

TRABAJO FINAL DE GRADO  
(2015-2016)  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA  
GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA

LA MADERA.  
COEFICIENTE DE ADSORCIÓN.  
VARIACIÓN SEGÚN LA ESPECIE.

SANDRA GÓMEZ FERRER  
TUTOR: JAVIER BENLLOCH MARCO  
CO-TUTORES: JUAN SOTO CAMINO, JOSÉ MANUEL GANDÍA ROMERO



## **RESUMEN**

El presente estudio tiene como objeto determinar y comparar la velocidad de adsorción de la humedad en distintos tipos de madera.

Hasta ahora se han desarrollado muchos estudios mediante ensayos no destructivos sobre la adsorción de la humedad por la madera. En este proyecto se presenta un método no destructivo poco desarrollado mediante la continuación de la Tesis final de máster realizada por Joaquín Latorre Aguilera (2014-2015), realizando estos mismos ensayos en otros tipos de madera y comparándolos entre ellos y con los ya evaluados anteriormente.

En el proyecto se trata de reflejar la influencia de la humedad en dos tipos de madera, cuando a estos se les va aplicando un porcentaje de humedad constante. Las dos maderas estudiadas en este caso serán la Mobila y el Oregón; posteriormente serán comparadas con Pino Silvestre y Lauan que en un trabajo previo fueron objeto de estudio (Joaquín Latorre,2014).

La técnica utilizada se trata de aplicar a cada probeta un contenido de humedad constante (79-100%); anotando el peso, la humedad y la temperatura (25-31°C) cada cierto tiempo.

Este trabajo tiene el interés práctico de que servirá para clasificar las maderas a través de un método sencillo para obra.

## **ABSTRACT**

The present study aims to determine and compare the rate of adsorption of moisture in different types of wood.

So far, many studies have been developed by non-destructive testing on the adsorption of moisture by the wood. In this project a nondestructive method undeveloped by continuing the final Master's thesis by Joaquín Latorre Aguilera (2014-2015), performing these same tests on other types of wood and comparing them among themselves and with the already previously evaluated.

In the project it seeks to reflect the influence of moisture in two types of wood, when these are going to apply them a constant moisture percentage. Both woods studied in this case will be the Mobila and Oregon; later they are compared with Pine Lauan and in previous work were studied ( Joaquin Latorre, 2014 ) .

The technique used is applied to each specimen constant moisture content (79-100%); scoring weight, moisture and temperature (25-31°C) from time to time.

This work has the practical interest that serve to classify the woods through a simple method to work.

## **OBJETIVOS**

- Adquirir una base de conocimientos acerca de la madera en la edificación y los ensayos no destructivos realizados sobre la madera.
- Realizar los ensayos de adsorción de humedad en diferentes probetas del tipo de madera seleccionada.
- Analizar los resultados obtenidos en los ensayos de Mobila y Oregón.
- Comparar dichos resultados entre ellos y con los obtenidos por Joaquín Latorre de Pino Silvestre y Lauan.

## ÍNDICE

- A. ÍNDICE
- B. ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICAS
- C. ÍNDICE DE TABLAS

## A. ÍNDICE

1.	INTRODUCCION .....	9
1.1.	Historia de la madera en la edificación .....	9
1.2.	Antecedentes .....	11
1.3.	Ensayos no destructivos (N.D.T).....	11
2.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
2.1.	Introducción .....	16
2.2.	Materiales .....	17
2.3.	Métodos .....	29
a.	Adsorción de humedad a corto plazo .....	29
b.	Adsorción de humedad a largo plazo.....	35
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
3.1.	Modelo .....	35
3.2.	Modelo a corto plazo con 3 variables. ....	38
3.3.	Modelo a largo plazo.....	40
3.4.	Modelo a corto plazo con 2 variables. ....	42
3.5.	Modelo a corto plazo con 1 variable.....	43
3.6.	Mejora del modelo.....	44
3.7.	Comparación de modelo .....	46
4.	COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	47
4.1.	Comparativa de probetas a corto plazo .....	47
a.	Comparativa de 3 probetas de Mobila.....	47
b.	Comparativa de 3 probetas de Oregón.....	48
c.	Comparativa de Mobila frente a Oregón .....	49
4.2.	Comparativa de probetas a largo plazo (con fórmula 3) .....	49
a.	Comparativa de 3 probetas de Mobila.....	49
b.	Comparativa de 3 probetas de Oregón.....	50
c.	Comparativa de Mobila frente a Oregón .....	51
d.	Comparativa de una probeta de Mobila, una de Oregón, una de Pino Silvestre y una de Lauan .....	51
5.	CONCLUSIONES .....	53
6.	AGRADECIMIENTOS.....	53
7.	BIBLIOGRAFÍA .....	54

## B. ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICAS

1.1.	Refugios de madera (C.Caballero Arce).....	9
1.2.	Posibles primeros refugios contruidos con ramas o troncos recogidos del suelo (C.Caballero Arce).....	9
1.3.	Madera estructural en nueva construcción (C.Caballero. Arce). ....	10
1.4.	Resistógrafo. ....	12
1.5.	Georradar. ....	13
1.6.	Georradar de una probeta de Oregón.....	13
1.7.	Penetrómetro. ....	14
1.8.	Xilohigrómetro.....	14
1.9.	Diferenciación de humedades por termografía. ....	15
1.10.	Máquina portátil de ultrasonidos. ....	15
1.11.	Máquina portátil de ondas inducidas.....	16
1.12.	Máquina de arranque de tornillos. ....	16
1.13.	Listones de madera seleccionados y numerados listos para cortar. ....	18
1.14.	Proceso de corte de las probetas de madera mediante la sierra de cinta.....	18
1.15.	Sierra de cinta para madera en el momento del corte y confección de las piezas.....	21
1.16.	Balanza de precisión utilizada durante todo el proceso de ensayo del proyecto.....	22
1.17.	Primera estufa de secado utilizada situada en el laboratorio de materiales.....	22
1.18.	Segunda estufa de secado situada en el laboratorio de materiales. ....	23
1.19.	Tercera estufa de secado situada en el laboratorio de electroquímica.....	23
1.20.	Desecador situado en el laboratorio de electroquímica.....	24
1.21.	Recipiente hermético. ....	24
1.22.	Cronómetro utilizado para medir los tiempos durante el ensayo a corto plazo. ....	25
1.23.	Testo 435 utilizado para medir la temperatura y la humedad durante el ensayo a corto plazo.....	25
1.24.	Bomba de aire utilizada para saturar el recipiente hermético de humedad. ....	26
1.25.	Borboteador. ....	26
1.26.	Calentador de agua junto al borboteador. ....	27
1.27.	Recipiente hermético y rejilla para realizar en ensayo a largo plazo.....	28
1.28.	Cámara climática situada en el laboratorio de electroquímica. ....	28
1.29.	Huawei P8 lite utilizado para la parte fotográfica.....	29

1.30.	Gráfica de los datos recogidos (M1A) del peso respecto al tiempo. ....	34
1.31.	Gráfica de los datos recogidos de M1A a corto plazo con 3 variables de Mi respecto al tiempo en segundos.....	40
1.32.	Gráfica de los datos recogidos de M1A a largo plazo de Mi respecto al tiempo en segundos. ....	41
1.33.	Gráfica de los datos recogidos de M1A a corto plazo con 2 variables de Mi respecto al tiempo en segundos.....	43
1.34.	Gráfica de los datos recogidos de M1A a corto plazo con 1 variable de Mi respecto al tiempo en segundos.....	44
1.35.	Gráfica de los datos recogidos de M1A a largo plazo de Mi respecto al tiempo en segundos. ....	46
1.36.	Gráfica comparativa de 3 probetas de Mobila del incremento de peso respecto al tiempo a corto plazo. ....	48
1.37.	Gráfica comparativa de 3 probetas de Oregón del incremento de peso respecto al tiempo a corto plazo. ....	48
1.38.	Gráfica comparativa de una probeta de Mobila y una probeta de Oregón del incremento de peso respecto al tiempo a corto plazo. ....	49
1.39.	Gráfica comparativa de 3 probetas de Mobila del incremento de peso respecto al tiempo a largo plazo.....	50
1.40.	Gráfica comparativa de 3 probetas de Oregón del incremento de peso respecto al tiempo a largo plazo.....	50
1.41.	Gráfica comparativa de una probeta de Mobila y una probeta de Oregón del incremento de peso respecto al tiempo a largo plazo.....	51
1.42.	Gráfica comparativa de una probeta de Mobila, una de Oregón, una de Pino Silvestre y una de Lauan. ....	52



### C. ÍNDICE DE TABLAS

1.1.	Dimensiones, volumen y peso inicial de las probetas de madera de Mobila. ....	19
1.2.	Dimensiones, volumen y peso inicial de las probetas de madera de Oregón. ....	19
1.3.	Dimensiones, volumen y peso de las probetas de Mobila elegidas para el ensayo a corto plazo y las elegidas para el ensayo a largo plazo. ....	20
1.4.	Dimensiones, volumen y peso de las probetas de Mobila elegidas para el ensayo a corto plazo y las elegidas para el ensayo a largo plazo. ....	20
1.5.	Pesos en gramos de las probetas de Mobila durante el proceso de secado. ....	30
1.6.	Pesos en gramos de las probetas de Oregón durante el proceso de secado. ....	30
1.7.	Primera toma de datos de una probeta de Mobila (M1A) a corto plazo. ....	33
1.8.	Datos recogidos directamente del ensayo a corto plazo, anotados en un documento Excel y posteriormente cálculo de otras incógnitas para averiguar el valor de K en función de otras variables, Mo y Ms. (3 variables) .....	38
1.9.	Datos recogidos directamente del ensayo a largo plazo, anotados en un documento Excel y posteriormente cálculo de otras incógnitas para averiguar el valor de K. ....	41
1.10.	Datos recogidos directamente del ensayo a corto plazo, anotados en un documento Excel y posteriormente cálculo de otras incógnitas para averiguar el valor de K en función de Mo. (2 variables) .....	42
1.11.	Datos recogidos directamente del ensayo a corto plazo, anotados en un documento Excel y posteriormente cálculo de otras incógnitas para averiguar el valor de K. (1 variables). ....	43
1.12.	Datos recogidos directamente del ensayo a largo plazo, anotados en un documento Excel y posteriormente cálculo de otras incógnitas para averiguar el valor de K. ....	45
1.13.	K de cada una de las probetas a corto plazo según el número de variables. ....	46
1.14.	K de cada una de las probetas ensayadas a largo plazo de ambos modelos. ....	47

## 1. INTRODUCCION

### 1.1. Historia de la madera en la edificación

La madera es un material utilizado como elemento estructural en la construcción de edificaciones y estructuras civiles. Su fácil manejo la ha convertido en el principal material estructural hasta la llegada del acero y el hormigón.

Ha acompañado al hombre desde su origen; su facilidad de acceso en la naturaleza, hizo de ella un material idóneo para la construcción de los primeros refugios. De estas primeras construcciones lamentablemente, pocos restos arqueológicos han llegado hasta nuestros días, únicamente en contados casos en los que la madera se ha conservado en condiciones ambientales favorables. La fácil combustión de la madera favoreció la aparición de otros materiales como el adobe, la arcilla cocida y la piedra.



1.1. Refugios de madera.



1.2. Posibles primeros refugios contruidos con ramas o troncos recogidos del suelo.

En algunos países del centro y del norte de Europa así como en Norteamérica la madera continua siendo el principal material de construcción ya que está muy valorada por sus cualidades isotérmicas. Sin embargo en España la falta de empleo de

la madera venía provocada por la falta de normativa y certificados de calidad que dieran seguridad al calculista y al usuario.

En rehabilitación de edificios y estructuras, los profesionales cada vez están más concienciados para restaurar los elementos de madera mediante métodos lo menos invasivos posible, y sustituyendo por madera en buen estado únicamente aquellas piezas o aéreas que estén deterioradas. Anteriormente esta restauración se hacía mediante elementos metálicos poco respetuosos con las estructuras históricas que sobreviven en la actualidad.

En nueva construcción la madera está volviendo a ganar terreno en las estructuras. Las más comunes son aquellas de edificaciones unifamiliares, edificios públicos, comerciales o deportivos.



