

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

MÁSTER EN INGENIERÍA DE MONTES

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA Y
DEL MEDIO NATURAL**



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**



Escuela Técnica Superior
de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**EVALUACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS NO
DESTRUCTIVAS DE LA MADERA DEL GÉNERO *PINUS*
DE USO ESTRUCTURAL**

Alumno TFM: Rubén Martínez Lacruz

Tutor académico: Prof. D. Miguel Redón Santafé

Tutor empresa: D. Miguel Ángel Abián Pérez

Curso 2018-2019

Valencia, 30 de abril de 2019.

TÍTULO

EVALUACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DE LA MADERA DEL GÉNERO *PINUS* DE USO ESTRUCTURAL.

RESUMEN

La madera se ha utilizado históricamente y se utiliza como material estructural en numerosas edificaciones y estructuras, como forjados, cerchas, postes de luz, traviesas de ferrocarril, etc. Debido a su origen biológico, es habitual que presente defectos como nudos, bolsas de resina, fendas, desviaciones de la fibra, etc., que ocasionan disminuciones de su resistencia mecánica y dificultan su clasificación estructural. Esto hace que muchas veces, por desconocimiento de su resistencia exacta, la madera no se utilice como material de construcción o de ingeniería.

Durante las últimas décadas se han realizado numerosas investigaciones centradas en determinar las propiedades mecánicas de la madera estructural mediante técnicas de evaluación no destructivas (TND). Si bien se han conseguido importantes avances en ese campo de investigación, se necesita contar con una evaluación que incorpore las mejoras recientes en algunas TND, como la resistografía, y que sea también más fiable y precisa que las actuales.

El objetivo de la presente investigación consiste en desarrollar una metodología que permita clasificar estructuralmente mediante TND madera estructural del género *Pinus*, incluyendo la mejora reciente en la técnica de resistografía, así como otros parámetros característicos de la madera de interés (número de nudos, proporción albura/duramen, etc.). La investigación se desarrolla en las instalaciones y laboratorios de AIDIMME (Instituto Tecnológico Metalmecánico, Mueble, Madera, Embalaje y Afines), y cuenta con la colaboración de su Departamento de Tecnología y Biotecnología de la Madera.

Para determinar la eficacia de la metodología y la precisión de los resultados, estos se comparan estadísticamente con los resultados obtenidos mediante ensayos de flexión hasta rotura según norma UNE-EN 408:2011+A1, que son los utilizados para clasificar la madera según el sistema de clases resistentes del Código Técnico de la Edificación (CTE).

Palabras clave: madera estructural, evaluación no destructiva, técnica no destructiva Código Técnico de la Edificación, clase resistente, resistografía, ultrasonidos, rehabilitación, END, TND, CTE.

ABSTRACT

EVALUATION THROUGH NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUES OF WOOD OF THE GENUS PINUS OF STRUCTURAL USE

Wood has been used historically and is used as a structural material in many buildings and structures, such as floors, trusses, light poles, etc.

Due to its biological origin, it is common to present defects such as knots, bags of resin, fissures, deviations from fiber, etc., which cause decreases in their mechanical resistance and make their structural classification difficult. This means that many times, due to lack of knowledge of its exact strength, the wood is not used as a construction or engineering material.

During the last decades there have been numerous investigations focused on determining the mechanical properties of structural wood by means of non-destructive evaluation techniques (NDT). Although important advances have been made in this field of research, an evaluation is needed that incorporates the recent improvements in some NDTs, such as resistography, and that is also more reliable and accurate than the current ones.

The objective of this research is to develop a methodology that structurally classifies structural wood of the Pinus genus through NDT, including the recent improvement in the resistography technique, as well as other parameters characteristic of the wood of interest (number of knots, sapwood / heartwood, etc.). The research is carried out in the facilities and laboratories of AIDIMME (Metal-Mechanical Technological Institute, Furniture, Wood, Packaging and Related Products) and has the collaboration of its Department of Wood Technology and Biotechnology.

To determine the effectiveness of the methodology and the precision of its results, these are compared statistically with the results obtained by bending tests until breaking according to the UNE-EN 408:2011+A1 standard, which are used to classify wood according to the system of resistant classes of the Technical Building Code (CTE).

Keywords: structural wood, non-destructive evaluation, non-destructive technique, mechanical resistance, Technical Building Code, resistant class, resistography, ultrasound, rehabilitation, NDE, NDT, CTE.

AUTOR: Rubén Martínez Lacruz

TUTOR ACADÉMICO: Prof. D. Miguel Redón Santafé

TUTOR EMPRESA: D. Miguel Ángel Abián Pérez

Valencia, 30 de abril de 2019.

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

Agradecer a varias personas la ayuda que me han prestado en la realización de este Trabajo Final de Máster.

A Miguel Redón Santafé por brindarme la oportunidad de embarcarme en el amplio mundo de la construcción en madera, transmitiéndome conocimientos con entusiasmo y simpatía como profesor. También como tutor de dicho Trabajo Final de Máster, siempre dispuesto a ayudarme y aconsejarme, así como a darme la motivación suficiente para realizarlo. No olvidarme y darle las gracias por haber puesto su confianza en mí para la realización de prácticas en AIDIMME, y de este modo abrirme un futuro laboral.

A Miguel Ángel Abián Pérez por doble partida, por un lado como tutor de prácticas y tutor de empresa de este Trabajo Final de Máster aportándome amplios conocimientos sobre la investigación en el campo de las estructuras de madera y por otra parte, como Jefe de trabajo en AIDIMME, transmitiéndome su gran interés por la investigación y haciendo que mi estancia en el instituto me haya aportado grandes conocimientos y experiencias, lástima que por circunstancias de lejanía a mi pueblo y mi gente haya tenido que tomar la decisión de no continuar como trabajador de AIDIMME y no poder aportar ideas a nuevas investigaciones.

A Guillem Segura Orenga y Guillermo Martínez como amigos y compañeros durante más de un año de trabajo, aportándome multitud de conocimientos, consejos, y habilidades, a la vez que me formaban y marcaban un amplio futuro laboral. Gracias.

A Rosa Igual y Marisé Llaudes por hacer de mi estancia en AIDIMME un simple y agradable paseo.

A mi familia por formar parte de mi vida, darme tantos sabios consejos y aportarme la confianza para tomar las decisiones oportunas que marcarán mi futuro laboral, teniendo su apoyo a pesar de todos los imprevistos que vayan surgiendo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

