

ANEXO. ENTREGABLE

FV5.1- INFORME DE DESARROLLO DE SISTEMA DE CLASIFICACIÓN MECÁNICA PARA MADERA ASERRADA DE PINO MARÍTIMO PARA LAS CLASES RESISTENTES C24 Y C18.

1. Introducción

El objetivo de la clasificación mecánica es permitir la clasificación de madera estructural de pino marítimo a través del empleo de una máquina. Para ello se establecen a través de este documento los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre madera aserrada para uso estructural de pino radiata (*Pinus pinaster.*) procedente del España-

Estos trabajos se enmarcan dentro del proyecto PIMA desarrollado por el Grupo Operativo Sigca, f cofinanciado al 80% por el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER) y al 20% por fondos de la Administración General del Estado (AGE), tal como se establece en el Real Decreto 169/2018, de 23 de marzo.

La Dirección General de Desarrollo Rural, Innovación y Política Forestal (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación) es la autoridad de gestión encargada de la aplicación de la ayuda del FEADER y nacional correspondiente.

La metodología ha sido llevada a cabo conforme a lo establecido en la norma UNE-EN 14081-2 y UNE-EN 384: 2016.

Se propone a su vez una tabla de clasificación con los ajustes para dos calidades mecánicas C24 y C18 y sus correspondientes clases resistentes que quedarán pendiente de confirmación por el Comité de Normalización Europeo.

2. Material y métodos

2.1 Muestra de Madera.

Para la muestra de madera se parte del muestreo realizado dentro del proyecto PIMA dentro de la actividad 2.R1. Finalmente se establecieron 33 parcelas, y de la madera que se fue cortando y aserrando se eligieron 510 piezas. Las cuales se distribuyeron en 4 procedencias según la altitud. Tal y como muestra la tabla 1:

Tabla 1. Distribución de piezas según procedencia por altitud

Código lote	Altitud	Nº de piezas	Sección Máxima (mm)	Sección mínima (mm)
1	0-125	176	250x50	100x30
2	125-250	142	250x50	100x30
3	200-375	112	250x50	100x30
4	375-500	75	250x50	100x30

2.2 Técnica no destructiva empleada.

Para los trabajos de obtención de la clasificación mecánica se ha empleado el quipo MTG 960 de la casa Brookhuis. Este equipo se encuentra homologado para la clasificación mecánica de la madera estructural, siempre y cuando se obtengan los ajustes necesarios, tal y como establecen las normas UNE-EN 14081 en sus partes 1 y 2.

La sistemática de medición a seguir en los diferentes puntos de transformación de la madera fue la siguiente: colocación del equipo en una de las testas de las trozas o piezas de madera aserrada y golpeo con un martillo en la misma.

Se golpeó hasta tres veces con un martillo, cada golpeo ofreció una lectura de frecuencia en hercios, estas tres frecuencias se apuntaron en el estadillo y se calculó la media.

Figura 1: Sistemática en la medición de la frecuencia de resonancia mediante al aparato MTG (Brookhuis).



El aparato detecta frecuencia de vibración longitudinal. Y a partir de ella y la longitud de la pieza se puede la velocidad de propagación (V_H), como:

$$V_H = 2lf$$

Donde:

f es la frecuencia de vibración longitudinal en hercios.

l longitud de la pieza en metros.

A continuación el módulo de elasticidad dinámico ($MOEd$) para madera se calculó como:

$$MOEd = (2lf)^2 \rho_H$$

Donde:

f es la frecuencia de vibración longitudinal en hercios.

l longitud de la pieza en metros.

ρ_H es la densidad de la pieza en kg/m^3 .

Se analizó la posibilidad de incorporar factores de corrección por humedad en la velocidad de propagación calculada, a una humedad de referencia del 12%, pero no mejoró en ninguno de los caso los modelos de predicción propuestos posteriormente (entre $MOEd$ y las

variables caracterizadoras), por lo que se optó por no incorporar dichos factores de corrección.

2.3 Ensayos a flexión para determinar la resistencia y la elasticidad:

El protocolo de ensayo se realizó según la norma UNE-EN 408.