*1.3. Madera estructural en nueva construcción.*

La madera está lejos de ser una materia homogénea, sus defectos condicionan la resistencia mecánica y estructural. Los nudos son los principales defectos, estos tienen un efecto significativo en su resistencia mecánica, por lo que son tenidos en cuenta en la normativa de madera de diferentes países, las cuales establecen la clasificación de maderas estructurales y limitan los tamaños de los nudos según la RAN (razón de área nudosa).

Actualmente existe la tendencia generalizada de aplicar técnicas no destructivas o semi-destructivas para el análisis y evaluación del estado de la madera, siendo los más comunes el resistógrafo, ultrasonidos y arranque de tornillos.

## **1.2. Antecedentes**

Este estudio podría haberse realizado con multitud de maderas distintas, pero en este caso nos hemos centrado en la Mobila y el Oregón. Ambas maderas tienen características diferentes lo que hará que también tengan un comportamiento diferente frente a la adsorción de humedad.

Por un lado tenemos las probetas de Mobila. Se le da el nombre de Mobila a maderas de Pino amarillo del Sur, Pino Melis o Pino Tea o Pino melis. Esta madera presenta una textura característica, y una gama de colores variados: la madera de albura tiene un color que varía desde el blanco hasta el amarillo pálido o naranja claro; el duramen se diferencia bastante bien, ya que tiene un color que varía del amarillo anaranjado al marrón rojizo o marrón claro. Es además una madera de fibra muy recta, y calificada como semidura-dura.

En segundo lugar tenemos las probetas de Oregón. Esta puede calificarse como de excelente calidad, y de hecho se importa de Norteamérica bajo esa misma denominación (pino de Oregón, también conocido como pino Douglas). El pino de Oregón tiene duramen rojizo y albura clara. En ejemplares de edad avanzada el duramen ocupa la mayor parte de la sección. Los anillos de crecimiento son muy visibles, y con una adecuada selvicultura son muy homogéneos. La densidad es aproximadamente de 0,55 tm/m<sup>3</sup>, superior a la mayoría de las coníferas de interés comercial. Los porcentajes de corteza son relativamente reducidos. La madera tiene excelentes cualidades tecnológicas, incluso cuando el árbol ha crecido muy rápidamente.

## **1.3. Ensayos no destructivos (N.D.T)**

Actualmente existen diferentes tipos de ensayos no destructivos sobre la madera para conocer el comportamiento y la estructura de la madera frente a la adsorción de humedad.

En este proyecto se desarrolla un método no convencional utilizado por Joaquín Latorre para la realización de su tesis final de máster. Repetimos el trabajo de Joaquín Latorre para observar si el método permite discriminar el tipo de madera por su coeficiente de adsorción, para así caracterizarlas en obra.

Este estudio trata de introducir una probeta en un recipiente hermético con características de temperatura y humedad constante e ir estudiando el aumento de peso a lo largo del tiempo debido a la adsorción de humedad.

Los ensayos convencionales que se habían realizado hasta ese momento son:

*-Resistógrafo*

*-Georradar*

-Penetrómetro

-Xilohigrómetro

-Termografía

-Máquina portátil de ultrasonidos

-Máquina portátil de ondas inducidas

-Máquina de arranque de tornillos

#### Resistógrafo

Trata de un taladro mecánico que realiza una perforación de 3mm de diámetro perpendicularmente a las superficies estudiadas y evalúa la resistencia de la perforación. Además del instrumento de perforación, el georradar tiene una unidad electrónica que almacena los datos en la memoria y al mismo tiempo una impresora reproduce el valor en tanto por ciento de la resistencia a la penetración. La resistencia a la perforación se mide mediante el consumo de potencia.



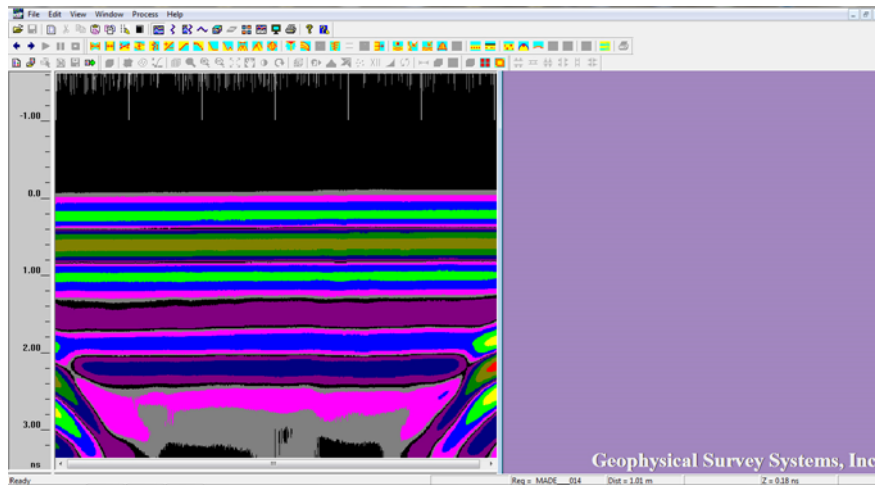
1.4. Resistógrafo.

#### Georradar

Es un método que utiliza la radiación electromagnética en el espectro de las microondas. Consta de una antena con emisor y receptor variable, en la madera tiene una frecuencia habitualmente de 1,6 GHz.



1.5. Georradar.



1.6. Georradar de una probeta de Oregon.

### Penetrómetro

Ensayo que permite estimar la dureza o estado patológico superficial de la madera mediante un impacto realizado por una barra circular de 2,5 mm de diámetro, accionada por un resorte que produce una energía de 6 Julios, clavándose en la madera a una profundidad que depende de la dureza y la densidad de cada tipo de madera.



1.7. Penetrómetro.

### Xilohigrómetro

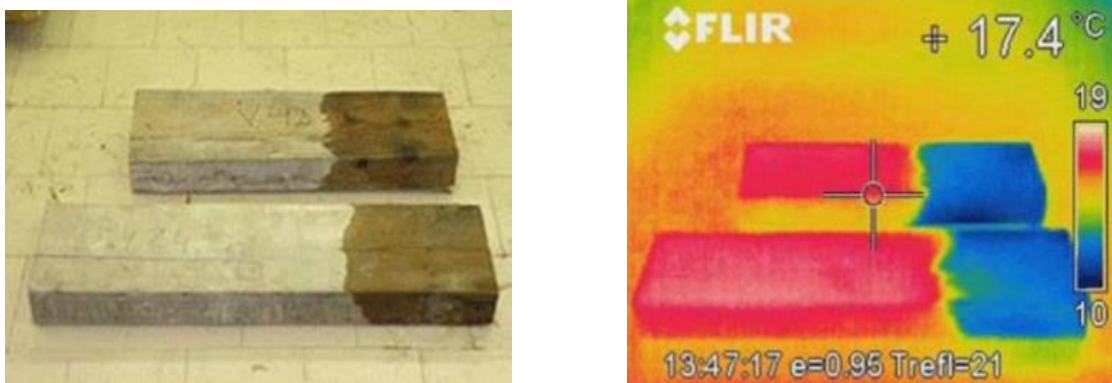
Instrumento de medición que se utiliza para determinar la humedad superficial que penetra en la madera. Se usa normalmente de forma previa en cada una de las probetas que se van a analizar.



1.8. Xilohigrómetro.

### Termografía

Se utiliza para diferenciar zonas húmedas de zonas secas ya que detecta diferencias de temperatura muy precisas. Con la termografía podemos ver mediante infrarrojos donde se encuentra la humedad en nuestra probeta.



1.9. Diferenciación de humedades por termografía.

### Máquina portátil de ultrasonidos

Aparato portátil que se utiliza para la medición de tiempos de transmisión de ultrasonidos con palpadores cónicos, sonda de temperatura y contenido de humedad específicamente desarrollado para la madera. Además incluye un software para procesar los datos y estimar el módulo de elasticidad, resistencia a flexión y calidad de la madera. La frecuencia de los ultrasonidos es de 22 MHz.

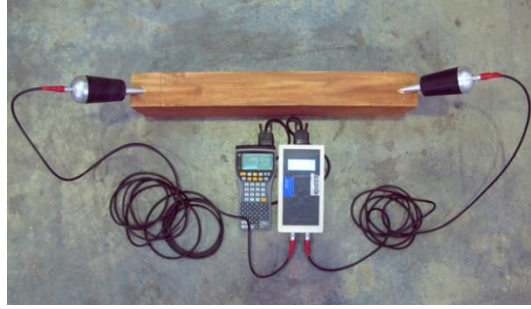


1.10. Máquina portátil de ultrasonidos.

### Máquina portátil de ondas inducidas

Sirve para medir el tiempo que tardan las ondas inducidas en atravesar en material ensayado. La frecuencia de las ondas generadas, según los datos del fabricante, es de 1-2 Hz. La señal se genera mediante un golpeo del martillo en el sensor de salida de la vibración. En la pantalla aparece el tiempo que tarda en llegar la vibración al sensor receptor.





1.11. Máquina portátil de ondas inducidas.

### Máquina de arranque de tornillos

Es una técnica de ensayo pseudo no destructivo, ya que produce un pequeño orificio en la madera donde se realiza el ensayo. Trata de introducir un tornillo en una probeta para posteriormente arrancarlo con el extractor.



1.12. Máquina de arranque de tornillos.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Introducción**

El presente estudio se centra en una forma de analizar la adsorción de humedad por parte de probetas de madera. Realizando dos tipos de ensayos que siguen el mismo procedimiento.

El primer ensayo trata de averiguar la velocidad de adsorción de humedad que tienen unas probetas a corto plazo, de forma continua (alrededor de una hora por ensayo). El segundo ensayo tiene el mismo objetivo pero a largo plazo, es decir, manteniendo las mismas condiciones, averiguar el comportamiento de las probetas ante la adsorción de humedad constante (en nuestro caso 14 días).

En el primer ensayo se pretende que las muestras lleguen a un peso constante mediante una estufa de secado. A continuación se introducen en un desecador para

enfriarlas sin que adsorban humedad ambiental. Más tarde se introducen en un recipiente hermético, dónde se estudia la evolución del peso con condiciones de humedad y temperatura constantes. Se tendrá en cuenta el tiempo, el incremento de peso (14 puntos que son los necesarios para darle fiabilidad al estudio, ya que 7 puntos son los mínimos), la temperatura interior (25-31°C), la humedad interior (79-100%). Se han realizado dos ensayos de cada una de las probetas para verificar que haya correlación entre ellos y teniendo en cuenta que si existía algún desequilibrio entre los dos ensayos, habría que realizar un tercero de esa misma probeta.

En el procedimiento del segundo ensayo, se observa la adsorción de la humedad de siete probetas de cada tipo en el interior de una cámara climática. Se realiza un seguimiento durante 14 días, para ver el porcentaje de humedad que ha recogido y el comportamiento de cada tipo.

Finalmente, a través de estas técnicas de adsorción de humedad se obtendrán muchos datos que posteriormente trataremos para representarlo en las gráficas y obtener el modelo cinético.

## **2.2. Materiales**

### -Probetas:

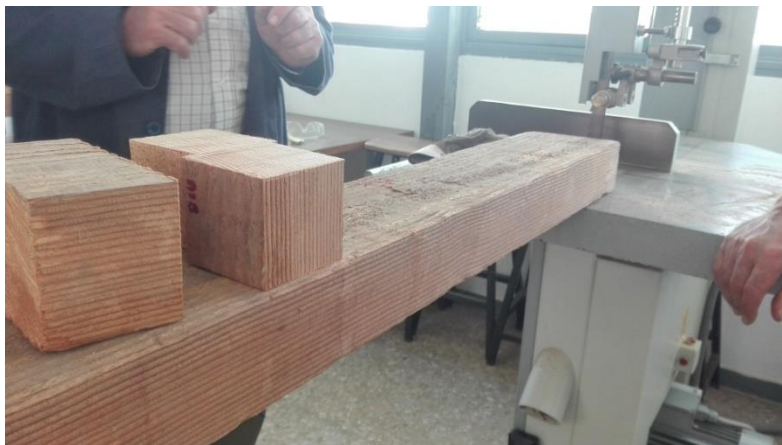
El material utilizado en este estudio es la madera. Tenemos dos tipos de probetas, por un lado las probetas de Mobila (M) y por otro lado las probetas de Oregón (O).