ABSTRACT

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

 Índice

 Índice de Tablas

 Índice de Figuras

ACRÓNIMOS

 Símbolos

 Especies

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

MATERIAL Y MÉTODOS

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

CONCLUSIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN	0
2.- OBJETIVOS.....	2
3.- ANTECEDENTES	4
3.1.- PARTICULARIDADES DE LA MADERA	5
3.2.- CLASIFICACIÓN DE LA MADERA ESTRUCTURAL.....	5
3.3.- ESTADO DEL ARTE EN END PARA MADERA	6
3.3.1.- ANÁLISIS Y JUSTIFICACIÓN DE LAS TND ADECUADAS PARA EL PROYECTO .	8
4.- MATERIAL Y MÉTODOS	10
4.1.- INSTALACIONES Y PERSONAL	11
4.2.- MATERIAL DE ENSAYO	11
4.2.1.- ESPECIES DE MADERA PARA ENSAYOS EN VIGAS (TND vs. ENSAYO DE ROTURA).....	11
4.2.2.- ESPECIES DE MADERA PARA ENSAYOS COMPARATIVOS DE LAS GRÁFICAS “DRILL RESISTANCE” Y “FEED FORCE” MEDIANTE INCISIONES RESISTOGRÁFICAS.	12
4.3.- EQUIPOS UTILIZADOS	13
4.3.1.- EQUIPO DE EMISIÓN-RECEPCIÓN DE ULTRASONIDOS	13
4.3.2.- EQUIPO DE VIBRACIONES INDUCIDAS.....	13
4.3.3.- EQUIPO DE RESISTOGRAFÍA.....	14
4.3.4.- EQUIPO DE MEDICIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD.....	14
4.3.5.- BANCO DE ENSAYO.....	15
4.3.6.- MÁQUINA DE ENSAYO A FLEXIÓN	15
4.4.- EQUIPOS AUXILIARES	16
4.5.- PROCEDIMIENTOS SOBRE LAS MUESTRAS PARA LOS ENSAYOS COMPARATIVOS DE LAS GRÁFICAS “DRILL RESISTANCE” Y “FEED FORCE” MEDIANTE INCISIONES RESISTOGRÁFICAS.....	16
4.5.1.- DISEÑO Y MONTAJE DE BANCO DE ENSAYO	16
4.5.2.- ELECCIÓN DE MUESTRAS Y MÉTODO DE ENSAYO	16

4.5.3.- MÉTODO VISUAL PARA LA COMPARACIÓN DE LAS GRÁFICAS RESISTOGRÁFICAS “ <i>DRILL RESISTANCE</i> ” Y “ <i>FEED FORCE</i> ”.....	18
4.6.- PROCEDIMIENTOS DE LOS ENSAYOS SOBRE VIGAS.....	18
4.6.1.- METODOLOGÍA PROPUESTA DE EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DE LA MADERA ESTRUCTURAL DEL GÉNERO <i>PINUS</i>	19
4.6.1.1.- MEDICIÓN Y PESO	19
4.6.1.2.- CÁLCULO DE LA DENSIDAD	19
4.6.1.3.- CLASIFICACIÓN VISUAL.....	19
4.6.1.4.- MEDICIÓN DE NUDOS	19
4.6.1.5.- CÁLCULO CKDR.....	20
4.6.1.6.- ENSAYO MEDIANTE TÉCNICA DE EMISIÓN-RECEPCIÓN DE ULTRASONIDOS	20
4.6.1.7.- ENSAYO MEDIANTE TÉCNICA DE VIBRACIONES INDUCIDAS.....	21
4.6.1.8.- ENSAYO MEDIANTE TÉCNICA DE RESISTOGRAFÍA.....	21
4.6.1.9.- DETERMINACIÓN DE LA PROPORCIÓN DE DURAMEN Y ALBURA	22
4.6.2.- PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE ROTURA A FLEXIÓN	22
4.7.- VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	24
5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	24
5.1.- ANÁLISIS DE LA COMPARACIÓN DE LAS GRÁFICAS “ <i>DRILL RESISTANCE</i> ” Y “ <i>FEED FORCE</i> ” MEDIANTE INCISIONES RESISTOGRÁFICAS.	25
5.2.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA SOBRE VIGAS	26
5.2.1.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MOE ESTÁTICO Y EL MOR ESTÁTICO EN FUNCIÓN DE VARIABLES Y PARÁMETROS DE LA MADERA.....	26
5.2.1.1.- Análisis del módulo de elasticidad.....	27
5.2.1.2.- Análisis del módulo de rotura/resistencia a flexión	28
5.2.2.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MOE-MOR ESTÁTICO (ENSAYO DESTRUCTIVO) EN FUNCIÓN DEL MOE Y MOR OBTENIDO MEDIANTE TND Y VARIABLES Y PARÁMETROS DE LA MADERA	30
5.2.2.1.- Análisis del módulo de elasticidad.....	30

5.2.2.2.- Análisis del módulo de rotura/resistencia a flexión	32
5.2.3.- RESULTADO GENERAL DE LA VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	33
6.- CONCLUSIONES	33
7.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
8.- ANEXOS	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista general de las vigas de la especie pino laricio.....	11
Figura 2. Ejemplo de muestra para ensayos comparativos de las gráficas..	13
Figura 3. Equipo Sylvatest TRIO®	13
Figura 4. Equipo Timber Grader MTG.	14
Figura 5. Instrumento de perforación. 1; asideros, 2; batería, 3; unidad digital, 4; aguja perforadora.....	14
Figura 6. Banco de ensayo con sus distintas fijaciones.	15
Figura 7. Ensayo de rotura a flexión y componentes.	15
Figura 8. Banco de ensayo.	17
Figura 9. Vista general pantalla PD Tools Pro.	17
Figura 10. Realización ensayo de ultrasonidos.	20
Figura 11. Realización ensayo vibraciones inducidas.	21
Figura 12. Realización de resistografía horizontal.	21
Figura 13. Dispositivo de ensayo para la medición del módulo de elasticidad global en flexión.	22
Figura 14. Rotura de vigas en ensayo a flexión.....	23
Figura 15. Ejemplos de análisis gráficos sobre muestras.	25
Figura 16. Regresión lineal entre el MOE global flexión y la Velocidad Sylvatest media, para la especie pino laricio.	28
Figura 17. Regresión lineal entre MOR resistencia flexión axial y CKDR viga completa, para la especie pino silvestre.	29
Figura 18. Regresión lineal entre MOE global flexión y Sylvatest media MOE, para la especie pino resinero.	31
Figura 19. Regresión lineal entre MOR resistencia flexión axial y CKDR zona central, para la especie pino laricio.	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clases resistentes para maderas de coníferas basadas en ensayos de flexión de canto: valores de resistencia, rigidez y densidad..... 6

Tabla 2. Resumen de técnicas de evaluación no destructiva 8

Tabla 3. Clasificación ensayos comparativos de las gráficas resistográficas 12

Tabla 4. Medidas aportadas por PD Tools Pro. 18

Tabla 5. Ecuaciones obtenidas para la variable MOE para cada especie, y para las cuatro especies en conjunto. 27

Tabla 6. Ecuaciones obtenidas para la variable MOR para cada especie, y para las cuatro especies en conjunto. 29

Tabla 7. Ecuaciones obtenidas para la variable MOE en función del dinámico y de características de la madera, para cada especie y para las cuatro especies en conjunto. 31

Tabla 8. Ecuaciones obtenidas para la variable MOR en función del dinámico y de características de la madera, para cada especie y para las cuatro especies en conjunto. 32

ACRÓNIMOS		
SÍMBOLOS		
SÍMBOLO	DEFINICIÓN	UNIDADES
ANOVA	Análisis de la varianza	-
AR	Amplitud resistográfica	%
CTE	Código Técnico de la Edificación	-
END	Evaluación no destructiva	-
ME	Madera estructural	-
MEG	Madera estructural gran escuadría	-
MOE	Módulo de elasticidad global en flexión	N/mm ²
MOR	Módulo de resistencia a la flexión axial	N/mm ²
PD	PowerDrill®	-
PH	Pino carrasco	-
PN	Pino negral/laricio	-
PP	Pino resinero/rodeno	-
PS	Pino silvestre/albar	-
PSF	Punto de saturación de la fibra	-
R	Coefficiente de correlación de Pearson	-
R ²	Coefficiente de determinación	-
SPSS®	Statistical Product and Service Solutions	-
TFM	Trabajo final de máster	-
TND	Técnicas no destructivas	-
UPV	Universidad Politécnica de Valencia	-