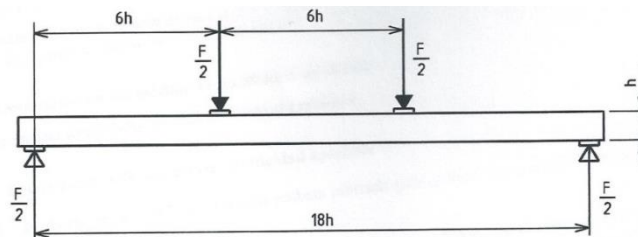
Cesefor dispone en su laboratorio de un Marco de ensayos Sitenor2001, con capacidad de 50 toneladas de fuerza y dotada de dos extensómetros para la medición, de modo continuo, de la flecha de las vigas durante el ensayo. Todos los aparatos de medida disponen de su certificado de calibración.

Los ensayos mecánicos tuvieron por objeto determinar los siguientes parámetros: módulo de elasticidad global y local en flexión estática, y módulo de rotura en flexión, que junto con la densidad son los parámetros que determinan los valores característicos de los diferentes lotes de madera.

La longitud de cada una de las piezas fue al menos 19 veces el alto (cara o anchura) de la sección de la misma, tal y como establece la norma UNE-EN 408.

El procedimiento del ensayo se inició con la colocación de la probeta en la máquina universal de ensayos electromecánica, colocando la probeta sobre dos puntos simétricos de apoyo con una luz igual a 18 veces la altura de la pieza, y sometiendo a la pieza a dos cargas puntuales, simétricamente colocadas en los tercios de la luz y por lo tanto con separación entre apoyos de seis veces la altura de la pieza.

Figura 2: Detalle acotado del ensayo.



Fuente: Norma UNE-EN 408

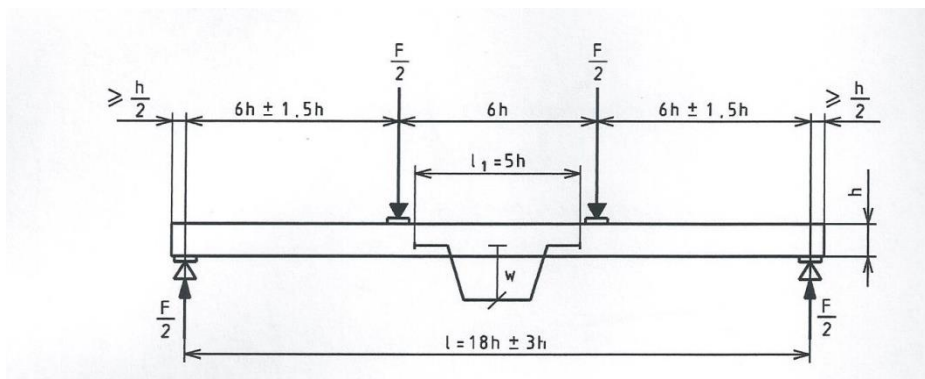
Cada módulo de elasticidad relaciona la carga o fuerza con la deformación medida para una determinada longitud de la pieza, con diferentes distribuciones de carga. El módulo de elasticidad global mide la deformación de la pieza con respecto a su eje longitudinal inicial, medido en la parte central. En cambio el módulo de elasticidad local mide la deformación de la línea neutra de la pieza (parte de la pieza donde los momentos de carga son similares), es decir, la deformación producida en la longitud de la pieza contenida dentro de los puntos de carga, también medida con respecto al eje longitudinal.

En el presente trabajo, se optó por medir tanto el módulo de elasticidad local como el global, controlando y analizando ambos parámetros de rigidez. El módulo de elasticidad global se

utilizó principalmente para el estudio del comportamiento de las diferentes Técnicas No Destructivas utilizadas.

En ambos casos la deformación se midió mediante la utilización de extensómetros. Para el módulo de elasticidad global el extensómetro se colocó en el centro de la pieza, en la parte inferior (cara traccionada). Para el módulo elasticidad local primero fue necesario colocar una percha en uno de sus cantos, soportada en unos clavos puestos en la línea neutra (formando un segmento de longitud igual a 5 veces en ancho de la probeta), y el extensómetro en una chapa colocada en la parte central de la pieza, de tal modo que el extremo del flexómetro apoyara sobre la percha y así se midiera la deformación producida en la línea neutra.