De todas las piezas que habían en el laboratorio de materiales escogimos las que mejor aspecto superficial tenían, ya que muchas de ellas contenían gran variedad de nudos que hacían que la probeta tuviera distinto comportamiento superficial, es decir, son probetas libres de defectos las que empleamos para los ensayos.

A continuación procedimos a cortar las piezas elegidas mediante una sierra de cinta para madera y así obtener nuestras probetas que iban a ser ensayadas posteriormente.



1.13. Listones de madera seleccionados y numerados listos para cortar.



1.14. Proceso de corte de las probetas de madera mediante la sierra de cinta.

Las dimensiones iniciales de todas las probetas recogidas directamente del laboratorio de maderas, son las que aparecen en las siguientes tablas:

MOBILA					
Nombre	Dimensiones (cm)			Volumen	Peso
	Ancho(A)	Largo(B)	Alto(H)	(cm <sup>3</sup> )	(g)
M1A	7,1	7,1	7,5	378,08	226,49
M1B	7,2	7,1	7,5	383,40	215,72
M1C	7	7,4	7,5	388,50	229,23
M1D	7,4	7,4	7,5	410,70	222,22
M2A	7,2	7,4	7,3	388,94	242,29
M2B	7,4	7,4	7,3	399,75	236,31
M2C	7,3	7,2	7	367,92	236,49
M2D	7,4	7,4	7	383,32	238,94
M3A	7,1	7,4	7,8	409,81	232,28
M3B	7	7,4	7,8	404,04	228,23
M3C	6,9	7,4	7,8	398,27	226,61
M3D	7,2	7,5	7,8	421,20	236,04
M3E	6,9	7,4	7,8	398,27	235,59
M3F	7,4	7,4	7,8	427,13	234,78

1.1. Dimensiones, volumen y peso inicial de las probetas de madera de Mobila.

OREGÓN					
Nombre	Dimensiones (cm)			Volumen	Peso
	Ancho(A)	Largo(B)	Alto(H)	(cm <sup>3</sup> )	(g)
O1A	6,7	7,4	7	347,06	219,62
O1B	7,4	7,4	7	383,32	241,19
O2A	6,7	7,4	7,5	371,85	223,75
O2B	7,2	7,4	7,6	404,93	223,02
O3A	6,7	7,4	7,4	366,89	233,91
O3B	7,3	7,5	7,4	405,15	245,51
O4A	7,1	7,4	7,4	388,80	220,14
O4B	7	7,5	7,4	388,50	204,61
O5A	6,5	7,4	7,1	341,51	221,11
O5B	7,3	7,5	7,1	388,73	251,92
O6A	6,7	7,4	7,4	366,89	243,21
O6B	7,4	7,4	7,4	405,22	255,14
O7A	6,9	7,4	7,4	377,84	241,10
O7B	7,4	7,4	7,4	405,22	256,52

1.2. Dimensiones, volumen y peso inicial de las probetas de madera de Oregón.

Posteriormente decidiremos cuáles de nuestras probetas van a ser utilizadas para cada tipo de ensayo. En las siguientes tablas representamos en gris las elegidas para el ensayo a corto plazo y en blanco aquellas para realizarlo a largo plazo:

MOBILA					
Nombre	Dimensiones (cm)			Volumen	Peso
	Ancho(A)	Largo(B)	Alto(H)	(cm <sup>3</sup> )	(g)
M1A	7,1	7,1	7,5	378,075	226,49
M1B	7,2	7,1	7,5	383,40	215,72
M1C	7	7,4	7,5	388,5	229,23
M1D	7,4	7,4	7,5	410,7	222,22
M2A	7,2	7,4	7,3	388,944	242,29
M2B	7,4	7,4	7,3	399,75	236,31
M2C	7,3	7,2	7	367,92	236,49
M2D	7,4	7,4	7	383,32	238,94
M3A	7,1	7,4	7,8	409,812	232,28
M3B	7	7,4	7,8	404,04	228,23
M3C	6,9	7,4	7,8	398,268	226,61
M3D	7,2	7,5	7,8	421,20	236,04
M3E	6,9	7,4	7,8	398,268	235,59
M3F	7,4	7,4	7,8	427,128	234,78

1.3. Dimensiones, volumen y peso de las probetas de Mobila elegidas para el ensayo a corto plazo y las elegidas para el ensayo a largo plazo.

OREGÓN					
Nombre	Dimensiones (cm)			Volumen	Peso
	Ancho(A)	Largo(B)	Alto(H)	(cm <sup>3</sup> )	(g)
O1A	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
O1B	7,4	7,4	7	383,32	241,19
O2A	6,7	7,4	7,5	371,85	223,75
O2B	7,2	7,4	7,6	404,93	223,02
O3A	6,7	7,4	7,4	366,892	233,91
O3B	7,3	7,5	7,4	405,15	245,51
O4A	7,1	7,4	7,4	388,796	220,14
O4B	7	7,5	7,4	388,50	204,61
O5A	6,5	7,4	7,1	341,51	221,11
O5B	7,3	7,5	7,1	388,73	251,92
O6A	6,7	7,4	7,4	366,892	243,21
O6B	7,4	7,4	7,4	405,22	255,14
O7A	6,9	7,4	7,4	377,844	241,1
O7B	7,4	7,4	7,4	405,22	256,52

1.4. Dimensiones, volumen y peso de las probetas de Mobila elegidas para el ensayo a corto plazo y las elegidas para el ensayo a largo plazo.

-Instrumentación:

Todos los ensayos necesarios para el desarrollo de este proyecto de investigación se realizaron en el laboratorio de materiales y en el laboratorio de electroquímica.

La instrumentación utilizada que se describe a continuación pertenece al Departamento de Química que se encuentra en ETSIE.

Todos los instrumentos se encuentran calibrados conforme a los manuales de cada laboratorio.

a. Sierra de cinta para madera

Esta sierra se ha utilizado para dimensionar todas las probetas de madera que se han utilizado para los ensayos. Consiste en una cinta de acero dentada entre dos discos, uno de los cuales está unido a un dispositivo mecánico.



1.15. Sierra de cinta para madera en el momento del corte y confección de las piezas.

b. Balanza de precisión

Instrumento que sirve para medir la masa de las probetas. En este caso, hemos utilizado un modelo de balanza con una precisión de 0,1 gramos. Es una balanza que para su correcto funcionamiento, antes debemos equilibrarla con la ayuda de dos plataformas circulares situadas una en cada lado de su base. Para su correcto uso debemos girar las plataformas circulares hasta conseguir que la burbuja que aparece en la parte superior, se quede en el centro del círculo, eso nos garantiza que la balanza

está equilibrada, y que podemos comenzar a pesar. Además posee una pantalla digital donde aparece el peso en gramos.



1.16. Balanza de precisión utilizada durante todo el proceso de ensayo del proyecto.

### c. Estufa de secado

Es una cámara idónea para las aplicaciones de calentamiento y secado habituales en las que se requiere periodos de secado cortos.

Contiene un termostato regulador de temperatura, y termómetro analógico. Temperaturas regulables de 40°C a 250°C. Precisión de 0,5°C.

Para este proyecto utilizamos tres estufas de secado diferentes. Dos para secar las probetas en el laboratorio de materiales, ya que la primera que se utilizó se estropeó. Posteriormente cuando empezamos a realizar los ensayos en el laboratorio de electroquímica las trasladamos a una estufa situada en este para una mayor facilidad de trabajo.



1.17. Primera estufa de secado utilizada situada en el laboratorio de materiales.



1.18. Segunda estufa de secado situada en el laboratorio de materiales.



1.19. Tercera estufa de secado situada en el laboratorio de electroquímica.

#### d. Desecador

Es un instrumento de laboratorio, fabricado con vidrio que se utiliza para retirar la humedad de las sustancias. Su tapa es de vidrio esmerilado para que el cierre sea hermético. El interior está formado por dos partes, la parte superior más grande permite poner a secar la sustancia, y la otra cavidad es dónde colocamos el desecante, el más común es gel de sílice. Posee un grifo de cierre o llave de paso en la parte superior de la tapa, que permite la extracción de aire para poder dejarlo al vacío.





1.20. *Desecador situado en el laboratorio de electroquímica.*

e. Recipiente hermético

El recipiente utilizado se ha reconvertido en cámara hermética. Como se aprecia en la imagen, para conseguir que fuera totalmente hermética se le introdujo un tira de neopreno en los bordes del recipiente, teniendo que mejorarla varias veces y se selló mediante cinta aislante. Dimensiones perfectas para que se pudiera introducir en el interior la balanza.



1.21. *Recipiente hermético.*

f. Cronómetro

Reloj de gran precisión que permite medir intervalos de tiempo muy pequeños, hasta fracciones de segundo. Este cronómetro se ha utilizado para recoger los tiempos a los

que tomábamos los datos de temperatura, humedad y peso de cada una de las probetas ensayadas.



1.22. Cronómetro utilizado para medir los tiempos durante el ensayo a corto plazo.

#### g. Testo 435

El Testo 435 es un instrumento de medición compacto multifunción para medir temperatura, humedad y caudal. Fue diseñado para medir las condiciones ambientales de estancias. En mis ensayos, se ha utilizado para saber la humedad y la temperatura interna de la zona de estudio, en este caso el interior de un recipiente hermético.

Modelo: Testo 435 Instrumento de medición multifunción. Está compuesto por dos partes como se observa en la imagen. Por un lado tenemos el visualizador y por otro la sonda.

Funciona colocando la sonda en el interior de un recipiente cerrado, de forma inalámbrica, mediante el visualizador recogemos todos los datos. Estos se almacenan en el interior, y se pueden imprimir. En nuestro caso, solo apuntaba los datos recogidos para pasarlos al programa informático.

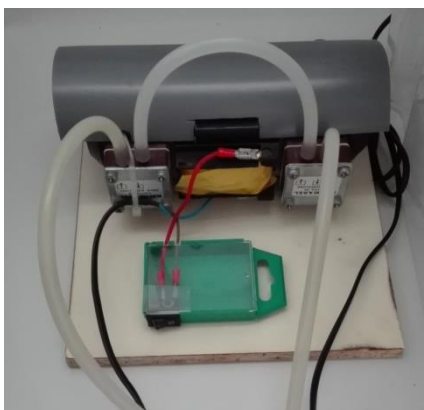


1.23. Testo 435 utilizado para medir la temperatura y la humedad durante el ensayo a corto plazo.

#### h. Bomba de aire

El funcionamiento de la Bomba de aire es de circuito cerrado. La bomba tiene cuatro tubos, el aire entra y sale de derecha a izquierda. La bomba tiene un motor que al

enchufarlo a la corriente eléctrica es el que hace que adsorba aire por un extremo y lo expulse por el otro.



1.24. Bomba de aire utilizada para saturar el recipiente hermético de humedad.

i. Borboteador. Tubo de conexión

Las conexiones entre el recipiente hermético, la bomba y el borboteador, se realizan mediante un tubo de plástico semitransparente. Como se aprecia en la imagen. El borboteador es una pieza de vidrio que tiene un tapón rojo, que lo cierra herméticamente.

Funcionamiento: en la parte superior tiene dos orificios, uno de entrada y otro de salida. Se llena la mitad de agua, se cierra con el tapón. Cuando se pone en funcionamiento la bomba, el borboteador adsorbe aire por uno de los orificios, generando burbujas en el interior, formando vapor de agua, que sale por el otro orificio, en dirección al recipiente hermético, por mediación de los tubos.



1.25. Borboteador.

j. Calentador de agua

Está formado por un recipiente de plástico lleno de agua, el termostato con pantalla digital y un motor sumergido en el agua. Mediante la pantalla modificamos la temperatura a la que queremos el agua del interior del recipiente, el motor se pone en funcionamiento y hace que la temperatura del agua interna, se mantenga a la temperatura que marca el termostato digitalmente. El baño termostático en este estudio se ha introducido para que el borboteador mantenga una temperatura constante e igual que el interior del recipiente.



1.26. Calentador de agua junto al borboteador.

XIII. Metro. Tijeras. Cinta americana

El metro se ha utilizado para dimensionar todas las probetas de madera. Las tijeras se han utilizado para cortar la cinta americana. Esta se ha utilizado para conseguir que el recipiente fuera totalmente hermético.

XIV. Elementos de anotación y recogida de datos

Libreta para anotar los datos. Posteriormente, con la ayuda de un ordenador portátil, los pasamos a un programa informático, para crear tablas y gráficas, Excel (Paquete Microsoft Office 2010).