ESPECIES		
NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE INGLÉS
Pino carrasco	<i>Pinus halepensis</i> Mill.	Aleppo pine
Pino laricio	<i>Pinus nigra</i> J.F. Arnold. Subsp. <i>salzmannii</i>	Austrian pine
Pino resinero/pinaster	<i>Pinus pinaster</i> Ait. Ssp. <i>Mesogeensis</i> Fieschi & Gaussen	Maritime pine
Pino insignis/radiata	<i>Pinus radiata</i> D. Don	Radiata pine
Pino silvestre	<i>Pinus sylvestris</i> L.	Scots Pine
Abeto	<i>Picea abies</i> L.	European silver fir
Mobila	<i>Pinus palustris</i> Mill.	Longleaf Pine

1.- INTRODUCCIÓN

El presente trabajo final de máster (TFM) se enmarca en el campo de las estructuras de madera, donde surge el problema de determinar las características mecánicas resistentes de los elementos estructurales que forman parte de estructuras, tanto antiguas como nuevas, pues hoy no existe una caracterización y clasificación de la madera estructural por métodos no destructivos que consiga lograr el conocimiento de sus propiedades mecánicas exactas, para poderla clasificar en el Código Técnico de la Edificación (CTE). Esta situación favorece el desconocimiento sobre su uso y es el principal motivo de que, en algunas situaciones como la obra nueva, y más especialmente en el campo de la rehabilitación, la madera no se utilice como material de construcción o de ingeniería.

Actualmente se disponen de dispositivos e instrumental que intentan predecir las propiedades mecánicas resistentes de la madera, y son varias la tesis, artículos de investigación y diferentes fuentes de información bibliográfica, las que han intentado abordar el uso de estos dispositivos y técnicas de evaluación no destructivas de la madera, pero sin llegar todavía a establecer una metodología de evaluación no destructiva (END) aplicable tanto a madera nueva como a madera antigua (Acuña y Casado, 2015).

Con la investigación del trabajo se analizan las principales técnicas de evaluación no destructivas (TND), describiendo sus limitaciones, ventajas y desventajas; y se comparan los resultados obtenidos por algunos equipos comerciales con los resultados obtenidos del ensayo destructivo a flexión según la norma UNE-EN 408:2011+A1. A fin de mejorar la predicción de las características resistentes de la madera, se combinan las TND de mayor interés y fiabilidad, y se tienen en cuenta características específicas del material (densidad, nudos, albura, duramen, etc.).

Todo el proceso necesario para la realización del trabajo se ha desarrollado en las instalaciones de AIDIMME (Instituto Tecnológico Metalmecánico, Mueble, Madera, Embalaje y Afines), que lleva tres décadas dedicándose a la I+D+i en madera, materiales derivados y construcción.

El periodo para la realización del conjunto de ensayos ha llevado más de un año de trabajo y ha sido fruto de un convenio de prácticas de colaboración con la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y el Departamento de Tecnología y Biotecnología de la Madera de AIDIMME.

Otro posible campo de aplicación de los resultados obtenidos en el trabajo se puede trasladar a la metodología de END que se usa comúnmente en la inspección de edificios con estructura de madera, realizando diferentes fases y aplicando aquí varias técnicas de END. El objetivo de estas técnicas consiste en evaluar los daños producidos por los agentes bióticos y abióticos en la madera, sin alterar las propiedades de los diferentes elementos ensayados, y clasificar los elementos conforme a las clases resistentes que establece el CTE.

La metodología de evaluación no destructiva de la madera, que se ha centrado en el género *Pinus*, podrá usarse *in situ* y proporcionará resultados cuantitativos precisos y fiables para su uso en cálculos estructurales.

Los ensayos se realizan sobre viguetas de 180 x 80 x 4000 mm del género *Pinus*, concretamente de las especies *Pinus halepensis* Mill. (pino carrasco), *Pinus nigra* J.F. Arnold. Subsp. *salzmannii* (pino laricio o pino negral), *Pinus pinaster* Ait. Subsp. *Mesogeensis* Fieschi & Gaussen. (pino resinero o pino rodeno) y *Pinus sylvestris* L. (pino silvestre), estableciendo quince vigas por especie, salvo para el pino carrasco con 16 vigas, lo que conforma una muestra total de sesenta y una vigas.

2.- OBJETIVOS

El **objetivo principal** de este trabajo final de máster consiste en desarrollar una metodología de evaluación no destructiva de la madera estructural del género *Pinus* que pueda aplicarse *in situ* en edificios y estructuras, sin necesidad de apeaar elementos (vigas, viguetas, cerchas, etc.) ni de trasladarlos a laboratorios. Por su carácter no destructivo, o en todo caso mínimamente invasivo, la metodología desarrollada no reducirá las propiedades resistentes de los elementos de madera ensayados.

Antes del comienzo de las actividades de desarrollo de la metodología se realiza un plan de trabajo adecuado, en el cual se consulta la bibliografía, y se evalúan y comparan las tecnologías no destructivas de evaluación de mayor interés para la madera estructural.

La idea principal que se sigue en el TFM consiste en mejorar las metodologías de evaluación existentes hasta el momento, que en muchos casos son cualitativas y poco fiables (la inspección visual, por ejemplo), o bien poco precisas para realizar cálculos estructurales.

Los **objetivos particulares** del presente TFM se resumen en los siguientes puntos:

- Análisis de las tecnologías de END de mayor interés, atendiendo a sus ventajas, desventajas y limitaciones; y determinación de aquellas más apropiadas para el TFM.
- Estudio comparativo de los diferentes tipos de gráficas (*drill resistance* frente a *feed force*), proporcionadas por el equipo de resistografía IML-RESI PowerDrill® (PD). Se pretende verificar si pueden detectarse con mayor eficacia y exactitud diferentes degradaciones y anomalías de elementos estructurales de madera, realizando un análisis visual de la gráfica resistográfica *feed force* que es una innovación reciente respecto a las gráficas resistográficas convencionales (*drill resistance*).
- Desarrollo de una metodología de evaluación no destructiva de la madera estructural del género *Pinus* que: a) pueda usarse *in situ*; b) proporcione resultados cuantitativos precisos y fiables para su uso en cálculos estructurales.
- Formulación de relaciones estadísticas entre las variables que caracterizan mecánicamente la madera y otras variables como densidad, valores resistográficos, número de nudos, relación albura/duramen, etc.

- Formulación de relaciones estadísticas entre las variables que caracterizan mecánicamente la madera y esas mismas variables determinadas mediante TND.

Para alcanzar los anteriores objetivos, se realizarán las siguientes **actividades específicas**:

- Investigar, analizar y comparar las TND aplicables a madera estructural.
- Verificar cualitativamente si la gráfica resistográfica de fuerza de avance (*feed force*), que es una innovación reciente, supone un avance respecto a las gráficas resistográficas convencionales en lo concerniente a detectar de forma fiable y exacta degradaciones de elementos estructurales de madera.
- Desarrollar una metodología de evaluación no destructiva de la madera estructural del género *Pinus* que: a) pueda usarse *in situ*; b) proporcione resultados cuantitativos precisos y fiables para su uso en cálculos estructurales.
- Investigar la relación entre el módulo de elasticidad global en flexión (MOE) y la resistencia a la flexión axial (MOR), obtenidos ambos según la norma UNE-EN 408:2011+A1, y un amplio conjunto de variables como densidad, valores resistográficos, número de nudos, relación albura/duramen, etc.
- Investigar la relación entre los valores de MOE y MOR estáticos obtenidos ambos según la norma UNE-EN 408:2011+A1, y los valores MOE y MOR dinámicos obtenidos mediante las técnicas no destructivas más adecuadas según el análisis previo, así como la inclusión adicional de variables como densidad, valores resistográficos, número de nudos, relación albura/duramen, etc.