Figura 3: Dispositivo de ensayo para la medición del módulo de elasticidad local en flexión

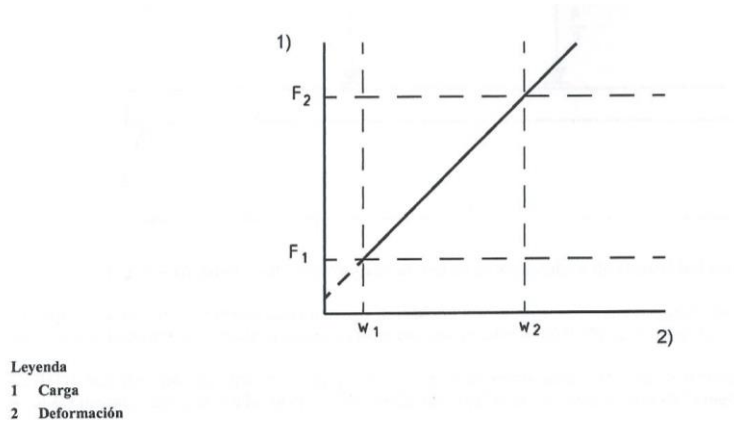


Fuente: Norma UNE-EN 408

Una vez colocados todos los dispositivos, se comenzó a ejercer lentamente la presión, siempre con una velocidad constante. La norma UNE-EN 408 establece que la velocidad no debe superar en ningún momento los 0,003 h mm/s. La presión se mantuvo hasta alcanzar una carga (dentro del tramo elástico del material) suficiente para obtener las gráficas de deformación-fuerza necesarias para los cálculos de los módulos de elasticidad global y local, para lo cual los dispositivos se mantuvieron hasta superar 0,5 $F_{max,est}$, siendo $F_{max,est}$ la fuerza máxima estimada.

A partir de los valores de deformación-carga obtenidos para cada uno de los módulos de elasticidad se debe buscar el tramo más largo de cada sección que de un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor. La Norma EN 408 establece como requisito básico incluir el tramo comprendido entre el 0,2 $F_{max,est}$ y 0,3 $F_{max,est}$. En el presente trabajo y dado que los ensayos se continuaron hasta la rotura de las piezas se optó por analizar el máximo tramo comprendido entre el 0,1 y 0,4 F_{max} (fuerza máxima de carga), siempre y cuando se cumplieran las condiciones anteriormente nombradas, con el objetivo de recoger tramos lo más representativos posibles.

Figura 4: Gráfico de carga-deformación dentro de los márgenes de deformación elástica



Fuente: Norma UNE-EN 408

Posteriormente se retiraron ambos extensómetros y se continuó hasta la rotura de la probeta, momento en el que se anotó la F_{max} (carga de rotura), el tiempo de duración del ensayo, y el motivo y la localización de la rotura.

Hay casos en que por motivos de la forma de las vigas puede ser necesario la introducción de calzos laterales para evitar el vuelco o pandeo lateral de la viga produciéndose de esta manera la deformación de la viga sin provocar resistencia de rozamiento significativa. Esta situación es habitual en vigas esbeltas y con fuerte presencia de alabeo. En el presente estudio no fue necesaria la utilización de calzos, debido al escaso alabeo que presentaban las piezas, tampoco se detectó ningún vuelco a la hora de ensayar las piezas.

2.4 Validación con nuevos datos y mejora de los modelos previos

Con los datos de MOE obtenidos por métodos destructivos en el presente proyecto, se llevó a cabo la validación de los modelos previos. Para ello se calculó el valor estimado de cada árbol y parcela (utilizando el modelo correspondiente, ya sea a nivel árbol individual o parcela) muestreado en este proyecto y se enfrentó al valor obtenido con los métodos destructivos. Se calcularon los estadísticos de bondad de ajuste (R^2 y RMSE) y se elaboraron los gráficos de observados contra predichos para evaluar la calidad de las estimaciones.

Posteriormente, se reajustó de nuevo el modelo añadiendo la información de las nuevas parcelas a la base de datos preexistente para así conseguir un modelo mucho más robusto debido al hecho de contar con un tamaño muestral mucho mayor.

3. Resultados

3.1 Descripción de las muestras ensayadas:

A continuación, se presentan a modo de histogramas los resultados obtenidos en los parámetros físico-mecánicos analizados para cada lote de madera ensayado.

Lote de procedencia en el rango 0-125 metros de altitud.

Figura 5: Histograma de valores de resistencia a flexión (f_m) lote (0-125m) Altitud

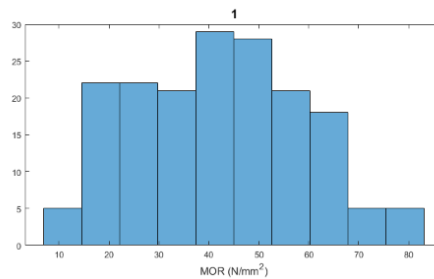


Figura 6: Histograma de valores de Modulo Elasticidad Local ($E_{o,local}$) lote (0-125m) Altitud

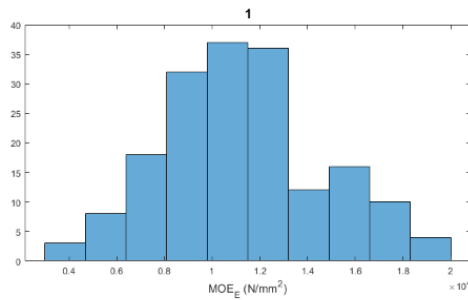
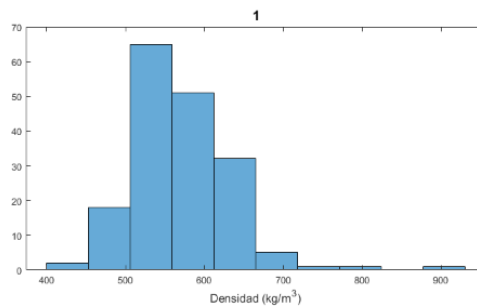


Figura 7: Histograma de valores de Densidad (ρ) en el lote (0-125m) Altitud



Lote de procedencia en el rango 125-250 metros de Altitud:

Figura 8: Histograma de valores de resistencia a flexión (f_m) en el lote procedencia (125-250)m altitud:

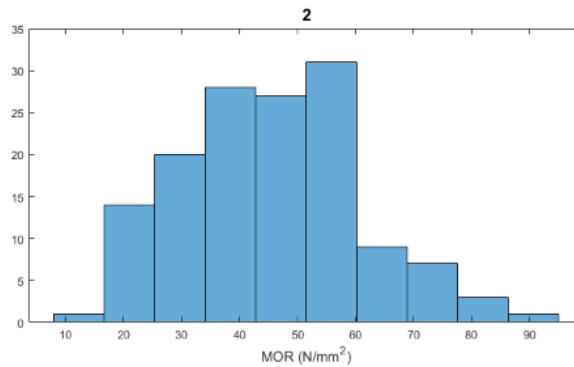


Figura 9: Histograma de valores de módulo de elasticidad ($E_{o,local}$) en el lote (125-250)m altitud:

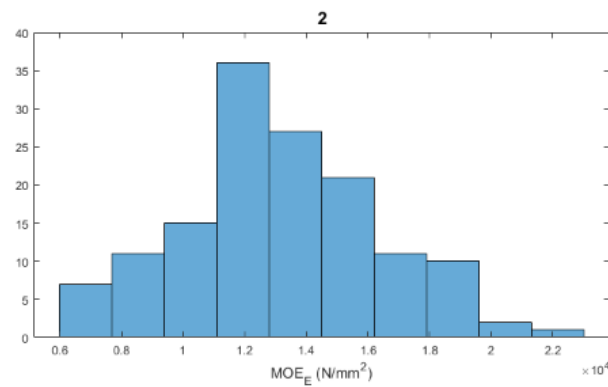
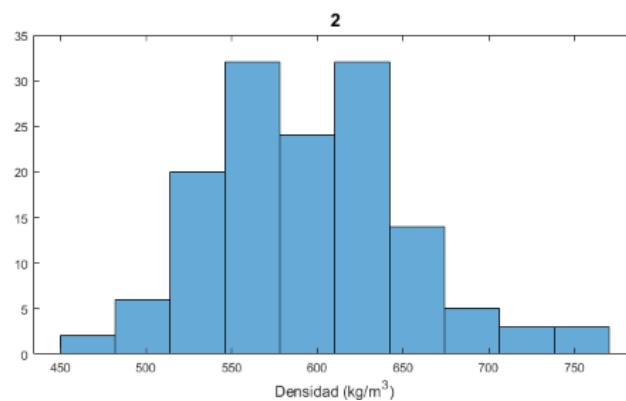


Figura 10: Histograma de valores de Densidad en Kg/m³ de el lote (125-250)m altitud:



Lote de procedencia en el rango 250-375 metros de Altitud:

Figura 11: Histograma de valores de resistencia a flexión (f_m) en el lote (250-375)m altitud:

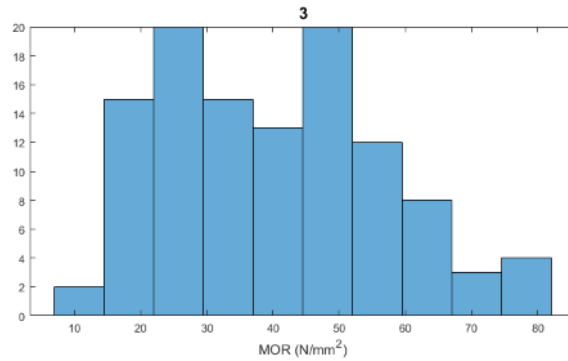


Figura 12: Histograma de valores de resistencia a flexión ($E_{o,local}$) en el lote (250-375)m altitud:

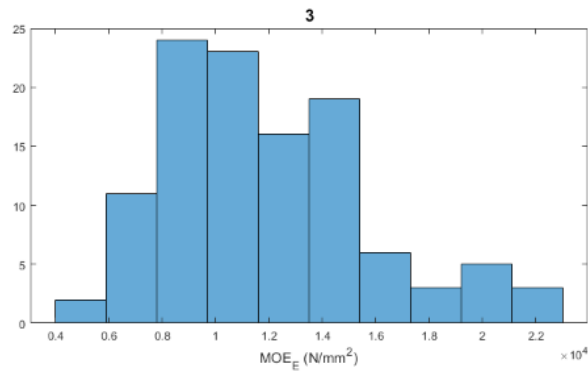
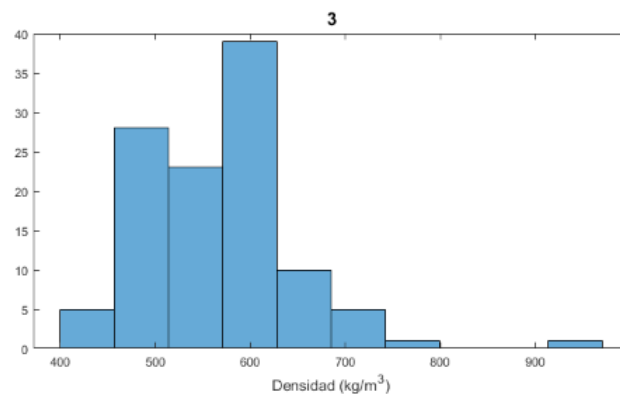


Figura 13: Histograma de valores de Densidad en Kg/m³ de el lote (250-375)m altitud:



Lote de sección de procedencia en el rango 375-500 metros Altitud

Figura 14: Histograma de valores de resistencia a flexión (f_m) en el lote procedencia 375-500 metros Altitud.

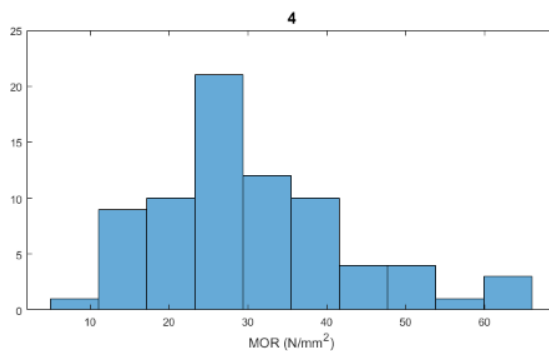


Figura 15: Histograma de valores de resistencia a flexión ($E_{o,local}$) en el lote 375-500 metros Altitud.

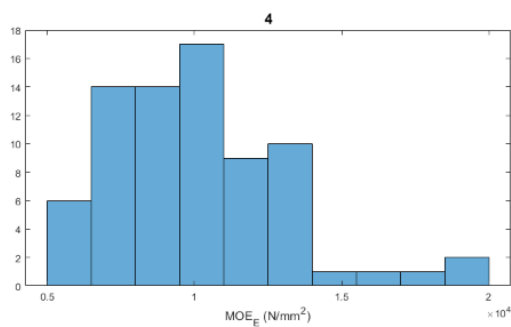
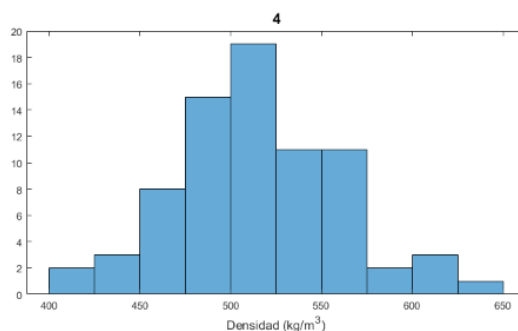
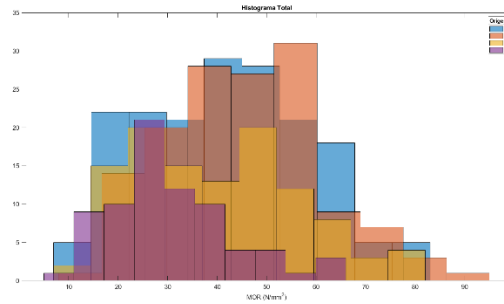


Figura 16: Histograma de valores de Densidad en Kg/m^3 del lote 375-500 metros Altitud.



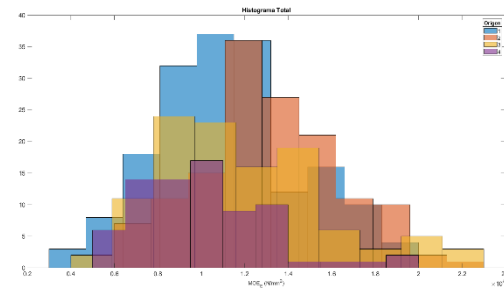
Comparativa distribuciones lotes MOR:

Figura 17: Comparativa distribución MOR por orígenes:



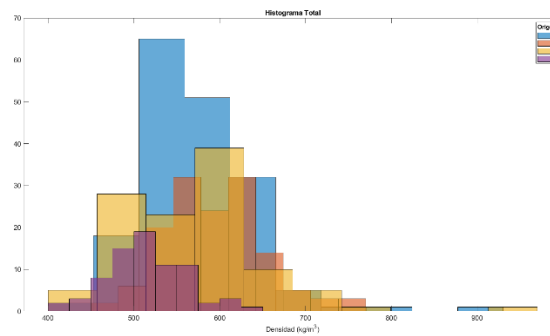
Comparativa distribuciones lotes MOE:

Figura 18: Comparativa distribución MOE por orígenes:



Comparativa distribuciones lotes densidad:

Figura 19: Comparativa distribución densidad por orígenes:



- 1- (0-125)m Altitud
- 2- (125-250)m Altitud.
- 3- (250-375)m Altitud
- 4- (375-500)m Altitud

3.2 Modelos para las propiedades de determinación.

A continuación, se muestran los modelos desarrollados para las tres propiedades de determinación a partir de la propiedad indicadora, aplicada en madera recién aserrada (en verde):

Para la resistencia a flexión (*MOR*) se ha obtenido el siguiente modelo.

$$MOR (N/mm^2) = -7.338 + 0.004 * IP$$

R-cuadrada = 51,2 por ciento.

Para la elasticidad (*MOE*) se ha obtenido el siguiente modelo:

$$MOE = 2463.35 + 0.801 * IP$$

R-cuadrada = 42,2 por ciento

Para la densidad, se ha obtenido el siguiente modelo:

$$Densidad = 401.39 + 0.014 * IP$$

R-cuadrada = 17,63 por ciento

3.3 Ajustes de clasificación para madera seca de pino marítimo:

Con los modelos obtenidos en la fase anterior, se calculan los ajustes para las diferentes clases resistentes. Estos ajustes se calculan en función de las clases resistentes marcadas por la EN 338, los modelos obtenidos para las propiedades de determinación y el factor de *t* de Student, según el nivel de probabilidad aplicado.

En función de las demandas del mercado y de la probabilidad de nuestro modelo se establece se elige el siguiente ajuste de verificación. Tabla 7: Ajuste de verificación seleccionado: ($f_{05,i}$).

Tabla 2. Ajustes de clase C18 y C24 para la IP en madera seco

Ajustes seleccionados			
Clase resistente	T-student	Límite de la propiedad indicadora (N/mm ²)	Propiedad que marca el Límite
C24	5%	12107	MOR
C18	5%	10665	MOR

Como se ha comentado anteriormente el límite superior de las tres propiedades de determinación, es el que marca el límite de clasificación para la clase resistente. En este caso el límite marcado es el ajuste obtenido para el MOR.

Una vez tenemos nuestra elección de clases y sus correspondientes ajustes determinados, es necesario realizar una serie de verificaciones para poder validar los ajustes:

A-Verificación de los valores característicos del total de la muestra para cada clase clasificada.

A continuación, se muestran los valores característicos obtenidos para cada una de las clases resistentes clasificadas, de acuerdo a las indicaciones de la Norma Une 384, para una clasificación mecánica:

Tabla 3: Valores característicos para el total de la muestra

	n	Achieved			Required			% of required		
		$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)	ρ_k (kg/m ³)	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)	ρ_k (kg/m ³)	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)	ρ_k (kg/m ³)
ALL										
C24	211	26,12	14596	526.4 3	21,6	1045 0	315	121	140	167
C18	90	22,15	12592	479.2 2	16,2	7600	288	137	166	166
reject										

Como se observa en las tres últimas columnas (% requerido), en todos los casos el valor característico está por encima del 100% del valor requerido para la clase. Tanto el valor característico del MOR, MOE y Densidad, cumplen este criterio de verificación para la C24 y la C18.

B-Verificación de los valores característicos para cada submuestra según la procedencia.

La Norma 14081-2 indica que para que los ajustes sean válidos, al menos 20 probetas han de ser clasificadas dentro de cada una de las clases resistentes, y además se han de cumplir una serie de requisitos para los valores característicos de cada procedencia. Los resultados obtenidos para cada una de las procedencias son los siguientes:

Tabla 4: Valores característicos para la muestra procedente de rango Altitud (0-125)m

	Achieved			Required			% of required		
	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)	ρ_k (kg/m ³)	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)	ρ_k (kg/m ³)	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)	ρ_k (kg/m ³)
C24	39,5	13519	541,3	21,6	10450	315	182,8	129,3	171,8

C18	25,59	12682	516,59	16,2	7600	288	157,9	166,8	179,3
-----	-------	-------	--------	------	------	-----	-------	-------	-------

Como se observa en las tres últimas columnas, que el porcentaje del valor característico obtenido frente al valor requerido esta por encima del 100% en las tres propiedades de determinación (MOR, MOE y Densidad). Por lo tanto, para la esta procedencia, se verifica la validez de los ajustes.

Tabla 5: Valores característicos para la muestra procedente de rango Altitud (125-250)m

	Achieved			Required			% of required		
	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)	ρ_k (kg/m ³)	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)	ρ_k (kg/m ³)	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)	ρ_k (kg/m ³)
C24	35,07	15230	561,7	21,6	1045	315	162	145	178
C18	20,64	12815	485,8	16,2	7600	288	127	168	168

Como se observa en las tres últimas columnas, el porcentaje del valor característico obtenido frente al valor requerido, está por encima del 100% en las tres propiedades de determinación (MOR, MOE y Densidad). Por lo tanto, para la esta procedencia, se verifica la validez de los ajustes.

Tabla 6: Valores característicos para la muestra procedente de rango Altitud (250-375)m

	Achieved			Required			% of required		
	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)	ρ_k (kg/m ³)	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)	ρ_k (kg/m ³)	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)	ρ_k (kg/m ³)
C24	38,87	15062	568,26	21,6	1045	315	179	144	180
C18	23,22	12195	468,56	16,2	7600	288	143	160	162

Como se observa en las tres últimas columnas, el porcentaje del valor característico del MOR y la densidad suponen más 90% del valor requerido para la clase resistente. La Norma 14081-2 nos indica que para las subprocedencias el porcentaje del valor característico del MOR y la densidad será al menos el 90% del valor requerido para cada clase, y el 95% en el caso del MOE. En este caso se cumplen los tres requisitos.

Tabla 7: Valores característicos para la muestra procedente de rango Altitud (375-500)m

	Achieved			Required			% of required		
	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)	ρ_k (kg/m ³)	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)	ρ_k (kg/m ³)	$f_{m,k}$ (N/mm ²)	$E_{0,mean}$ (N/mm ²)	ρ_k (kg/m ³)
C24	28,1	11783	482	21,6	1045	315	130	112	153
C18	21,7	11243	450,47	16,2	7600	288	133	147	156

Como se observa en las tres últimas columnas, el porcentaje del valor característico del MOR y la densidad suponen más 90% del valor requerido para la clase resistente. La Norma 14081-2 nos indica que para las subprocedencias el porcentaje del valor característico del MOR y la densidad será al menos el 90% del valor

requerido para cada clase, y el 95% en el caso del MOE. En este caso se cumplen los tres requisitos.

C-Verificación de la matriz de coste total.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el proceso de obtención de la matriz de coste global. En primer lugar se presenta los resultados obtenidos para la matriz de tamaños:

Tabla 8: Matriz de tamaños.

MATRIZ DE TAMAÑOS				
CLASE OPTIMA	CLASE ASIGNADA			TOTAL
	C24	C18	RECHAZO	
C24	205	86	143	434
C18	3	3	27	33
RECHAZO	3	1	32	36
TOTAL	211	90	202	503

A continuación, se presentan los resultados de la matriz de coste elemental:

Tabla 9: Matriz de coste elemental:

Matriz de Coste Elemental			
	C24	C18	R
C24	0	0.69	1.77
C18	1.11	0	1.00
R	2.59	1.11	0

Por último, se presenta la matriz de coste global que es la que sirve para verificar si el ajuste es correcto o no:

Tabla 10: Matriz de coste global.

MATRIZ DE COSTE GLOBAL			
	CLASE ASIGNADA		
	C24	C18	RECHAZO
C24	0	0.66	1.24
C18	0.02	0	0.13
RECHAZO	0.03	0.01	0

Como se observa en la matriz de coste global todos los valores por debajo de la diagonal (en azul) son menores de 0,4. La Norma EN 14081-2 nos indica que para que el ajuste sea válido todos los coeficientes interiores de la matriz de coste global deben de ser

menores a 0,4. En este caso se cumple este criterio, por lo tanto, el ajuste se verifica como válido.

4. Conclusiones:

-Se ha comprobado que los ajustes para las clases resistentes C24 y C18 obtenidos con los modelos desarrollados a partir de la propiedad indicadora seleccionada, cumplen los requisitos establecidos por la Norma EN 14081-2, para madera en seco. Todos los ajustes para clasificación mecánica desarrollados en este proyecto, se llevarán al próximo comité de normalización europeo, para su inclusión en la Normativa.