XV. Recipiente hermético y rejilla

El recipiente en este caso, es opaco y contiene en su interior una rejilla de 3cm de altura que ocupa toda la base. Este recipiente se utiliza para seguir el incremento de humedad de dos probetas en el interior de la cámara. El recipiente tiene una capacidad de 20L y unas dimensiones 25x40x20cm.



1.27. Recipiente hermético y rejilla para realizar en ensayo a largo plazo.

### III. Cámara climática

La cámara climática empleada para el acondicionamiento de las probetas está situada en el laboratorio del Departamento de Química de la ETSIE. Sus dimensiones son: 284x177x290cm. Posee un cuadro digital desde donde se controla la temperatura del interior de la cámara.



1.28. Cámara climática situada en el laboratorio de electroquímica.

## XVI. Cámara fotográfica

El material fotográfico utilizado en todo el proyecto ha sido la cámara del móvil. Modelo Huawei P8 lite. Cámara de 13Megapixels.



1.29. Huawei P8 lite utilizado para la parte fotográfica.

## 2.3. Métodos

### a. Adsorción de humedad a corto plazo

En primer lugar se procedió a la selección de varias muestras de madera de Mobila y Oregón, los dos tipos seleccionados para el estudio. Posteriormente se cortaron en forma de probeta cúbica mediante la sierra de cinta y se procedió a identificar, dimensionar y pesar todas las probetas escogidas. Para el estudio, escogimos 14 probetas de cada uno de los tipos de madera.

Antes de proceder al estudio en sí y después de ser pesadas y medidas cada una de ellas, se colocaron todas las probetas en una estufa del laboratorio de materiales a una temperatura constante de 70°C para ir viendo su pérdida de peso continua hasta llegar a un peso constante, este fue el momento en el que pudimos empezar a realizar los ensayos de adsorción de humedad. Durante este tiempo de secado fuimos anotando los pesos de cada una de las probetas para detectar cuando el peso era constante. Estos datos los recogemos en la siguiente tabla:

	03/05/2016	04/05/2012	08/05/2012	09/05/2012	12/05/2012	16/05/2012
M1A	226,49	213,06	212,55	207,57	206,01	206,13
M1B	215,72	202,78	201,84	197,67	196,19	196,4
M1C	229,23	215,11	214,52	209,86	208,37	208,58
M1D	222,22	208,51	208,25	203,27	201,84	202,04
M2A	242,29	229,5	228,29	223,91	222,17	222,09
M2B	236,31	223,63	222,61	218,45	216,66	216,77
M2C	236,49	223,36	222,36	218,15	216,55	216,47
M2D	238,94	225,54	224,79	220,77	218,99	219,19
M3A	232,28	218,21	217,5	212,7	211,25	211,34
M3B	228,23	214,32	213,7	208,92	207,42	207,05
M3C	226,61	212,54	212,2	207,5	205,99	206,11
M3D	236,04	221,51	220,99	216,06	214,48	214,6
M3E	235,59	220,54	220,51	215,84	214,2	214,35
M3F	234,78	220,22	219,74	214,88	213,58	213,57

1.5. Pesos en gramos de las probetas de Mobila durante el proceso de secado.

	03/05/2012	04/05/2012	08/05/2012	09/05/2012	12/05/2012	16/05/2012
O1A	219,62	206,56	205,11	201,05	199,53	199,49
O1B	241,19	226,3	225,85	220,58	218,81	218,73
O2A	223,75	209,66	209,13	205,21	203,74	203,88
O2B	223,02	209,92	208,92	204,55	202,91	203,04
O3A	233,91	219,46	219,09	214,56	212,91	213,05
O3B	245,51	230,49	230,13	224,82	223,22	223,32
O4A	220,14	206,8	206,16	201,67	200,28	200,3
O4B	204,61	192,22	191,61	187,59	186,53	186,41
O5A	221,11	207,61	206,7	202,36	200,88	201,07
O5B	251,92	237,15	236,36	231,45	229,27	229,58
O6A	243,21	228,27	227,77	222,83	220,86	220,99
O6B	255,14	239,69	238,62	233,32	231,44	231,53
O7A	241,1	226,75	225,73	220,76	218,92	219,15
O7B	256,52	241,42	240,2	235,25	233,24	233,38

1.6. Pesos en gramos de las probetas de Oregón durante el proceso de secado.

Como podemos observar en las tablas anteriores, las probetas tardaron aproximadamente 13 días en tener un peso constante. Se escogió la temperatura de 70°C para evitar que la resina de la propia madera saliese por los nudos en abundancia ya que esto produciría un cambio en la capilaridad de la probeta e impediría el estudio posterior. Aun así en algunas de las probetas salió algo de resina al exterior.

Con todo esto y teniendo en cuenta los cambios que tuvo que realizar Joaquín Latorre cuando hizo este tipo de ensayo, se ha procedido a determinar un plan inicial.

El hecho de que este fuese un ensayo que se había realizado anteriormente nos facilitó en gran parte el trabajo, ya que nos ahorramos toda la fase inicial, siendo las mejoras que tuvimos que realizar escasas.

En primer lugar he conseguido toda la instrumentación necesaria y traslado las probetas a una estufa del laboratorio de química para facilitar el manejo. Es importante tener todos los elementos que he utilizado en el ensayo cerca: la estufa, el desecador y el instrumento de medición. Con este recipiente fijo al lado de la estufa se ha colocado una balanza en su interior. Cada vez que se iba a realizar el ensayo de una probeta se ha verificado que la balanza estuviese totalmente equilibrada.

Plan inicial de ensayo de adsorción a corto plazo:

1. Inicialmente se han escogido varias muestras de cada tipo de madera a ensayar.
2. A continuación, se han cortado las muestras en forma de cubos; es decir, 14 probetas de cada tipo aunque luego solo elegimos 7 para este tipo de ensayo. Al cortarlas obtenemos probetas cúbicas de aproximadamente 8 cm de lado (datos de las tablas del punto 2.2). Decidimos cortar las probetas de estos tamaños para que fuesen fácilmente manejables y tuviesen las dimensiones adecuadas para poder utilizar la instrumentación facilitada por el laboratorio sin problema.
3. Se metieron todas las probetas en una estufa a temperatura constante de 70°C.
4. En un recipiente de plástico transparente y hermético, introducir una balanza. Además se conecta una bomba con un borboteador para introducir vapor de agua de forma continuada. El proceso empieza cerrando el recipiente totalmente y encendiendo la bomba.  
A continuación el aire que está dentro del recipiente es absorbido por el conducto mediante una bomba de aire, que pasa directamente a un borboteador. Este borboteador genera vapor de agua, que directamente introduce al interior del recipiente nuevo. Es un circuito cerrado, en el que absorbe aire interno sustituyéndolo por vapor de agua de forma continua. Además disponemos de un calentador de agua, colocado sobre un recipiente de poliestireno expandido donde dentro depositamos agua, el aparato que calienta se encuentra en la parte superior. Este aparato tiene unos botones donde ponemos la temperatura que queremos, y a su vez, el calentador hace que el agua del interior tenga la temperatura marcada. Con esto se consigue que el borboteador mantenga la temperatura que deseamos, que es la del interior del recipiente.
5. Mientras el recipiente hermético se llena de humedad, desecar las probetas, 2 horas como mínimo, introduciéndolas en un recipiente de humedad controlada.



6. Introducir cada probeta, una a una, en el recipiente hermético con humedad controlada para realizar el estudio de la evolución del peso respecto al tiempo. Esto se realiza poniendo la probeta sobre la báscula que se encuentra en el interior del recipiente y tomando datos de humedad temperatura y peso cada cierto tiempo de la probeta que estamos ensayando.
7. Todas estas evoluciones se han anotado para posteriormente, con ayuda de un programa informático, obtener unas tablas y gráficas con las que poder sacar conclusiones.

El procedimiento a partir de este momento es el siguiente:

-Se saca la probeta de la estufa una vez está a peso constante.

-Se introduce la probeta en el desecador al menos 2 horas para conseguir que la probeta se enfríe sin que coja humedad ambiental.

-Se procede a extraer la probeta del desecador, inmediatamente abrir el recipiente, introducir la probeta en el interior, cerrar el recipiente y encender el cronómetro.

En este punto surgieron algunos problemas ya que no conseguíamos obtener la humedad necesaria para comenzar el ensayo. Para solventarlo añadimos un vaso con agua en el interior del recipiente hermético y sellamos más el recipiente con neopreno y cinta aislante.

-Una vez conseguida la humedad requerida (70-100%), se ha ido anotando la subida de peso (en gramos) cada 5 minutos aproximadamente para luego pasarlo a un programa informático y poder sacar las respectivas conclusiones. Con la siguiente estructura:

Nº	t (seg)	HR (%)	T (°C)	vt	P (gr.)
----	---------	--------	--------	----	---------

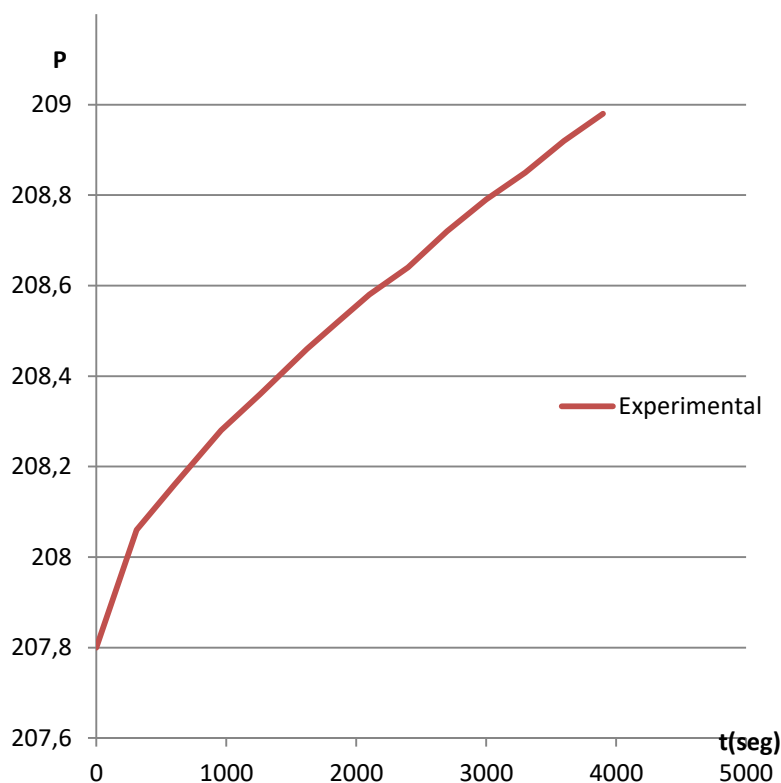
A continuación se muestra la primera toma de datos de Mobila (probeta M1A)

Nº	t (seg)	HR (%)	T (°C)	vt	P (gr.)
1	0	95	27,5	0,00	207,8
2	310	94,2	27,8	17,61	208,06
3	600	93,6	28	24,49	208,16
4	960	93,4	28,2	30,98	208,28
5	1260	92	28	35,50	208,36
6	1620	91,2	27,9	40,25	208,46
7	1860	91,5	27,9	43,13	208,52
8	2100	92,2	27,9	45,83	208,58
9	2400	92,5	28	48,99	208,64
10	2700	92,7	28,1	51,96	208,72
11	3000	93,1	28,2	54,77	208,79
12	3300	93,1	28,2	57,45	208,85
13	3600	93,1	28,3	60,00	208,92
14	3900	93,2	28,4	62,45	208,98

1.7. Primera toma de datos de una probeta de Mobila (M1A) a corto plazo.

**LEYENDA DE LA TABLA**

Nº	Es un número por el que llevar un orden según el tiempo.
t	Tiempo en segundos.
HR	Humedad relativa obtenida por el testeo.
T	Temperatura interior del recipiente también obtenida por el testeo.
vt	Incógnita para modelizar la fórmula final.
P	Peso de la probeta en gramos.



1.30. Gráfica de los datos recogidos (M1A) del peso respecto al tiempo.

Después de las modificaciones, podemos tomar como esquema final del procedimiento a corto plazo el siguiente:

- Secar las probetas elegidas en estufa (a 70°C) hasta llegar a peso constante.
- Introducir la parte inalámbrica del higrómetro en el interior del recipiente, encender la balanza y cerrar el recipiente herméticamente.
- Encender la bomba y el calentador de agua.
- Retirar tres probetas e introducirlas en el desecador durante al menos 2 horas.
- Pasadas las 2 horas, verificando que el higrómetro marca una humedad interna máxima (98% aproximadamente), se procede a introducir en el interior del recipiente una de las probetas, inmediatamente se cierra la tapa del recipiente y se enciende el cronómetro.
- Empezamos a apuntar datos, cada 5 minutos aproximadamente, obteniendo 14 puntos que posteriormente nos dará una gráfica que podremos analizar.
- Posteriormente en la hoja de Excel, donde vamos apuntando el tiempo, temperatura, humedad y peso, se añaden nuevas columnas con más información para

representarlos en forma de gráfica, interpretar los resultados y poder obtener unas conclusiones.

Este procedimiento se ha realizado con todas las probetas escogidas inicialmente. Se necesita precisión para ir haciendo varias cosas a la vez y no perder el tiempo, ya que son muchos ensayos, mucho tiempo y se debe coordinar muy bien.

### **b. Adsorción de humedad a largo plazo**

Durante el estudio individual de las piezas a corto plazo, 3 ensayos por probeta, se añade un nuevo estudio a largo plazo para ver el comportamiento tanto de Mobila como de Oregon. Este estudio consta de los siguientes pasos:

- En primer lugar se cogen las otras 7 piezas que habíamos secado en la estufa de cada tipo de madera.
- Paralelamente se prepara un recipiente de plástico hermético, se introduce en el interior una rejilla de un grosor aproximado de 3cm. Posteriormente se llena de agua hasta que cubra alrededor de 2 cm de la rejilla. Todo esto es para conseguir que en el recipiente haya una humedad aproximada del 100%.
- Para este procedimiento se cuenta con una cámara de grandes dimensiones que nos proporciona una temperatura constante de 30°C.
- Una vez preparado el recipiente en el interior de la cámara, se procede a retirar las muestras para posteriormente introducirlas inmediatamente en el recipiente cerrado herméticamente, a su vez esta caja se introduce en la cámara.
- A continuación se procede a sacar las muestras una o dos veces cada día para tomar datos. Durante 14 días.
- Se saca la muestra de la cámara, se pesa y se vuelve a introducir.

Al principio hay que ser constante e intentar coger el máximo número de puntos posible ya que normalmente al comienzo de la adsorción la velocidad es rápida. Conforme pasa el tiempo, la velocidad se va reduciendo hasta que se satura completamente y dejamos de ver cambios en el incremento del peso de cada una de las probetas.

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3.1. Modelo**

A partir de unos datos experimentales iniciales, se propone un modelo cinético en función de variables inicialmente conocidas en la madera. Obtendremos dos modelos cinéticos, los cuales probaremos y escogeremos el que más se ajusta a nuestros ensayos.

$$V_{\text{adsorción}} = \frac{dM_{H_2O}}{dt} = K \times \Delta M \times \sqrt{t}$$

$$\Delta \text{Masa} = M_{\text{saturada}} - M_{\text{instante}}$$

Dónde:

$M_i$  = Masa en un instante dado.

$M_o$  = Masa seca.

$M_s$  = Masa saturada.

PRIMER MODELO CINÉTICO

$$\rightarrow M_s - M_i = (M_s - M_o) \cdot e^{-K' \cdot t^{3/2}},$$

Dónde K y K' son constantes del tipo de madera.

$$M_i = M_s - (M_s - M_o) \times e^{-k' \times t^{3/2}}$$

$$\frac{dM}{dt} = K \cdot (M_s - M_i) \cdot \sqrt{t} \rightarrow \int \frac{dM}{(M_s - M_i)} = \int K \cdot \sqrt{t} dt$$

$$\text{Cambio de variables:} \begin{cases} z = M_s - M_i \\ dz = -dM \end{cases}$$

$$-\int_{z_0}^z \frac{dz}{z} = \int_{t=0}^t K \cdot \sqrt{t} dt \rightarrow \int_{z_0}^z \frac{dz}{z} = -\int_{t=0}^t K \cdot \sqrt{t} dt$$

$$\rightarrow \text{Ln} \frac{z}{z_0} = -\frac{3}{2} \cdot K \cdot t^{3/2} \rightarrow \text{dónde: } -\frac{3}{2} \cdot K = K'$$

$$\text{Ln} \frac{M_s - M_i}{M_s - M_o} = -K' \cdot t^{3/2} \rightarrow \text{Ln} \frac{M_s - M_i}{M_s - M_o} = e^{-K' \cdot t^{3/2}} \rightarrow$$

SEGUNDO MODELO CINÉTICO

Ley de Fick: Variación de masa con respecto al tiempo, es directamente proporcional a la diferencia de masa saturada con respecto a la masa en un instante determinado dividido por la raíz del tiempo.

$$\frac{dM}{dt} = K \times (M_s - M_i) \times \frac{1}{\sqrt{t}}$$

$$\frac{dM}{(M_s - M_i)} = \frac{K}{\sqrt{t}} dt$$

$$\ln \frac{M_s - M_i}{M_s - M_o} = \int K \times t^{-1/2} dt$$

$$\frac{M_s - M_i}{M_s - M_o} = e^{-K' \times t^{1/2}}$$

$$M_i = M_s - (M_s - M_o) \times e^{-K' \times t^{1/2}}$$

Por tanto, hemos obtenido dos modelos cinéticos, de los cuales se ha procedido a elegir el que mejor se ajusta a las representaciones de los distintos ensayos. Ambos modelos son:

$$M_i = M_s - (M_s - M_o) \times e^{-k' \times t^{3/2}} \quad (\text{Fórmula 1})$$

$$M_i = M_s - (M_s - M_o) \times e^{-K' \times t^{1/2}} \quad (\text{Fórmula 2})$$

Una vez hemos obtenido ambos modelos cinéticos, con algunas pruebas se ha llegado a la conclusión de que el modelo que más se ajusta a nuestros ensayos es:

$$M_i = M_s - (M_s - M_o) \times e^{-K' \times t^{1/2}} \quad (\text{Fórmula 2})$$

### 3.2. Modelo a corto plazo con 3 variables.

En este modelo cinético aparecen varias incógnitas:  $M_i$  (Masa en un instante dado),  $M_s$  (Masa saturada),  $M_o$  (Masa seca),  $t$  (tiempo) y  $K$  (Constante característica que depende del tipo de madera). A continuación se ha procedido a realizar un cálculo con un programa informático (solver, Microsoft Word), con el fin de hallar el valor de  $K$  de cada tipo de madera y añadiendo como variables  $M_o$  y  $M_s$ . Y a continuación, a través de los datos obtenidos a largo plazo reducimos las variables a  $2(M_o$  y  $K)$  y a  $1(K)$  para así comparar las  $K$  que nos dan en cada caso.

27-jun	M1A							
Nº	t (seg)	HR (%)	T (°C)	vt	P (gr.)	$M_i$	P- $M_i$	$\Delta P$ (gr.)
1	0	95	27,5	0,00	207,8	207,81	-0,00508327	0
2	310	94,2	27,8	45,80	208,06	208,03	0,03	0,26
3	600	93,6	28	71,14	208,16	208,16	0,00	0,36
4	960	93,4	28,2	97,32	208,28	208,28	0,00	0,48
5	1260	92	28	116,66	208,36	208,37	0,01	0,56
6	1620	91,2	27,9	137,94	208,46	208,47	0,01	0,66
7	1860	91,5	27,9	151,24	208,52	208,53	0,01	0,72
8	2100	92,2	27,9	163,99	208,58	208,59	0,01	0,78
9	2400	92,5	28	179,26	208,64	208,66	0,02	0,84
10	2700	92,7	28,1	193,90	208,72	208,72	0,00	0,92
11	3000	93,1	28,2	208,01	208,79	208,78	0,01	0,99
12	3300	93,1	28,2	221,65	208,85	208,84	0,01	1,05
13	3600	93,1	28,3	234,89	208,92	208,89	0,03	1,12
14	3900	93,2	28,4	247,77	208,98	208,95	0,03	1,18
							<b>0,16</b>	

1.8. Datos recogidos directamente del ensayo a corto plazo, anotados en un documento Excel y posteriormente cálculo de otras incógnitas para averiguar el valor de  $K$  en función de otras variables,  $M_o$  y  $M_s$ . (3 variables)

LEYENDA DE LA TABLA

Nº	Es un número por el que llevar un orden según el tiempo.
t	Tiempo en segundos.
HR	Humedad relativa obtenida por el testeo.
T	Temperatura interior del recipiente también obtenida por el testeo.
vt	Incógnita para modelizar la fórmula final.
P	Peso de la probeta en gramos.
Mi	(Fórmula2)
P-Mi	Peso menos Mi.
$\Delta P$	Incremento de peso.

A través de los datos de la tabla anterior, mediante Solver, obtenemos:

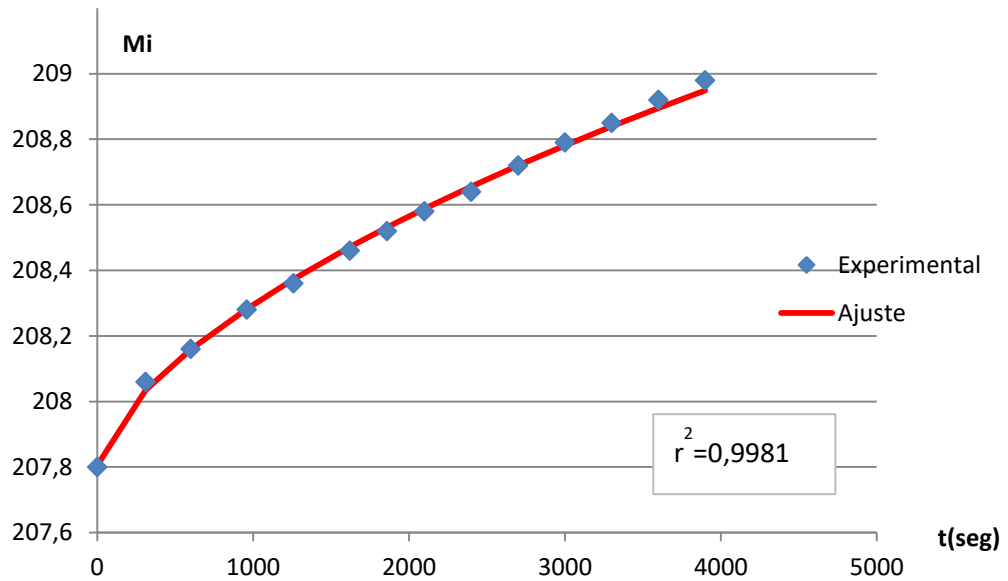
$$M_s = 213,842$$

$$M_o = 207,805$$

$$K = 0,0008475$$

A continuación se realiza una representación gráfica, por un lado los datos experimentales, y por otro, los datos de ajuste, donde podemos observar que ambas curvas se ajustan bastante.





1.31. Gráfica de los datos recogidos de M1A a corto plazo con 3 variables de  $M_i$  respecto al tiempo en segundos.

### 3.3. Modelo a largo plazo.

Mientras tanto realizamos un estudio a largo plazo descrito anteriormente mediante el cual obtenemos una variable  $K$ . Además averiguamos un valor medio del incremento de peso por un lado de las probetas de Mobila y por otro lado de las de Oregón para así obtener el porcentaje medio de aumento de peso lo que nos permitirá posteriormente realizar los mismos cálculos que hemos hecho con Solver en el apartado anterior con dos y una variables.

Con dos variables fijaremos  $M_s$  como constante multiplicando  $M_o$  por el porcentaje de aumento de peso, quedando  $M_o$  y  $K$  como únicas variables.

Con una variable fijaremos además  $M_o$  como constante, quedando  $K$  como única variable.

Así pues, realizando los ensayos a largo plazo durante 14 días, obtenemos el siguiente de modelo de tabla.(probeta M1B)

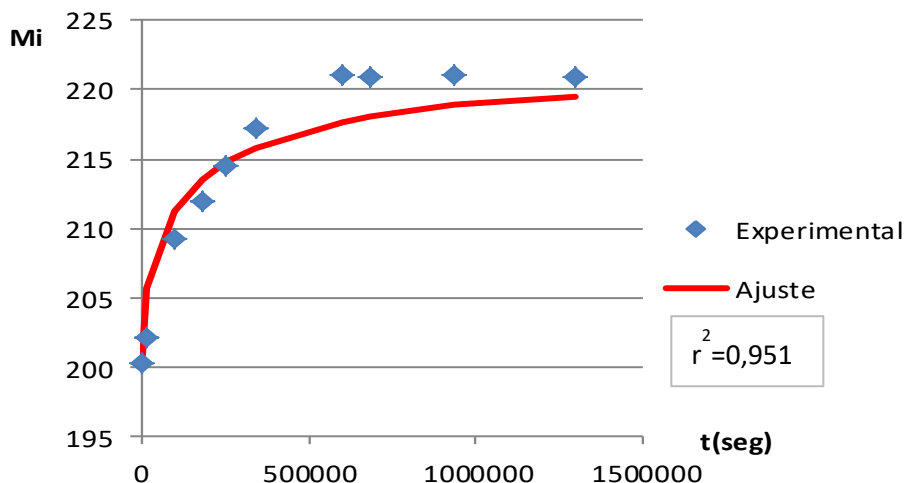
M1B	Hora	vt	Mi	P-Mi	Peso	ΔP
27/06/2016	13:45	0	200,25	0,00	200,25	0
27/06/2016	18:15	127,279221	205,69	3,57	202,12	1,87
28/06/2016	17:30	316,069613	211,24	2,05	209,19	8,94
29/06/2016	17:15	430,581003	213,56	1,65	211,91	11,66
30/06/2016	12:15	503,785669	214,74	0,27	214,47	14,22
01/07/2016	13:00	585,576639	215,84	1,35	217,19	16,94
04/07/2016	12:45	775,370879	217,69	3,31	221	20,75
05/07/2016	11:15	825,953994	218,05	2,94	220,99	20,74
08/07/2016	10:00	967,935948	218,87	2,26	221,13	20,88
12/07/2016	12:15	1138,55171	219,55	1,33	220,88	20,63
				<b>18,73</b>		

1.9. Datos recogidos directamente del ensayo a largo plazo, anotados en un documento Excel y posteriormente cálculo de otras incógnitas para averiguar el valor de K.

A través de los datos de la tabla anterior obtenemos:

$$K = 0,002406$$

A continuación se realiza una representación gráfica, por un lado los datos experimentales, y por otro, los datos de ajuste.



1.32. Gráfica de los datos recogidos de M1A a largo plazo de Mi respecto al tiempo en segundos.

### 3.4. Modelo a corto plazo con 2 variables.

A continuación averiguamos un valor medio del incremento de peso a largo plazo por un lado de las probetas de Mobila y por otro lado de las de Oregón. Obteniendo los siguientes resultados:

$$Mobila = 21,057g$$

$$Oregón = 21,462g$$

Para así obtener el porcentaje medio de aumento de peso lo que nos permitirá posteriormente realizar los mismos cálculos que hemos hecho con Solver en el apartado anterior con dos variables.

Porcentajes medios de aumento de peso:

$$Mobila = 1,0983\%$$

$$Oregón = 1,0964\%$$

Con estos porcentajes obtenemos Ms multiplicando dicho porcentaje por la Mo de cada probeta. De este modo obtenemos otra variable (K) diferente a la obtenida con 3 variables.

$$Ms = 207,8 \times 1,0983 = 228.226$$

27-jun	M1A								
Nº	t (seg)	HR (%)	T (°C)	√t	P (gr.)	Mi	P-Mi	ΔP (gr.)	
1	0	95	27,5	0,00	207,8	207,83	0,03	0	
2	310	94,2	27,8	45,80	208,06	208,04	0,02	0,26	
3	600	93,6	28	71,14	208,16	208,16	0,00	0,36	
4	960	93,4	28,2	97,32	208,28	208,28	0,00	0,48	
5	1260	92	28	116,66	208,36	208,37	0,01	0,56	
6	1620	91,2	27,9	137,94	208,46	208,47	0,01	0,66	
7	1860	91,5	27,9	151,24	208,52	208,53	0,01	0,72	
8	2100	92,2	27,9	163,99	208,58	208,58	0,00	0,78	
9	2400	92,5	28	179,26	208,64	208,65	0,01	0,84	
10	2700	92,7	28,1	193,90	208,72	208,72	0,00	0,92	
11	3000	93,1	28,2	208,01	208,79	208,78	0,01	0,99	
12	3300	93,1	28,2	221,65	208,85	208,84	0,01	1,05	
13	3600	93,1	28,3	234,89	208,92	208,90	0,02	1,12	
14	3900	93,2	28,4	247,77	208,98	208,96	0,02	1,18	
								<b>0,14</b>	

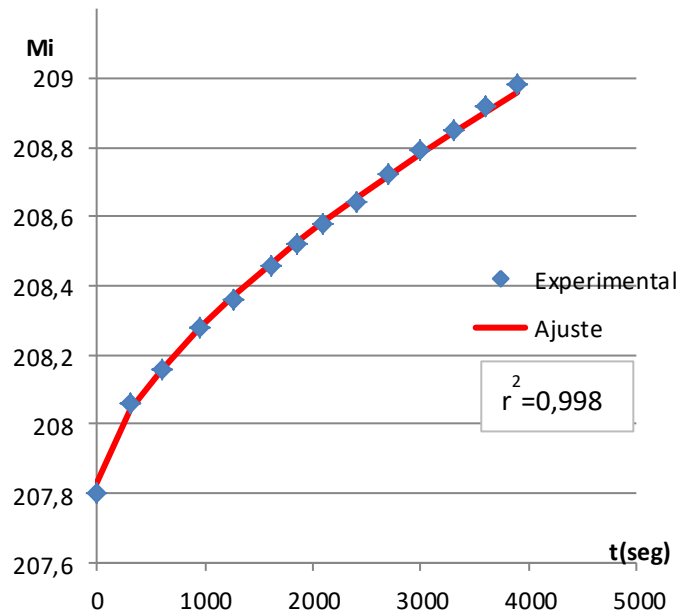
1.10. Datos recogidos directamente del ensayo a corto plazo, anotados en un documento Excel y posteriormente cálculo de otras incógnitas para averiguar el valor de K en función de Mo. (2 variables)

A través de los datos de la tabla anterior, mediante Solver, obtenemos:

$$Mo = 207.827$$

$$K = 0,00023$$

A continuación se realiza una representación gráfica, por un lado los datos experimentales, y por otro, los datos de ajuste, donde podemos observar que ambas curvas se ajustan bastante.



1.33. Gráfica de los datos recogidos de M1A a corto plazo con 2 variables de Mi respecto al tiempo en segundos.

### 3.5. Modelo a corto plazo con 1 variable.

Finalmente obtenemos una última variable K fijando como constante Mo( Peso inicial de la probeta a ensayar).

De este modo obtenemos la siguiente tabla:

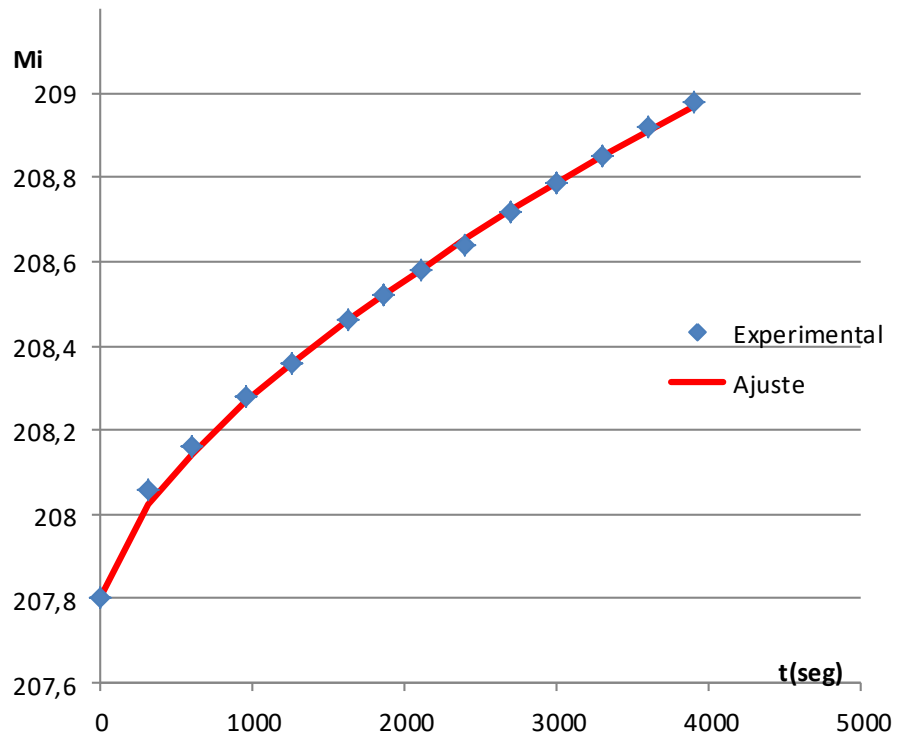
27-jun		M1A							
Nº	t (seg)	HR (%)	T (°C)	v <sub>t</sub>	P (gr.)	Mi	P-Mi	ΔP (gr.)	lnΔP
1	0	95	27,5	0,00	207,8	207,80	0,00	0	
2	310	94,2	27,8	45,80	208,06	208,02	0,04	0,26	-1,35
3	600	93,6	28	71,14	208,16	208,14	0,02	0,36	-1,02
4	960	93,4	28,2	97,32	208,28	208,27	0,01	0,48	-0,73
5	1260	92	28	116,66	208,36	208,36	0,00	0,56	-0,58
6	1620	91,2	27,9	137,94	208,46	208,46	0,00	0,66	-0,42
7	1860	91,5	27,9	151,24	208,52	208,52	0,00	0,72	-0,33
8	2100	92,2	27,9	163,99	208,58	208,58	0,00	0,78	-0,25
9	2400	92,5	28	179,26	208,64	208,65	0,01	0,84	-0,17
10	2700	92,7	28,1	193,90	208,72	208,72	0,00	0,92	-0,08
11	3000	93,1	28,2	208,01	208,79	208,79	0,00	0,99	-0,01
12	3300	93,1	28,2	221,65	208,85	208,85	0,00	1,05	0,05
13	3600	93,1	28,3	234,89	208,92	208,91	0,01	1,12	0,11
14	3900	93,2	28,4	247,77	208,98	208,97	0,01	1,18	0,17
							<b>0,11</b>		

1.11. Datos recogidos directamente del ensayo a corto plazo, anotados en un documento Excel y posteriormente cálculo de otras incógnitas para averiguar el valor de K. (1 variables)

A través de los datos de la tabla anterior, mediante Solver, obtenemos:

$$K = 0,000238$$

A continuación se realiza una representación gráfica, por un lado los datos experimentales, y por otro, los datos de ajuste, donde podemos observar que ambas curvas se ajustan bastante.



1.34. Gráfica de los datos recogidos de M1A a corto plazo con 1 variable de Mi respecto al tiempo en segundos.

### 3.6. Mejora del modelo

A partir de las tablas 1.8, 1.9, 1.10 y 1.11 y las K obtenidas podemos sacar la conclusión de que el modelo utilizado ajusta bastante bien a corto plazo dando errores muy pequeños, sin embargo a largo plazo el error es mayor.

Por esto, tratamos de mejorar el modelo deduciendo una nueva fórmula. El desarrollo del modelo hasta llegar a la formula ajustada es el siguiente:

$$\frac{dM}{dt} = K(M_s - M_o)$$

$$\frac{dM}{M_s - M_o} = K \times dt$$

$$z = M_s - M_o$$

$$dz = -dM$$

$$\frac{-dz}{z} = K \times dt$$

$$\frac{dz}{z} = -K \times dt$$

$$z = z_0$$

$$t = t_0$$

$$\ln z \Big|_{z_0} = -Kt \Big|_{t=0}$$

$$\ln \frac{z}{z_0} = -K(t - 0) = -K \times t$$

$$\ln \frac{M_s - M}{M_s - M_0} = -K \times t$$

$$M_i = M_s - (M_s - M_0) \times e^{-K' \times t} \quad (\text{Fórmula 3})$$

Con esta fórmula obtenemos una nueva tabla a largo plazo y en consecuencia, una nueva K.

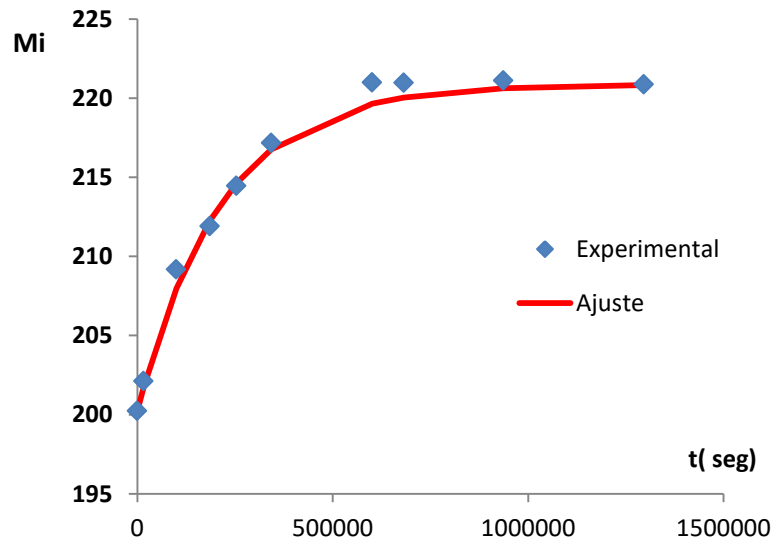
M1B	Hora	t	Mi	P-Mi	Peso	ΔP
27/06/2016	13:45	0	200,25	0,00	200,25	0
27/06/2016	18:15	16200	201,76	0,36	202,12	1,87
28/06/2016	17:30	99900	207,99	1,20	209,19	8,94
29/06/2016	17:15	185400	212,26	0,35	211,91	11,66
30/06/2016	12:15	253800	214,63	0,16	214,47	14,22
01/07/2016	13:00	342900	216,77	0,42	217,19	16,94
04/07/2016	12:45	601200	219,66	1,34	221	20,75
05/07/2016	11:15	682200	220,05	0,94	220,99	20,74
08/07/2016	10:00	936900	220,63	0,50	221,13	20,88
12/07/2016	12:15	1296300	220,83	0,05	220,88	20,63
				<b>5,31</b>		

1.12. Datos recogidos directamente del ensayo a largo plazo, anotados en un documento Excel y posteriormente cálculo de otras incógnitas para averiguar el valor de K.

A través de los datos de la tabla anterior obtenemos:

$$K = 4,70 \times 10^{-6}$$

A continuación se realiza una representación gráfica, por un lado los datos experimentales, y por otro, los datos de ajuste, donde podemos ver que estos mejoran bastante respecto al otro modelo ensayado a largo plazo.



1.35. Gráfica de los datos recogidos de M1A a largo plazo de  $M_i$  respecto al tiempo en segundos.

### 3.7. Comparación de modelo

Por un lado se comparan las  $K$  de las probetas ensayadas a corto plazo según el número de variables.

CP (K)	3 variables	2 variables	1 variable
M1A	0,00305	0,00023	0,00024
M1C	0,00273	0,00116	0,00084
M2A	0,00299	0,00105	0,00083
M2C	0,00361	0,00119	0,00087
M3A	0,00252	0,00137	0,00099
M3C	0,00163	0,00168	0,00126
M3E	0,00130	0,00128	0,00093
O1A	0,00121	0,00130	0,00095
O2A	0,00110	0,00133	0,00098
O3A	0,00111	0,00109	0,00084
O4A	0,00118	0,00137	0,00102
O5A	0,00126	0,00167	0,00128
O6A	0,00113	0,00119	0,00088
O7A	0,00122	0,00111	0,00086

1.13.  $K$  de cada una de las probetas a corto plazo según el número de variables.

Por otro lado se comparan los dos métodos utilizados para obtener la K a largo plazo. Podemos ver una gran mejoría de ajuste en el segundo modelo respecto al primero.

LP (K)	Modelo 1	Modelo 2
M1B	0,00241	4,707E-06
M1D	0,00241	4,5259E-06
M2B	0,00218	3,5259E-06
M2D	0,00217	3,5259E-06
M3B	0,00254	5,0388E-06
M3D	0,00241	4,442E-06
M3F	0,00241	5,07E-06
O1B	0,00241	3,9321E-06
O2B	0,00241	4,8089E-06
O3B	0,00241	3,9321E-06
O4B	0,00253	5,1687E-06
O5B	0,00236	3,8818E-06
O6B	0,00241	4,668E-06
O7B	0,00241	3,9321E-06

1.14. *K de cada una de las probetas ensayadas a largo plazo de ambos modelos.*

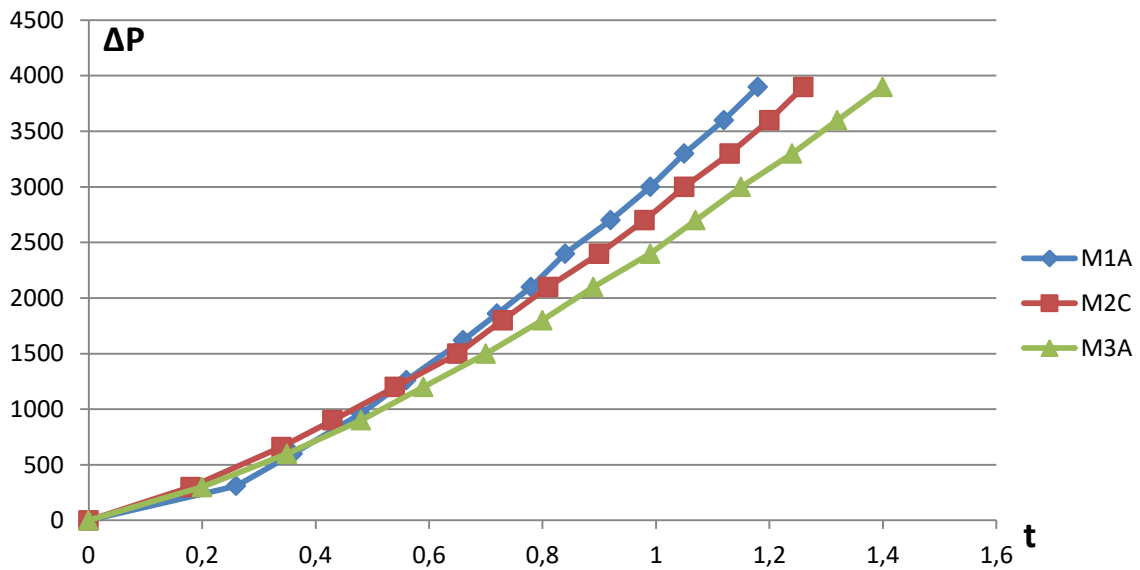
#### 4. COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

##### 4.1. Comparativa de probetas a corto plazo

##### a. Comparativa de 3 probetas de Mobila

Exposición gráfica de la comparativa de las 3 probetas de Mobila elegidas ensayadas a corto plazo. Los datos están en los Anejos, aquí he decidido excluirlos porque creo que es más importante ver gráficamente las distintas evoluciones e interpretar los resultados. En este caso se compara el incremento de peso respecto al tiempo.

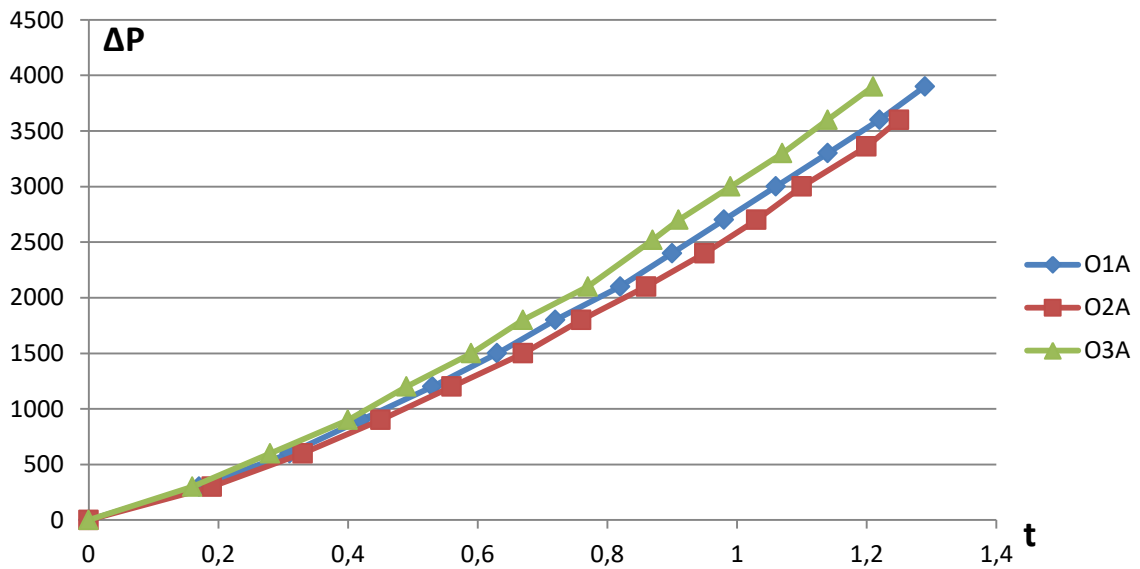




1.36. Gráfica comparativa de 3 probetas de Mobila del incremento de peso respecto al tiempo a corto plazo.

**b. Comparativa de 3 probetas de Oregón**

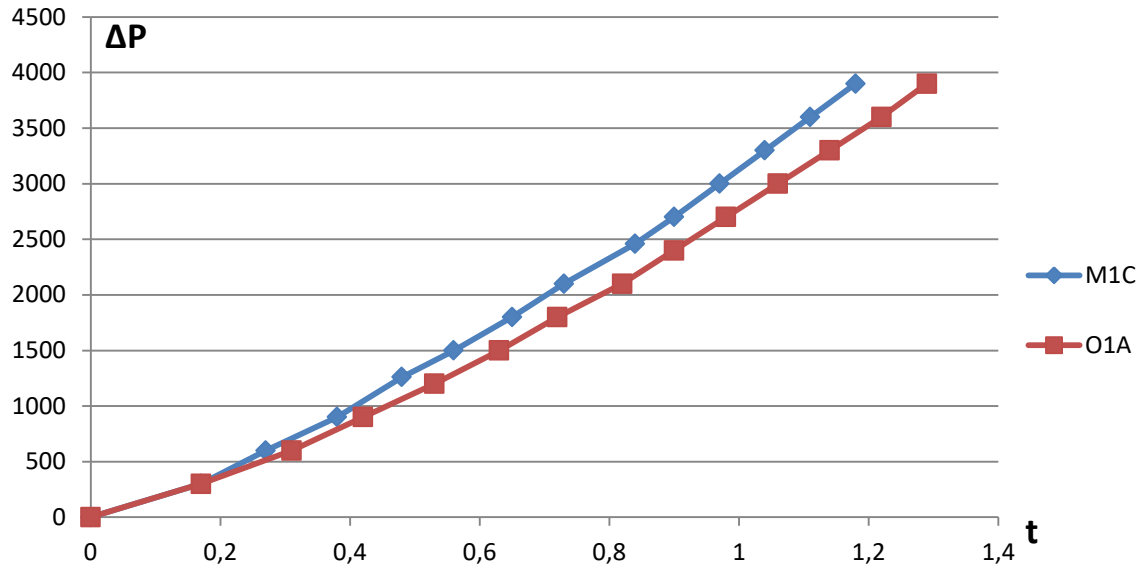
Exposición gráfica de la comparativa de las 3 probetas de Oregón elegidas ensayadas a corto plazo. Los datos están en los Anejos, aquí he decidido excluirlos porque creo que es más importante ver gráficamente las distintas evoluciones e interpretar los resultados. En este caso se compara el incremento de peso respecto al tiempo



1.37. Gráfica comparativa de 3 probetas de Oregón del incremento de peso respecto al tiempo a corto plazo.

**c. Comparativa de Mobila frente a Oregón**

Exposición gráfica de la comparativa de una probeta de Mobila y una de Oregón ensayadas a corto plazo.

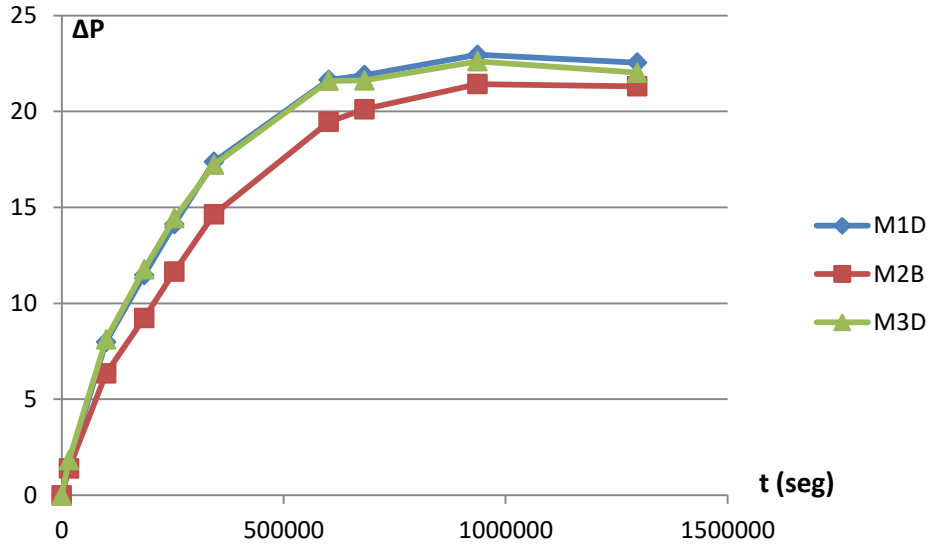


1.38. Gráfica comparativa de una probeta de Mobila y una probeta de Oregón del incremento de peso respecto al tiempo a corto plazo.

**4.2. Comparativa de probetas a largo plazo (con fórmula 3)**

**a. Comparativa de 3 probetas de Mobila**

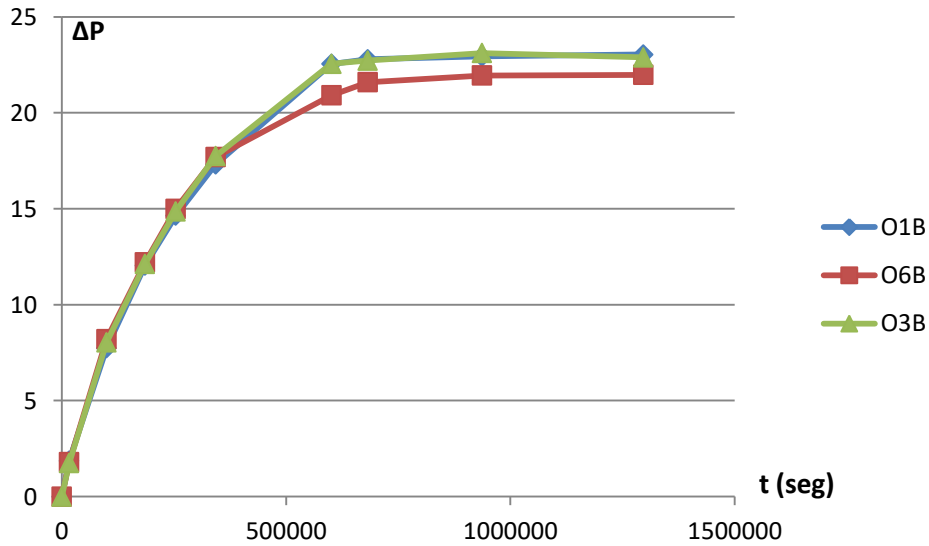
Exposición gráfica de la comparativa de las 3 probetas de Mobila elegidas, ensayadas a largo plazo.



1.39. Gráfica comparativa de 3 probetas de Mobila del incremento de peso respecto al tiempo a largo plazo.

**b. Comparativa de 3 probetas de Oregon**

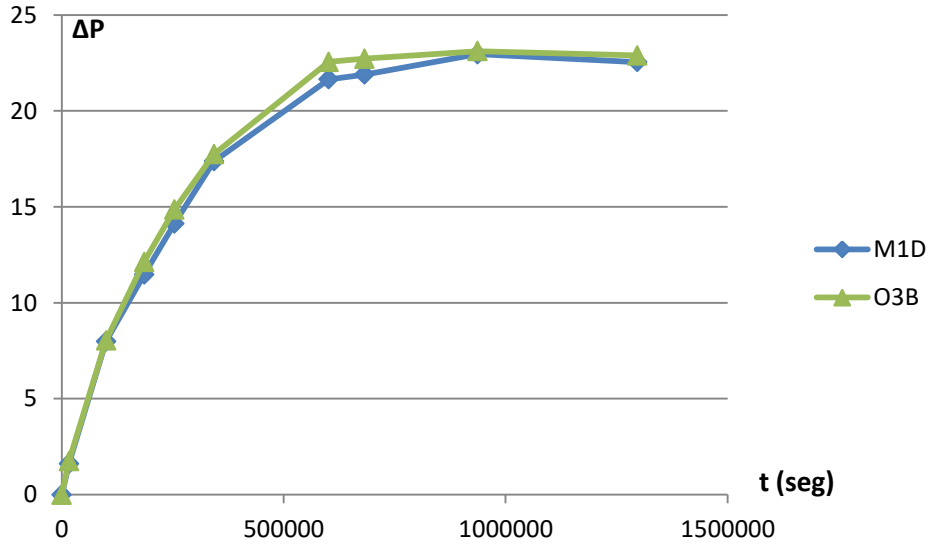
Exposición gráfica de la comparativa de las 3 probetas de Mobila elegidas, ensayadas a largo plazo.



1.40. Gráfica comparativa de 3 probetas de Oregon del incremento de peso respecto al tiempo a largo plazo.

**c. Comparativa de Mobila frente a Oregón**

Exposición gráfica de la comparativa de una probeta de Mobila y una de Oregón elegidas, ensayadas a largo plazo.

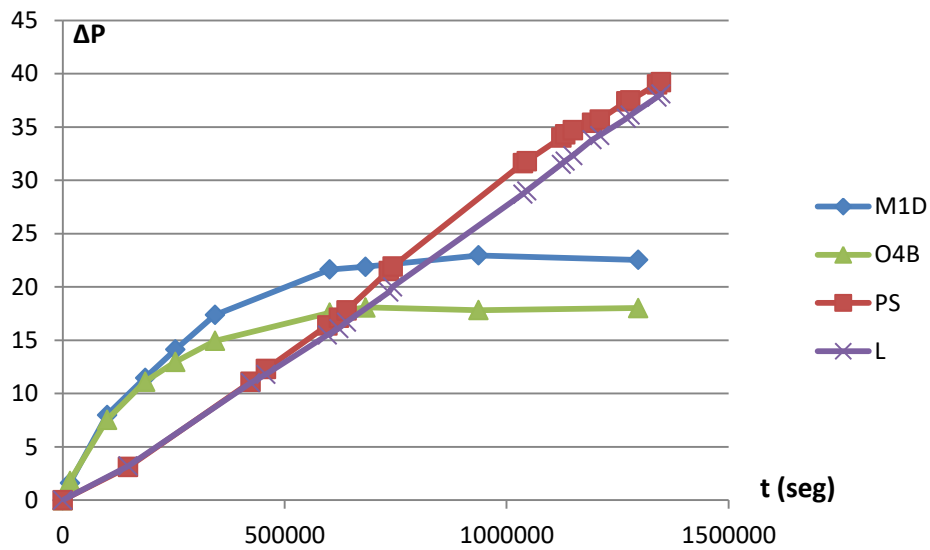


1.41. Gráfica comparativa de una probeta de Mobila y una probeta de Oregón del incremento de peso respecto al tiempo a largo plazo.

**d. Comparativa de una probeta de Mobila, una de Oregón, una de Pino Silvestre y una de Lauan**

A continuación realizamos una comparación gráfica de las probetas de Mobila y Oregón junto con las de Pino Silvestre y Lauan (Ensayadas por Joaquín Latorre) a largo plazo.

Al pasar los datos obtenidos de su ensayo a Excel y sacar la gráfica, se obtienen los siguientes resultados:



1.42. Gráfica comparativa de una probeta de Mobila, una de Oregón, una de Pino Silvestre y una de Lauan.

Llegando a la conclusión de que Joaquín Latorre, en su ensayo a largo plazo no consiguió saturar las probetas ya que las líneas siguen en dirección creciente cuando deja de ensayar.

La diferencia se debe a que, como afirma Joaquín Latorre en su trabajo, en sus ensayos no alcanza el 100% de humedad relativa y por tanto la adsorción por parte de las probetas es más lenta.

## 5. CONCLUSIONES

De este estudio de investigación se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Este estudio se ha hecho para evaluar la diferencia de adsorción de humedad que tienen los distintos tipos de madera, en este caso la Mobila y el Oregón. Después de realizar los ensayos y superponer gráficas para hacer un estudio comparativo, llegamos a la conclusión de que las probetas de Mobila tienen una mayor velocidad de adsorción que las probetas de Oregón. Esto puede deberse a que la Mobila tiene mayor rugosidad en las superficies mientras que el Oregón tiene superficies más lisas.
- Después de realizar ambos estudios llegamos a la conclusión de que al realizar los ensayos de las probetas sobre una de las caras apoyadas en la báscula no se adsorbe humedad por esa cara. Por esto, se propone como posible mejora al ensayo poner un trípode de alambre encima de la báscula para apoyar sobre el la probeta y así adsorber humedad por las 6 caras.
- El modelo cinético propuesto garantiza no actuar sobre la probeta, lo que supuso un gran avance para poder realizar estudios sobre la madera.
- Como línea futura se propone mejorar la instrumentación para conseguir una humedad del 100% durante todo el proceso de ensayo a corto plazo.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Primero me gustaría agradecer a Javier Benlloch la oportunidad que me ha dado de hacer este estudio que ha hecho que aumente notablemente mi interés por este ámbito gracias a su ayuda e interés desde el primer día.

Además, este trabajo no habría podido ser posible sin las horas en el laboratorio de José Manuel Gandía y Juan Soto, facilitándome todo el material que iba necesitando y ayudándome en todo en cada momento.

Con este trabajo acaba una etapa de mi vida y quiero agradecerles a todos los que han estado a mi lado este tiempo porque sin su apoyo incondicional no habría sido posible.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

### 1. LIBROS

Arriaga, F; Estructuras de madera: Análisis de normativa, materiales y tipologías. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho Madrid: AITIM 1986.

Remacha, A; Otero, L. (1999). Especies maderables del mundo. Publicaciones de la E.U.I.T. Forestal.

Remacha, A. (2004). Tecnología del secado de la madera aserrada. Publicaciones de la E.U.I.T. Foresta.

Peraza Sánchez, J.; Menéndez Pidal de Navascués, I.; Velasco Rivas, J.M.; Sanz Pérez, E.; Peraza Sánchez, F.; Núñez, D.; Cortizo Cambra, J.; Mancebo Piqueras, J.A. Guía de la madera (II). Construcción y estructuras. Madrid: AITIM D.L. 2014.

### 2. ARTÍCULOS

Gómez Ihmaidan, E.; Ramírez Monardez, M. (2006). Análisis y estudio del contenido de humedad final de la madera.

Basterra, L.A; Acuña, L; Casado, M; Ramón-Cueto, G; López, G. (2009). Diagnóstico y análisis de estructuras de madera mediante técnicas no destructivas: aplicación a la Plaza Mayor de Chinchón (Madrid).

Basterra, A.; Casado, M.; Acuña, L.; Pinazo, O. (2006) Techniques of pseudo-Non Destructive Testing on structural Wood, by extraction of screws. ReCoPaR, nº 2, june 2006. p 37-59.

Rodríguez Abad, I.; García García, F.; Capuz Lladro, R. (2009). Evaluación de la técnica no destructiva del Georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera.

### 3. NORMATIVA

UNE - EN 13183 – 1:2004. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa.

UNE - EN 1382:2004. Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Resistencia al arranque de los elementos de fijación de la madera.

UNE - EN 13183 – 2:2004. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica.

UNE - EN 13183 – 3:2006. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 3: Estimación por el método capacitivo.

UNE - EN 336:2003. Madera estructural. Coníferas y chopo. Dimensiones y tolerancias.

### 4. TRABAJOS

Joaquín Latorre. Clasificación de la madera: Adsorción de humedad. Pino Silvestre y Lauan.