3.- ANTECEDENTES

3.1.- PARTICULARIDADES DE LA MADERA

Debido a las diferentes funciones de los tejidos de la madera, su naturaleza es heterogénea, con diferentes especializaciones celulares para cumplir las funciones primordiales de conducción de la savia, transformación y almacenamiento de los productos vitales y la resistencia como sostén vegetal. Esto origina un comportamiento anisótropo de la madera a diferencia de otros materiales, y conlleva un comportamiento desigual frente a una propiedad física o mecánica según la dirección que se considere (Ferrán *et al.*, 2007).

Por ser un material de origen biológico, la madera tiene características intrínsecas anatómicas, que afectan desfavorablemente a la resistencia y a sus propiedades físico-mecánicas, y que se conocen como defectos, particularidades o anomalías de la madera. Estas anomalías o defectos se pueden clasificar en nudos, desviaciones en la dirección de la fibra, fendas, acebolladuras, entrecasco, gemas, bolsas de resina, anillos de crecimiento, médula, madera juvenil, madera de reacción y deformaciones (García *et al.*, 2003).

Las anomalías que presentan mayor influencia en las propiedades físico-mecánicas de la madera son los nudos. Cualquier nudo interrumpe la continuidad de algunas fibras y las desvía de la proximidad del nudo, reduciendo la resistencia y produciendo una distribución irregular de las tensiones (Ferrán *et al.*, 2007).

En ANEXO 1 FICHAS TND, apartado 10.2 *Resultados que proporciona*, se desarrollan cada una de las anomalías.

3.2.- CLASIFICACIÓN DE LA MADERA ESTRUCTURAL

En España, la madera estructural se clasifica según el sistema de clases resistentes que determina la norma española UNE-EN 338:2016 (*Madera estructural. Clases resistentes*). Esta norma asigna una determinada clase de resistencia a la madera, atendiendo fundamentalmente a su resistencia a flexión o módulo de rotura (MOR). El Código Técnico de la Edificación remite a dicha norma para clasificar la madera y realizar cálculos estructurales. En la Tabla 1 se muestran los tipos de clases resistentes asociadas a valores de resistencia, rigidez y densidad.

Toda madera estructural vendida en España debe llevar el marcado CE, que incluye la clase resistente de la partida o del elemento.

	Clase	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propiedades de resistencia en N/mm²													
Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tracción paralela a la fibra	$f_{t0,k}$	7,2	8,5	10	11,5	13	14,5	16,5	19	22,5	26	30	33,5
Tracción perpendicular a la fibra	$f_{t90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compresión paralela a la fibra	$f_{c0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	24	25	27	29	30
Compresión perpendicular a la fibra	$f_{c90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0
Cortante	f_{vk}	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Propiedades de rigidez en kN/mm²													
Módulo de elasticidad medio en flexión paralela a la fibra	$E_{m,0,mean}$	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0
Módulo de elasticidad característico en flexión paralela a la fibra (5% percentil)	$E_{m,0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,1	10,7
Módulo de elasticidad medio perpendicular a la fibra	$E_{m,90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Módulo de cortante medio	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Densidad en kg/m³													
Densidad característica (5% percentil)	ρ_k	290	310	320	330	340	350	360	380	390	400	410	430
Densidad media	ρ_{mean}	350	370	380	400	410	420	430	460	470	480	490	520
NOTA 1 Los valores dados en esta tabla para la resistencia a tracción, resistencia a compresión, resistencia a cortante, módulo de elasticidad característico en flexión, módulo de elasticidad transversal medio y módulo de cortante medio se han calculado utilizando las ecuaciones dadas en la Norma EN 384. NOTA 2 Los valores de resistencia a tracción se han estimado de forma conservadora teniendo en cuenta que la clasificación se ha realizado partiendo de la resistencia a flexión. NOTA 3 Las propiedades relacionadas en esta tabla son aplicables a la madera que presente un contenido de humedad que corresponde a una temperatura de 20 °C y una humedad relativa del 65%, lo que equivale a un contenido de humedad del 12% para la mayor parte de la especies. NOTA 4 Los valores característicos de resistencia a cortante son para madera sin fendas, de acuerdo a la Norma EN 408. NOTA 5 Las clases pueden aplicarse también a maderas frondosas que presenten un perfil resistente y densidad similares, tales como el chopo o el castaño. NOTA 6 La resistencia a la flexión de canto puede utilizarse también en el caso de flexión de tabla													

Tabla 1. Clases resistentes para maderas de coníferas basadas en ensayos de flexión de canto: valores de resistencia, rigidez y densidad. Fuente: UNE-EN 338:2016.

3.3.- ESTADO DEL ARTE EN END PARA MADERA

La END se define como la ciencia que identifica las propiedades físicas y mecánicas de una pieza de material sin alterar sus capacidades de uso final, con el objetivo de emplear esta información a la hora de tomar decisiones con respecto a las aplicaciones apropiadas. Tales evaluaciones se basan en tecnologías de pruebas no destructivas para proporcionar información precisa relativa a las propiedades, el rendimiento o el estado del material en cuestión (Ross, 2015).

La mayor parte de técnicas usadas en el proceso de la END de la madera se sustentan básicamente en sistemas basados en la inspección visual, la transmisión de ultrasonidos, ensayos mecánicos no destructivos, análisis de vibraciones, resistógrafos que se orientan hacia la evaluación de las propiedades mecánicas, y métodos para la determinación de la actividad de los ataques xilófagos mediante la identificación de sonidos (Arriaga *et al.*, 2002).

Ya en el pasado, desde la década de 1950 se ha tratado de evaluar e identificar las propiedades y características mecánicas de la madera mediante diferentes modelos y TND. Se nombran a continuación diferentes artículos de investigación sobre END/TND, como la posibilidad de inspeccionar elementos como medida de seguridad mediante ultrasonidos (Lee, 1965), el uso de ondas vibratorias para la predicción de la tensión dinámica de la madera (Bertholf, 1965), pruebas no destructivas para la rigidez estructural de la madera (Hoyle, 1961), pruebas no destructivas sobre la calidad de enlace del adhesivo (Jayne, 1955).

Por parte de la comunidad internacional de investigación en metodologías y técnicas no destructivas, se realizó un primer simposio en la Universidad Estatal de Washington y el Laboratorio de Productos Forestales del USDA en el año 1963 (Ross, 2015).

Siguen desarrollándose nuevos modelos de evaluación y técnicas, e igualmente se perfeccionan las ya conocidas, intentando mejorar resultados, de manera que actualmente se están realizando esfuerzos de investigación y desarrollo a nivel mundial para examinar el uso potencial de una amplia gama de tecnologías de END para evaluar madera y materiales basados en madera, desde la evaluación de árboles en pie hasta estructuras de madera 'in situ' (Ross, 2015).

Dicha evolución en el ámbito de las nuevas metodologías surge debido a la demanda de la industria y del sector de la construcción y la rehabilitación de estructuras de madera por establecer una evaluación mediante TND, ya que se hace necesario conocer las características de la madera de una manera más exacta y fiable, así como por otro lado hay un mayor énfasis en todo el mundo para abordar los problemas de salud de los bosques y ecosistemas.

A esta demanda de la industria, y como fin último de la END de madera, se suma la necesidad de crear metodologías para evaluar los productos y materiales de madera, a fin de poder tomar decisiones más precisas sobre el uso adecuado. Estos procedimientos están en constante evolución, especialmente en el campo de materiales de fibras lignocelulósicos.

Previamente a la realización de los ensayos y a la utilización de las diferentes técnicas aplicadas, en el trabajo se estudian y valoran las TND y las metodologías analizadas que ya han sido objeto de estudio en diferentes proyectos de investigación.

Para fundamentar la elección apropiada de las técnicas, se lleva a cabo un estudio exhaustivo de todo el conjunto de técnicas aplicables y se elaboran unas fichas resumen de las TND (ANEXO 1. FICHAS TND), con el fin de crear un documento a modo de guía que exprese las principales características, particularidades, ventajas y desventajas de las técnicas usadas en la actualidad.

Las técnicas seleccionadas en este TFM son las de vibraciones inducidas, ultrasonidos, resistografía e inspección visual; se han excluido las técnicas de georradar, microondas, infrarrojos, penetrometría, extracción de tornillos y rayos X.

3.3.1.- ANÁLISIS Y JUSTIFICACIÓN DE LAS TND ADECUADAS PARA EL PROYECTO

La Tabla 2 muestra información resumida de las TND más aplicables a madera.

TND	PRINCIPIO	APLICACIÓN
Georradar	Propagación de radiación electromagnética en el elemento analizado y medida de la reflexión parcial en aquellas zonas con cambios en las propiedades dieléctricas. La radiación corresponde a las bandas de frecuencia situadas entre los 10 MHz y los 3 GHz (bandas de radiofrecuencias y de microondas).	Densidad, humedad y detección de huecos y cavidades ocultas.
Microondas	Transmisión o reflexión de ondas electromagnéticas de microondas (300 MHz-30 GHz) en el elemento analizado, y determinación de parámetros como las constantes dieléctricas en las tres direcciones (ϵ'), la pérdida dieléctrica (ϵ''), la amplitud, la fase, y la polarización de la onda en el medio.	Densidad, humedad y detección de huecos y cavidades ocultas.
Resistografía	Resistencia que opone la madera a la penetración mediante una aguja fina.	Densidad (indirectamente), detección de defectos (huecos, fendas, bolsas de resina, etc.) y detección de nudos.
Radiación de rayos X	Absorción de rayos X en cada zona del elemento analizado.	Densidad media y perfil de densidad, detección de huecos, cavidades ocultas y nudos.
Ultrasonidos	Propagación de una onda ultrasónica en el elemento analizado y medida del tiempo de vuelo de la onda.	Cálculo MOR y MOE, detección indirecta de defectos (huecos, fendas, etc.), y nudos.
Vibraciones inducidas/ondas de presión	Propagación de una onda de presión o impacto en el elemento analizado y medida del tiempo de vuelo de la onda. Dependiendo del equipo utilizado, la muestra debe tener los dos extremos libres o a menos uno.	Cálculo MOR y MOE, detección indirecta de defectos (huecos, fendas, etc.), y nudos.
Penetrometría	Introducción a presión de una varilla metálica en la madera con una energía prefijada.	Densidad y detección indirecta de defectos (huecos, ataques de xilófagos, etc.).
Extracción de tornillos	Arranque de tornillos previamente clavados en la madera.	Densidad y detección indirecta de defectos (huecos, ataques de xilófagos, etc.).
Termografía	Conductividad térmica de la madera.	Detección de humedades, defectos y degradaciones próximos a la superficie.
Inspección visual	Identificar visualmente los elementos de madera con el fin de valorar su estado.	Detección de defectos (fendas, bolsas de resina, etc.), degradaciones y nudos.
Punzón	Valoración de las características resistentes de la madera al observar la fuerza necesaria para calvar el punzón.	Detección de defectos (fendas, bolsas de resina, etc.), huecos y cavidades ocultas.

Tabla 2. Resumen de técnicas de evaluación no destructiva. Fuente: Elaboración propia.

Tanto la técnica de ultrasonidos como las vibraciones inducidas proporcionan de forma directa el módulo de elasticidad y el módulo de rotura o resistencia a flexión. Permiten, por tanto, clasificar la madera según el sistema de clases resistentes del CTE. De esta forma, con los resultados que proporcionan ambas técnicas puede realizarse una comparación directa con el módulo de elasticidad y el módulo de rotura obtenidos mediante rotura de flexión de acuerdo con la norma UNE-EN 408:2011+A1. Según Machado *et al.* (1998), ambas técnicas resultan fiables para madera estructural y proporcionan resultados con correlaciones aceptables o elevadas respecto a los resultados obtenidos mediante ensayos destructivos de flexión. Por estos motivos, se decide utilizar ambas en el proyecto.

La técnica de resistografía a través de la gráfica que mide la resistencia a la perforación (*drill resistance*) es ampliamente utilizada en la evaluación de la madera estructural, y la validez de sus resultados está bien comprobada (Álvarez *et al.*, 2005; Acuña *et al.*, 2011). Los nuevos equipos de resistografía, además de aportar la gráfica *drill resistance*, muestran la curva de fuerza de avance (*feed force*). Según Nutto y Biechele (2015), la curva de fuerza de avance muestra información adicional para la toma de decisiones sobre si arboles tienen defectos o no, y esta curva apenas resulta influida por el efecto de la fricción en el eje, que resulta importante en especies densas o resinosas. Por tanto, también se decide utilizarla en el proyecto, así como realizar un análisis entre los dos tipos de gráficas.

Otra técnica que se decide emplear en el proyecto es la de inspección visual (Bray y McBride, 1992), ya que, debido a las particularidades o singularidades de la madera, al ser un material biológico de origen orgánico, esta presenta unas características particulares en cuanto a su resistencia (Ferrán *et al.*, 2007).

Otro rasgo importante de la clasificación visual concierne a la valoración estructural de la madera debido a la degradación causada por agentes bióticos (como xilófagos, hongos) y abióticos (luz, exposición a agentes meteorológicos, etc.) pero en el presente trabajo este aspecto no resulta relevante, ya que la madera utilizada no presenta ningún tipo de degradación biótica o abiótica.

Las técnicas de ultrasonidos, vibraciones inducidas, resistografía e inspección visual están recogidas en la norma UNE 41805-8:2009 IN (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera) como técnicas válidas y fiables para el análisis de estructuras de madera.

La técnica de georradar se excluye del proyecto, ya que a partir de sus resultados resulta imposible establecer equivalencias entre los tamaños de las anomalías detectadas en los radargramas y la reducción de resistencia mecánica de la madera que origina la existencia de esas anomalías (Rodríguez-Abad, 2009). Además, se suman las dificultades adicionales de que no existen actualmente algoritmos para detectar automáticamente defectos en los radargramas ni tampoco para relacionarlos con la calidad estructural.

Se excluye también del proyecto la técnica de microondas, pues no proporciona valores de resistencia mecánica ni sus resultados son susceptibles de convertirse directamente en esos valores (Rodríguez-Abad, 2009). A este inconveniente se añade que la investigación de microondas sobre elementos de madera *in situ* no está avanzada.

Se rechaza también el uso de la técnica de infrarrojos, ya que los equipos no permiten clasificar la madera en cuanto al CTE ni proporcionan datos de resistencia mecánica (Wyckhuysse y Maldague, 2001).

Se desestiman las técnicas de penetrometría y extracción de tornillos porque son técnicas que aportan valores muy locales y superficiales de la pieza, no representativos del elemento completo, y porque no proporcionan valores de resistencia mecánica (Bobadilla-Maldonado *et al.*, 2007).

La técnica de rayos X necesita protección radiológica del personal que la usa, por lo que no resulta práctica para analizar estructuras de tamaño mediano o grande (Wei *et al.*, 2011). Además, presenta el inconveniente de que no proporciona valores de resistencia mecánica, y por tanto no resulta de interés para la presente investigación.

4.- MATERIAL Y MÉTODOS

4.1.- INSTALACIONES Y PERSONAL

Los ensayos experimentales del TFM se efectuaron en las instalaciones de AIDIMME, situado en el Parque Tecnológico de Paterna (Valencia). Tanto los ensayos mediante TND como los ensayos destructivos, se realizaron en los laboratorios e instalaciones del Departamento de Tecnología y Biotecnología de la Madera.

El personal que ha supervisado y guiado los ensayos se compone por Miguel Redón Santafé (Tutor académico del TFM), Miguel Ángel Abián Pérez (Tutor de Empresa del TFM y Jefe del Departamento de Tecnología y Biotecnología de la Madera), Guillem Segura Orenge (Investigador del Dpto. de Tecnología y Biotecnología de la Madera) y Guillermo Vicente Martínez (Técnico del Dpto. de Tecnología y Biotecnología de la Madera).

4.2.- MATERIAL DE ENSAYO

Se describe y amplían características e información de los materiales de ensayo en el ANEXO 2. MATERIAL Y EQUIPOS.

4.2.1.- ESPECIES DE MADERA PARA ENSAYOS EN VIGAS (TND vs. ENSAYO DE ROTURA)

Las especies objeto de estudio en el análisis de las propiedades físico-mecánicas mediante TND, y ensayo de rotura a flexión se componen por 15 vigas de pino silvestre y 15 vigas de pino laricio, procedentes del aserradero Maderas Cuenca, situado en Mohorte (Cuenca), así como 15 vigas de pino resinero y 16 vigas de pino carrasco, procedentes del aserradero Requetal Aserradero, situado en Requena (Valencia). Todas las vigas tienen unas dimensiones nominales de 108 x 80 x 4000 milímetros. En la Figura 1 se muestra el lote de vigas de la especie pino laricio.



Figura 1. Vista general de las vigas de la especie pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.- ESPECIES DE MADERA PARA ENSAYOS COMPARATIVOS DE LAS GRÁFICAS “DRILL RESISTANCE” Y “FEED FORCE” MEDIANTE INCISIONES RESISTOGRÁFICAS

Las muestras para la realización de la comparación entre los tipos de gráficas *feed force* y *drill resistance* se clasifican en diferentes grupos, en función de la tipología del defecto o degradación objeto de estudio. Las muestras seleccionadas varían de especies, tamaño, tipología y defectos.

Cada ensayo se realiza con una o dos muestras que se codifican con un número y siglas de cada ensayo al que pertenecen, aplicando a cada muestra una o dos incisiones con el equipo de resistografía. Los números de muestra no son correlativos, pues por la variabilidad de la madera hay vigas que no presentaban las anomalías o degradaciones requeridas para la realización de los ensayos. En la Tabla 3 se esquematizan los diferentes tipos de muestras.

Ensayo	Tipología	N.º de muestra	N.º de incisión	Dimensiones (mm)	Especie
Nº1	Albura/Médula/Duramen	1_N1	1	263x80x178	Pino silvestre
			2		
		3_N1	3	178x80x235	
Nº2	Carcoma fina	1_N2	4	254x225x94	Mobila
			5		
Nº3	Nudos	8_N3	6	233x170x85	Pino laricio
			7		
		1_N3	8	175x80x141	
Nº4	Fendas	1_N4	9	180x74x150	Abeto
Nº5	Anillos	1_N5	10	380x85x170	Pino radiata
Nº6	Carcoma gruesa	1_N6	11	15x15x78	Pino carrasco
			12		

Tabla 3. Clasificación ensayos comparativos de las gráficas resistográficas. Fuente: Elaboración propia.

Las muestras contienen un porcentaje de humedad en torno al 12% y se componen por las especies *Pinus sylvestris* L. (pino silvestre), *Pinus nigra* J.F. Arnold. Subsp. *Salzmannii*, *Pinus halepensis* Mill. (pino carrasco), *Pinus radiata* D.Don. (pino radiata), *Picea abies* L. (abeto) y la especie conocida como Mobila, donde debe ese nombre a que se traía importada desde el puerto de la bahía de Mobile, y proviene de 4 especies (*Pinus palustris* Mill., *Pinus tadea* L., *Pinus elliottii* Engelm., *Pinus echinata* Mill.).

En la Figura 2 se observa un ejemplo de muestra para la realización de los ensayos.



Figura 2. Ejemplo de muestra para ensayos comparativos de las gráficas. Fuente: Elaboración propia.

4.3.- EQUIPOS UTILIZADOS

En el ANEXO 2. MATERIAL Y EQUIPOS se describen, muestran, y amplían características e información de los equipos utilizados.

4.3.1.- EQUIPO DE EMISIÓN-RECEPCIÓN DE ULTRASONIDOS

El equipo utilizado para la obtención de las características resistentes mediante ultrasonidos es el equipo Sylvatest TRIO® (Figura 3), que proporciona el MOE y MOR dinámicos, así como su clase resistente en cuanto al CTE.



Figura 3. Equipo Sylvatest TRIO®. Fuente: Elaboración propia.

4.3.2.- EQUIPO DE VIBRACIONES INDUCIDAS

Los ensayos por vibraciones inducidas se realizan con el equipo Timber Grader MTG (Figura 4).



Figura 4. Equipo Timber Grader MTG. Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.- EQUIPO DE RESISTOGRAFÍA

Las incisiones resistográficas se realizan con el equipo IML-RESI modelo PD400 (Figura 5). Este proporciona tanto la gráfica convencional *drill resistance* y la gráfica *feed force*. Esta última gráfica se considera más fiable, ya que no contabiliza la fricción de la broca con las virutas de madera mientras se realiza la perforación, la broca queda aprisionada por las virutas de madera que se crean en el propio túnel de perforación, y el aprisionamiento de la broca, y por tanto su rozamiento, aumenta conforme más largo es el túnel de perforación. Este fenómeno de aprisionamiento y fricción creado en el túnel de la broca se conoce como fricción del eje (*saft-friction*).

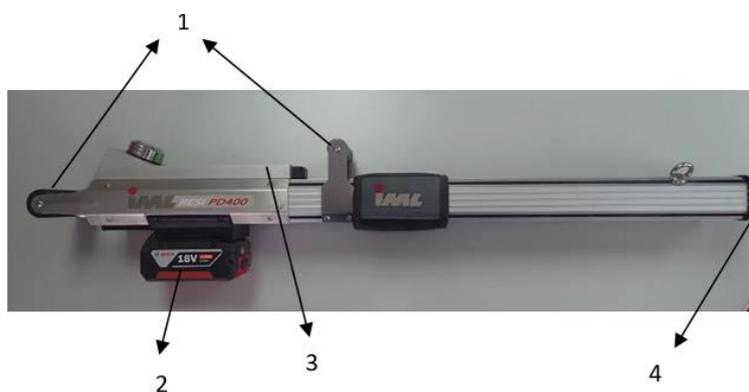


Figura 5. Instrumento de perforación. 1; asideros, 2; batería, 3; unidad digital, 4; aguja perforadora. Fuente: AIDIMME.

4.3.4.- EQUIPO DE MEDICIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD

Las comprobaciones del contenido de humedad de las vigas se realizan con un higrómetro resistivo modelo RTU 600 y un higrómetro capacitivo modelo GANN JT 85T.

4.3.5.- BANCO DE ENSAYO

Se realiza un diseño y montaje de banco de ensayo en las instalaciones de AIDIMME. En la Figura 6 se muestra cada uno de sus componentes.

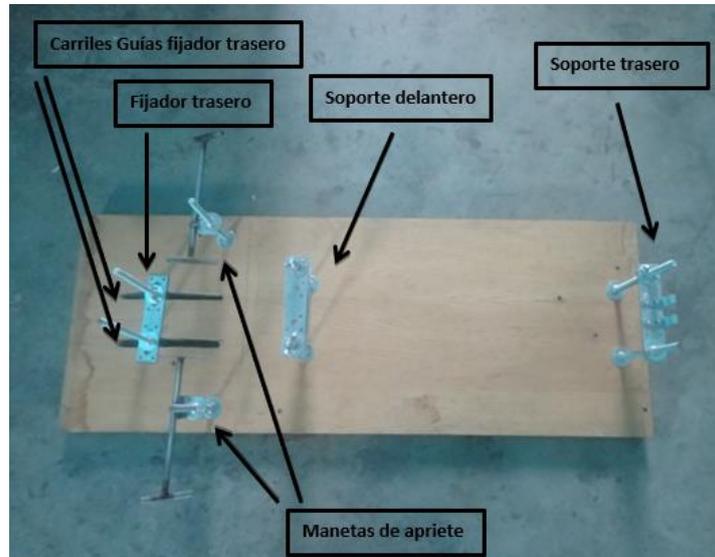


Figura 6. Banco de ensayo con sus distintas fijaciones. Fuente: Elaboración propia.

4.3.6.- MÁQUINA DE ENSAYO A FLEXIÓN

Los ensayos de rotura se realizaron en la máquina de compresión Lansmont modelo 122-15, que se muestra en la siguiente Figura.

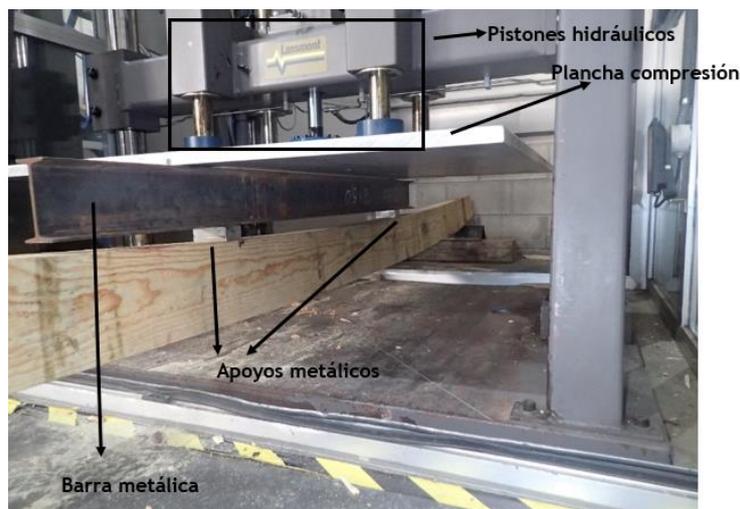


Figura 7. Ensayo de rotura a flexión y componentes. Fuente: Elaboración propia.

4.4.- EQUIPOS AUXILIARES

Para la realización del conjunto de ensayos se hizo indispensable la utilización de los siguientes equipos auxiliares: flexómetros, balanza analítica Sartorius Extend modelo ED124S, basculas de pesaje modelo PCE-WS 30 y modelo KERN DS, regla milimetrada metálica, pie de rey digital Alpha Tools, motosierra STIHL MS 210, carro metálico para el transporte de vigas, transpaleta manual, carretilla elevadora de dos horquillas, taladro de alimentación a red eléctrica, fotocopiadora/escaner, zancas madera/metal para apoyo de vigas en ensayo de rotura a flexión, viga metálica perfil metálico IPN 120 mm, soportes metálicos utilizados como apoyos para la transmisión de fuerzas entre viga metálica y viga de madera, cámara fotográfica modelo Olympus TG5, brocas cónicas, alargaderas eléctricas, lijadora Toledo PBS-702N y sierra de bandas.

4.5.- PROCEDIMIENTOS SOBRE LAS MUESTRAS PARA LOS ENSAYOS COMPARATIVOS DE LAS GRÁFICAS “DRILL RESISTANCE” Y “FEED FORCE” MEDIANTE INCISIONES RESISTOGRÁFICAS.

En el ANEXO 3. METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS SOBRE MUESTRAS se presenta con información más ampliada y detallada el procedimiento realizado sobre las muestras para los ensayos comparativos de gráficas resistográficas.

4.5.1.- DISEÑO Y MONTAJE DE BANCO DE ENSAYO

El banco de ensayo se diseña para que el equipo de resistografía IML-RESI PD 400 funcione óptimamente; es decir, para que la aguja del equipo permanezca lo más perpendicular posible a la madera y no se desvíe durante el ensayo.

4.5.2.- ELECCIÓN DE MUESTRAS Y MÉTODO DE ENSAYO

Las muestras para los ensayos se escogen de manera que cada una presente diferentes particularidades y degradaciones, de esta forma se pretende comparar la eficacia de la gráfica *feed force* frente a la gráfica *drill resistance*.

Primeramente, se colocan y posicionan fijamente mediante las palomillas de apriete las muestras y el resistógrafo en el banco de ensayo, de manera que las particularidades de la madera y las degradaciones coincidan con el recorrido a realizar por la broca. De esta forma se puede comparar de manera verídica la gráfica *drill resistance* frente a la gráfica *feed force*. Una vez se procede a la realización de la resistografía esta se detiene cuando la aguja ha travesado toda la sección de la muestra.

En la muestra se marca la sección de la pieza por donde va a transcurrir el recorrido de la broca, sin sufrir desviación al mantenerse el conjunto resistógrafo/muestra inmóvil en toda la duración del ensayo. También se marca con una cruz los puntos de incisión y salida de la broca. En la Figura 8 se muestra la colocación de resistógrafo y muestra en el banco de ensayo.



Figura 8. Banco de ensayo. Fuente: Elaboración propia.

Los datos aportados por el equipo de resistografía se vuelcan al programa PD-Tools Pro, que se proporciona con el equipo y muestra las gráficas extraídas; en verde la gráfica *drill resistance* y en color azul la gráfica *feed force* (Figura 9).

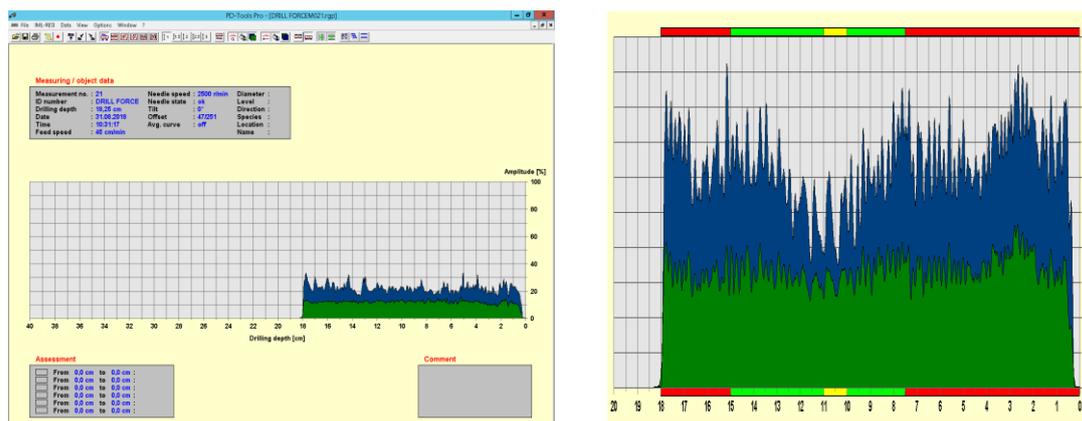


Figura 9. Vista general pantalla PD Tools Pro. Fuente: Elaboración propia.

El programa también detalla el conjunto de mediciones que analiza el resistógrafo (Tabla 4):

MEDICIONES			
NOMBRE INGLÉS	CARACTER	NOMBRE INGLÉS	CARACTER
Measurement no.	Número de resistografía	Offset	Compensación
ID number	Número ID	Avg. curve	Promedio curva
Drilling depth	Profundidad de perforación	Diameter	Diámetro
Date	Fecha	Level	Nivel
Time	Hora	Direction	Dirección
Feed speed	Velocidad de avance	Species	Especies
Needle speed	Velocidad de rotación	Location	Localización
Needle state	Estado de la broca	Name	Nombre
Tilt	Inclinación	Assessment	Evaluación

Tabla 4. Medidas aportadas por PD Tools Pro. Fuente: Elaboración propia.

4.5.3.- MÉTODO VISUAL PARA LA COMPARACIÓN DE LAS GRÁFICAS RESISTOGRÁFICAS “DRILL RESISTANCE” Y “FEED FORCE”.

Posteriormente a la realización de la resistografías en las muestras y al vuelco de datos en el programa PD-Tools Pro y Excel, se realiza una digitalización de la imagen de la sección de las muestras mediante escáner.

En las muestras de degradaciones producidas por carcoma fina y gruesa se procede a la realización del corte de las muestras mediante la sierra de bandas, justo por la incisión que realiza la resistografía, y se escanea la sección.

Con el programa Excel se realizan gráficas de las resistografías, mostrando en color verde la gráfica *drill resistance* y en azul la gráfica *feed force*. Estas se superponen sobre la imagen digitalizada de las secciones de las muestras, de manera que la longitud de la resistografía coincide con la longitud de la sección de la muestra.

4.6.- PROCEDIMIENTOS DE LOS ENSAYOS SOBRE VIGAS

Todas las vigas llegaron con un contenido de humedad por encima del punto de saturación de la fibra (PSF) y se secaron en las instalaciones de AIDIMME hasta alcanzar un contenido de humedad de aproximadamente 12%. Después se realizaron los ensayos. En el ANEXO 4. METODOLOGÍA DE LOS ENSAYO SOBRE VIGAS se desarrolla y describe más detalladamente la metodología aplicada sobre las vigas de madera.

4.6.1.- METODOLOGÍA PROPUESTA DE EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DE LA MADERA ESTRUCTURAL DEL GÉNERO *PINUS*

Se propone una metodología de END de la madera estructural del género *Pinus* que:

- a) pueda usarse *in situ*;
- b) proporcione resultados cuantitativos precisos y fiables para su uso en cálculos estructurales.

La metodología propuesta se basa en los siguientes pasos:

4.6.1.1.- MEDICIÓN Y PESO

El elemento se mide con flexómetro y se pesa mediante las básculas de pesaje.

4.6.1.2.- CÁLCULO DE LA DENSIDAD

Se calcula la densidad de las vigas y de las rebanadas extraídas de cada una de ellas según norma UNE-EN 408:2011+A1.

Para la densidad de las vigas se utilizan dos métodos distintos, por un lado, se calcula la *densidad viga* calculando el volumen con las mediciones realizadas con flexómetro, y se calcula la *densidad real* con las mediciones realizadas con flexómetro de la longitud de la viga y las mediciones de cara y canto realizadas con pie de rey sobre cada una de las rebanadas.

La densidad de las rebanadas se denomina *densidad rebanada* y las medidas de volumen se realizan con pie de rey.

4.6.1.3.- CLASIFICACIÓN VISUAL

Se realiza una clasificación visual según la norma UNE 56544:2011, estableciendo la calidad MEG. En esta clasificación se tienen en cuenta la presencia de nudos, anillos, fendas, acebolladuras, resina, desviación de las fibras, gemas y deformaciones.

4.6.1.4.- MEDICIÓN DE NUDOS

Se realiza la medición de nudos, que forma parte de la evaluación visual, según indica la norma UNE-EN 1310:1997. Las vigas se dividen en tres tercios denominados primer tercio, segundo tercio o zona central y tercer tercio, de una longitud cada parte de aproximadamente 1,33 metros.

Se anota la dimensión de cada uno de los nudos que recoge la norma y se anota el número total de nudos en cada tercio y en el conjunto de toda la viga.

De esta forma se establecen dos variables, una primera con el número de nudos totales en la pieza (n° nudos total) y una segunda con el número de nudos en la zona central de la viga (n° nudos zona central).

4.6.1.5.- CÁLCULO CKDR

Se establece el cálculo de un índice para contabilizar la nudosidad mediante el parámetro CKDR, este se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$CKDR = \frac{\sum d_i}{2(b + h)}$$

Siendo:

d_i suma del diámetro de los nudos.

b dimensión de la cara de la viga.

h dimensión del canto de la viga.

Este índice se establece tanto para el total de la viga (*CKDR Viga completa*), como solo para el tercio central de la misma (*CKDR Zona central*).

4.6.1.6.- ENSAYO MEDIANTE TÉCNICA DE EMISIÓN-RECEPCIÓN DE ULTRASONIDOS

Los ensayos de ultrasonidos se realizan en cada una de las vigas mediante tres métodos diferentes: método directo testa a testa, en el cual se toman dos medidas colocando los sensores a 1/3 y otra a 2/3 de la testa, método indirecto, tomando medidas en las dos caras y dos cantos de la viga, método semidirecto, tomando mediciones en caras y cantos opuestos dos a dos. Las mediciones semidirectas e indirectas se realizan en medio de la longitud de la cara o bien el canto. Posteriormente se establece la media del conjunto de todas las medidas. En la Fig. 10 se muestra la realización del ensayo.

Como resultado se obtiene la variable *Sylvatest media MOE* y *Sylvatest media MOR*, así como la variable *Velocidad Sylvatest media*.



Figura 10. Realización ensayo de ultrasonidos. Fuente: Elaboración propia.

4.6.1.7.- ENSAYO MEDIANTE TÉCNICA DE VIBRACIONES INDUCIDAS

Se realizan las mediciones en cada una de las vigas con el equipo Timber grader MTG (Figura 11). El equipo proporciona directamente el MOE dinámico, una vez se le han introducido anteriormente las dimensiones y pesos de cada una de las viguetas. Para el cálculo del valor de la resistencia a flexión se utiliza la ecuación que proporciona el cálculo del equipo Sylvatest. Como resultado se obtienen las variables *Timber grader MOE* y *Timber grader MOR*.



Figura 11. Realización ensayo vibraciones inducidas. Fuente: Elaboración propia.

4.6.1.8.- ENSAYO MEDIANTE TÉCNICA DE RESISTOGRAFÍA

Se realizan 10 resistografías en cada viga (Figura 12), de las cuales 5 son en sentido vertical y 5 en sentido horizontal. Cada resistografía se realiza aproximadamente a 1/6 de la longitud total de la viga, y se evita el incidir en particularidades como nudos, bolsas de resina, etc. Como resultado se obtienen las variables *Drill H 0.5*, *Drill V 0.5*, *Feed H 0.5* y *Feed V 0.5*.



Figura 12. Realización de resistografía horizontal. