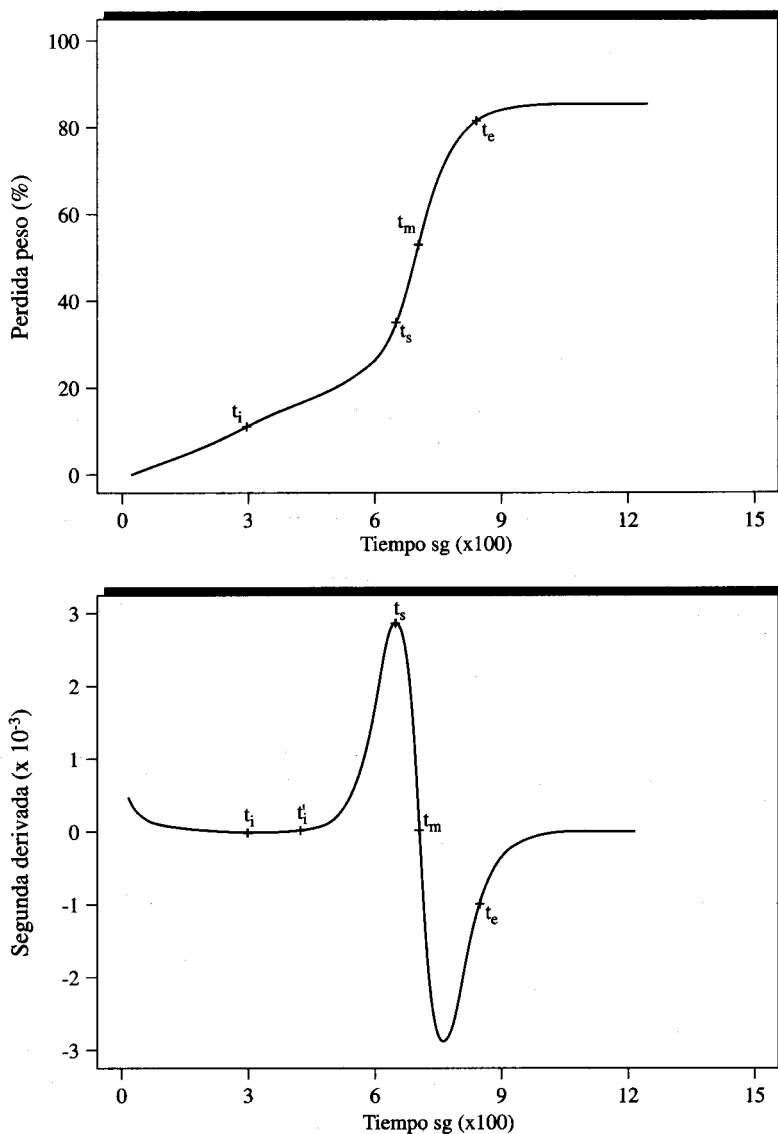


Fig. 2.—Comportamiento al fuego de la madera. a) pérdida de peso experimentada por la madera cuando se somete al ensayo del quemador. b) segunda derivada de a) Los puntos representan los fenómenos más importantes implicados en la reacción al fuego de la madera: t_i ($t_{i'}$): inflamación; t_s : extendido de la llama al total de la superficie de madera; t_m : máxima altura de llama del proceso; t_e : extinción de la llama

Behaviour of wood in fire. a) weight loss of wood when subjected to a source of heat. b) 2nd derivative of a) Points determinate the basic phenomena involved in wood reaction to fire. t_i ($t_{i'}$): flaming; t_s : when the flame front has progressed to the full surface of the specimen; t_m : maximum height of flame; t_e : flaming has just ceased

donde la variable dependiente x_{ijk} , es la pérdida de peso experimentada por la madera en el tiempo en que se producen dichos fenómenos. Con este modelo se pretende estudiar las diferencias entre especies y entre la interacción especie de madera-fenómeno de reacción al fuego, siendo dicho fenómeno la medida repetida a lo largo del tiempo. Ambos análisis siguen el modelo:

$$x_{ijk} = \mu + E_i + N_{j(i)} + F_k + EF_{ik} + NF_{jk(i)}$$

donde:

- x_{ijk} : Tiempo en el que se produce el fenómeno k de la especie i y probeta j de la especie i (para el primer análisis) o pérdida de peso cuando se produce el fenómeno k en la especie i y probeta j de la especie i (para el segundo análisis).
- E_i : Especie de madera ensayada, $i = 1, \dots, 3$.
- $N_{j(i)}$: Probeta j dentro de cada especie i; $j = 1, \dots, 5$. Este término es usado como error para contrastar las especies de madera.
- F_k : Fenómeno k estudiado (inflamación, extendido, altura y extinción de llama), $k = 1, \dots, 4$.
- EF_{ik} : Interacción entre la especie i y el fenómeno k.
- $NF_{jk(i)}$: Interacción entre la probeta j y el fenómeno k en cada especie i. Este término es usado como error para contrastar el fenómeno k y la interacción entre la especie i-fenómeno k.

También se calculó el área bajo las curvas de temperatura-tiempo y las temperaturas máximas desarrolladas durante el ensayo, por cada una de las probetas ensayadas, comparándose mediante un análisis de varianza simple.

$$x_{ij} = \mu + E_i + \varepsilon_{j(i)}$$

- x_{ij} : Área j bajo las curvas temperatura-tiempo de la especie i, o temperatura máxima j en la especie i.
- E_i : Especie de madera $i = 1, \dots, 3$.

La comparación de medias de los valores obtenidos se efectuó por el test de Duncan.

RESULTADOS

En la Figura 3, se representa una curva tipo obtenida al aplicar la ecuación [1] a los datos experimentales de pérdida de peso frente al tiempo cuando la probeta se encuentra sometida al ensayo de reacción al fuego antes descrito.

En las Tablas 1, 2 y 3 se muestran los valores de los parámetros A, B, C, D y E obtenidos aplicando la ecuación [1] a los datos experimentales de porcentaje de pérdida de peso frente al tiempo de ensayo, para cada una de las probetas empleadas. En estas Tablas se puede observar que el modelo matemático de ecuación [1] tiene un coeficiente de determinación muy bueno ($r^2 = 0,999$), para la mayoría de los ajustes. Este es un modelo no lineal, asintótico que pasa por el origen donde, el parámetro A tiene valores semejantes en todas las especies de madera, y los parámetros B, D y E, en general, tienen valores cada vez mayores según se pasa de la especie menos densa (chopo) a la especie más densa (haya).

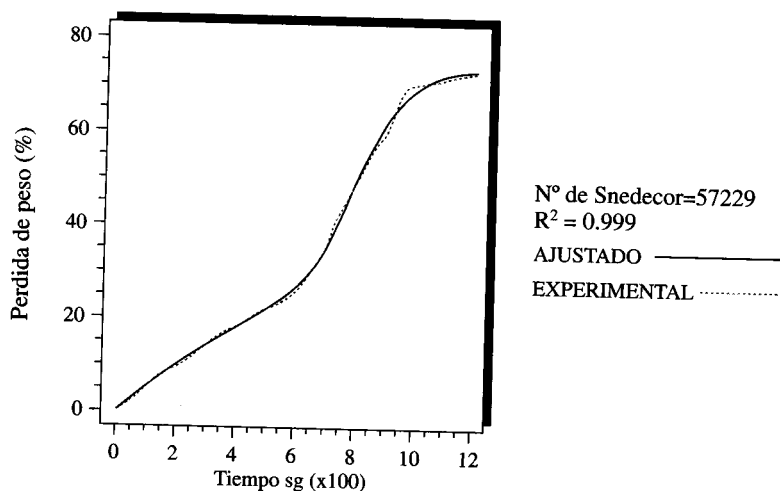


Fig. 3.—Ajuste de los datos experimentales de pérdida de peso frente al tiempo, obtenidos al someter una probeta de madera al ensayo del quemador
Regression of experimental data of loss weight versus time, obtained when a specimen of wood is subjected to burner test

TABLA 1
VALORES DE LOS PARAMETROS DE LA ECUACION [1]
PARA LAS PROBETAS DEL CHOPO

Parameter's values of ecuacion [1] for poplar specimens

A	dtA	B	dtB	C	dtC	D	dtD	E	dtE	r2
90,8	0,3	802,5	132,2	1,2	0,1	402,8	3,5	9,4	0,6	0,996
86,2	0,2	639,9	39,1	1,3	0,1	450,7	2,4	14,6	0,8	0,997
82,3	0,2	686,2	46,7	1,3	0,1	452,6	2,4	13,7	0,8	0,998
86,9	0,3	697,3	110,1	1,2	0,1	390,0	3,9	9,8	0,7	0,996
88,8	0,3	902,8	85,8	1,1	0,1	495,4	2,8	10,7	0,5	0,998

dt: desviación típica; r2: coeficiente de determinación

TABLA 2
VALORES DE LOS PARAMETROS DE LA ECUACION [1]
PARA LAS PROBETAS DEL PINO

Parameter's values of ecuacion [1] for pine specimens

A	dtA	B	dtB	C	dtC	D	dtD	E	dtE	r2
90,1	0,2	846,2	46,8	1,3	0,06	551,4	2,5	10,2	0,4	0,999
92,8	0,2	840,6	16,8	1,4	0,03	660,7	1,5	11,9	0,3	0,999
84,4	0,1	779,5	23,2	1,4	0,04	554,3	1,6	12,4	0,3	0,999
82,7	0,1	960,8	26,0	1,3	0,03	621,1	1,3	12,1	0,2	0,999
86,9	0,2	877,4	26,4	1,5	0,04	617,1	1,6	14,6	0,4	0,999

dt: desviación típica; r2: coeficiente de determinación

TABLA 3
VALORES DE LOS PARAMETROS DE LA ECUACION [1]
PARA LAS PROBETAS DE HAYA

Parameter's values of ecuation [1] for beech specimens

A	dtA	B	dtB	C	dtC	D	dtD	E	dtE	r2
82,7	0,1	1.505,7	29,2	1,2	0,0	769,4	0,0	17,2	0,2	0,999
81,8	0,1	1.033,3	32,4	1,3	0,03	627,4	1,0	17,1	0,4	0,999
81,9	0,2	1.226,7	22,7	1,3	0,02	708,2	0,7	16,8	0,2	0,999
83,4	0,3	1.323,7	46,1	1,2	0,03	616,7	0,9	15,6	0,3	0,999
84,9	0,3	1.200,2	25,4	1,3	0,02	699,9	0,8	16,9	0,3	0,999

dt: desviación típica; r2: coeficiente de determinación

Los análisis de varianza (Tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4) efectuados para comprobar las correspondencias entre las abscisas de puntos de la curva de la ecuación [2] señalados (Fig. 2b) y los fenómenos observados durante el ensayo, indican que no existen diferencias significativas entre los valores de los tiempos estimados visualmente y los de los tiempos calculados a partir de las derivadas del modelo matemático (M), existiendo diferencias significativas entre las especies de madera estudiadas (E).

TABLA 4
INFLUENCIA DE LOS METODOS DE ESTIMACION
SOBRE LOS DISTINTOS FENOMENOS DE REACCION
AL FUEGO. DONDE M ES EL METODO DE ESTIMA
(VISUAL Y CALCULADO A PARTIR DE LA ECUACION [1])
DEL TIEMPO EN EL QUE SE PRODUCE EL FENOMENO
Y E ES LA ESPECIE DE MADERA

Influence of estimation methods on the different phenomena involved in wood reaction to fire. M is the estimation method (visual and calculated by ecuacion [1]) and E is the wood specimen

TABLA 4.1.— Inflamación

Flaming

F.V.	g.l.	S.C.	C.M.	F
M	1	36,2	36,2	0,028
E	2	94.089,8	47.044,9	36,58**
ME	2	6.255,8	3.127,9	2,33
Error	24	30.866,6	1.286,1	
Total	29	131.248,7		

** significativo al 1 p. 100

TABLA 4.2.- Extendido de llama al total de la superficie*When the flame front has progressed to the full surface of specimen*

F.V.	g.l.	S.C.	C.M.	F
M	1	2.822,7	2.822,7	1,14
E	2	259.779,0	129.889,5	52,54**
ME	2	709,4	354,7	0,14
Error	24	59.328,8	2.472,0	
Total	29	322.639,9		

** significativo al 1 p. 100

TABLA 4.3.- Máxima altura de llama*Maximun height of flame*

F.V.	g.l.	S.C.	C.M.	F
M	1	3.392,0	3.392,0	1,26
E	2	313.610,5	156.805,2	58,51**
ME	2	1.260,5	630,2	0,23
Error	24	64.314,0	2.679,7	
Total	29	382.576,9		

** significativo al 1 p. 100

TABLA 4.4.- Extinción de la llama*Flaming has just creased*

F.V.	g.l.	S.C.	C.M.	F
M	1	1.056,1	1.056,1	0,28
E	2	479.392,3	239.696,1	64,4**
ME	2	13.140,2	6.570,1	1,76
Error	24	89.265,2	3.719,4	
Total	29	582.853,9		

** significativo al 1 p. 100

Debemos señalar que el tiempo de inflamación observado visualmente, cuando la probeta se sometía al ensayo del quemador, fue confuso debido a que la llama sufría un ensanchamiento o prolongación intermitente que dificultaba la apreciación de un único valor para el inicio de la combustión. Este fenómeno se sitúa en la curva de ecuación [2], (Fig. 2b) entre el 1.º y 2.º puntos donde la ordenada es cero (t_i y t_i'), es decir entre el 1.º y 2.º punto de inflexión de la ecuación [1] (Fig. 2a). No obstante, el primer valor anotado durante el ensayo se consideró como inicio de inflamación y se comparó con el primer valor de la abscisa (t_i) donde la ordenada es cero en la ecuación [2].

Dado que no existen diferencias significativas entre los métodos de estima de los tiempos en los que se producen los fenómenos más importantes que inciden en la reacción al fuego de la madera y, considerando más objetivo el cálculo de estos tiempos a partir de la ecuación [1], se establece este último método para cuantificar la reacción al fuego de cada una de las especies estudiadas en este trabajo.

Empleando los datos calculados a partir del modelo matemático de ecuación [1] (Fig. 2a) los análisis de «diseño de medidas repetidas» reflejados en las Tablas 5 y 6 indican que existen diferencias significativas entre las especies de madera, entre los fenómenos de reacción al fuego y entre las interacciones especie de madera-fenómenos que inciden en la reacción al fuego.

TABLA 5
INFLUENCIA DE LA ESPECIE EN LOS TIEMPOS EN QUE SE PRODUCEN LOS FENOMENOS QUE CUANTIFICAN LA REACCION AL FUEGO

Influence of especie in the time when the phenomena of reaction to fire is determined

F.V.	g.l.	S.C.	C.M.	F
M	2	488.315,9	244.157,9	28,6**
N	12	102.403,1	8.533,6	
F	3	2.276.900,3	758.966,8	1.271,9**
EF	6	26.581,7	4.430,3	7,4**
NF	36	21.481,7	596,7	
Total	59	2.915.682,7		

** significativo al 1 p. 100. E: especie de madera; N: probeta ensayada dentro de cada especie; F: tiempo en el que se produce el fenómeno en estudio (inflamación, extendido, altura máxima y extinción de la llama)

significance to 1 p. 100. E: especie's wood; N: specimen essays; F: time when the phenomena of reaction to fire occurs

TABLA 6
INFLUENCIA DE LA ESPECIE EN LA PERDIDA DE PESO EN EL TIEMPO EN QUE SE PRODUCEN LOS FENOMENOS QUE CUANTIFICAN LA REACCION AL FUEGO

Influence of especie in the weight loss when the phenomena of reaction to fire is determined

F.V.	g.l.	S.C.	C.M.	F
M	2	168,6	84,3	4,5**
N	12	223,0	18,6	
F	3	42.381,0	14.127,0	3.082,2**
EF	6	132,4	22,1	4,8**
NF	36	165,0	4,6	
Total	59	43.070,0		

** significativo al 1 p. 100. E: especie de madera; N: probeta ensayada dentro de cada especie; F: % pérdida de peso en el tiempo en el que se produce el fenómeno en estudio (inflamación, extendido, altura máxima y extinción de la llama)

significance to 1 p. 100. E: especie's wood. N: specimen essays. F: weight loss when the phenomena of reaction to fire occurs

Analizando las diferencias, entre estas interacciones, mediante comparación de medias por el test Duncan (Tablas 7 y 8) se puede apreciar:

- La inflamación (ti) en el chopo se produce antes que en el pino y en el haya, teniendo pérdidas de peso (Pi) similares las tres especies en el tiempo en el que tiene lugar este fenómeno.
- Desde el inicio del ensayo hasta que la llama cubre el total de la superficie de madera, los tiempos invertidos en orden decreciente son: haya, pino y chopo, es decir, la llama se propaga (ts-ti) más lentamente en el haya que en el pino y en éste que en el chopo. El haya pierde menos peso que el pino o chopo cuando dicho fenómeno tiene lugar (Ps-Pi).

TABLA 7

TIEMPO(S) EN EL QUE SE PRODUCEN LOS FENOMENOS DE INFLAMACION (ti), EXTENDIDO DE LLAMA (ts), MAXIMA ALTURA DE LLAMA (tm) Y EXTINCION DE LLAMA (te), EN CHOPO, PINO Y HAYA

Time when the phenomena occurs: Flaming (ti), flame front has progressed to the full surface of specimen (ts), maximum height of the flame (tm) and flame extinction (te) in poplar, pine and beech

	Chopo	Pino	Haya
ti	112 i	224 h	242 h
ts	386 g	539 e	605 d
tm	441 f	606 d	692 c
te	582 d	752 b	843 a

Los valores corresponden a la media de 5 repeticiones. Los valores seguidos de la misma letra no son diferentemente significativos al nivel del 1 p. 100 según el test Duncan

TABLA 8

PERDIDA DE PESO (%) EN EL TIEMPO EN EL QUE SE PRODUCEN LOS FENOMENOS DE INFLAMACION (Pi), EXTENDIDO DE LLAMA (Ps), MAXIMA ALTURA DE LLAMA (Pm) Y EXTINCION DE LLAMA (Pe), EN CHOPO, PINO Y HAYA

Weight loss (%) at the time of flaming (Pi), flame front has progressed to the full surface of specimen (Ps), maximum height of the flame (Pm) and fame extinction (Pe) in poplar, pine and beech

	Chopo	Pino	Haya
Pi	8,0 fg	11,9 f	9,0 f
Ps	35,8 d	38,7 d	30,1 e
Pm	54,2 c	55,3 c	52,1 c
Pe	84,5 a	81,9 a	80,5 ab

Los valores corresponden a la media de 5 repeticiones. Los valores seguidos de la misma letra no son diferentemente significativos al nivel del 1 p. 100 según el test Duncan

- La máxima altura de llama (tm) alcanzada durante el ensayo, se produce antes en el chopo que en el pino y en éste antes que en el haya, siendo la pérdida de peso (Pm) en este tiempo similar en las tres especies.
- La extinción de la llama (te), se produce primero en el chopo, luego en el pino y por último en el haya. En este tiempo las pérdidas de peso (Pe) son similares en las tres especies.

Por otra parte, la Tabla 8, refleja la comparación de medias según el test Duncan, efectuada al realizar el cálculo de las áreas bajo las curvas de temperatura-tiempo y temperaturas máximas obtenidas para cada una de las especies ensayadas. Esta Tabla indica que durante los 20 minutos que dura el ensayo, la suma de temperaturas alcanzadas sigue el orden haya > pino > chopo. Asimismo, es el haya la especie que desarrolla la temperatura más elevada.

DISCUSION

El pino y el haya tardan el doble de tiempo en inflamarse que el chopo a pesar de que en este tiempo las tres especies experimentan pérdidas de peso similares (10 p. 100 de pérdida de peso respecto a su valor inicial).

En el haya la propagación de la llama, desde que se inicia la inflamación hasta que la llama cubre el total de la superficie de madera (ts-ti) es más lenta (363 s) que en el resto de las especies (274 s en chopo y 315 s en pino), siendo su pérdida de peso algo menor que en las otras especies (21 p. 100 frente al 28 p. 100 y 27 p. 100 en chopo y pino respectivamente).

El tiempo para que se alcance la altura máxima de llama es aproximadamente 1,5 veces menor en el chopo que en el haya y pino, siendo en este tiempo cuando la madera pierde cerca de la mitad de su peso inicial, cualquiera que sea la especie considerada.

La especie que más tiempo permanece en combustión con llama es el haya y la que menos el chopo, teniendo pérdidas de peso similares las tres especies en éste tiempo. De acuerdo con Tang (1967) al final del proceso de pirólisis sólo queda un resto sólido del 20 p. 100 del peso inicial.

Durante el proceso de reacción al fuego la suma de temperaturas alcanzada por el haya es dos veces superior al chopo y aproximadamente vez y media superior al pino.

TABLA 9
AREA BAJO LAS CURVAS DE TEMPERATURA-TIEMPO
Y TEMPERATURAS MAXIMAS ALCANZADAS
EN HAYA, PINO Y CHOPO

Area under the curve temperature-time of beech, pine and poplar

Especie	Area	T máxima
Haya	1.701 a	156 a
Pino	1.215 b	109 c
Chopo	894 c	126 b

Dentro de cada columna los valores seguidos de distinta letra son diferentes al nivel del 1 p. 100 según el test Duncan

CONCLUSIONES

El haya es la especie estudiada que más resistencia opone a la combustión teniendo el proceso más lento y desarrollando un promedio de temperaturas más elevado que las otras especies, desde que se inicia la inflamación hasta que la combustión con llama finaliza, siendo el chopo la especie que más fácilmente entra en combustión con un proceso más rápido y un promedio de temperaturas inferior. Esto nos lleva al ya conocido hecho de que las maderas más densas y pesadas, a causa de su poder calorífico son mejores combustibles pero oponen mayor resistencia a la combustión que las más ligeras (Kollmann, 1959).

El trabajo desarrollado prueba que la medida de la pérdida de peso con el tiempo, de la madera sometida al ensayo de reacción al fuego anteriormente descrito, permite evaluar el comportamiento de la madera frente al fuego de manera extensa y precisa.

A partir de los datos experimentales se ha llegado a una ecuación matemática que permite estudiar la reacción al fuego de este material con tan sólo registrar la pérdida de peso a lo largo del tiempo.

El método del quemador expuesto en este trabajo, reúne una serie de características propias que le hacen distinto de los demás métodos existentes, permitiendo una amplia información acerca del proceso de reacción al fuego, de forma que se puede valorar el comportamiento de la madera en cualquier punto del proceso pirólisis-combustión implicado en la reacción al fuego. Esta evaluación servirá de partida, para en trabajos posteriores determinar la influencia de diversos ignífugos en la reacción al fuego de la madera.

SUMMARY

A simple method for assessing the behavior of wood in fire

The method described is simple and efficient, based on a control of the weight loss experienced by wood when subjected to a source of heat. It determines the basic phenomena involved in wood reaction to fire tests.

The percentage of loss weight, in accordance with the testing time of the particular wood, is estimated by a mathematical model which quantifies the above mentioned phenomena, thus enabling studies and comparisons of the behaviour of different species of wood when subjected to fire (poplar, pine and beechwood).

KEY WORDS: Reaction to fire
Weight Loss
Poplar
Pine
Beech

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- CALVO HARO R., GONZALEZ-ANDUJAR J. L., GARCIA-VALCARCEL A. I., 1989. A new asymptotic model for weight loss in wood treated with salts as combustion retardants. Spanish Bio-metric Conference. September 1989.
- GARCIA-VALCARCEL A. I., NAVARRO J., 1991. Patente de invención P 9101003. INIA.
- KOLLMANN F., 1959. Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Tomo I. 278-281. IFIE.
- Norma ASTM E-69, 1969. Standard method of test for combustible properties of treated wood by the fire tube apparatus.
- Norma ASTM E-136, 1965. Standard method of test for noncombustibility of elementary materials.

- Norma ASTM E-162, 1967. Standard method of test for surface flammability of materials using a radiant heat energy surface.
- Norma ASTM E-286, 1969. Standard method of test for flammability of building materials an 8-ft (2,44 m) tunnel.
- Norma BS-476: Part 7, 1971. Fire test on building materials and structures: surface spread of flame test materials.
- Norma DIN 4102-Teil 4, 1981. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Baustoffe Begriffer, Anforderungen und Prüfungen.
- Norma NF P92-501, 1985. Essais de réaction au feu des matériaux.
- Norma UNE 23-721, 1991. Ensayos de reacción al fuego de los materiales de construcción. Ensayo por radiación aplicable a los materiales rígidos o similares (materiales de revestimiento) de cualquier espesor y a los materiales flexibles de espesor superior a 5 mm.
- TANG W. K., 1967. Effect of inorganic salts on pyrolysis of wood, alpha-cellulose and lignin determined by dynamic thermogravimetry. U.S. Forest Service, Fos. Prod. Lab, Research Paper FPL 71, 16 p.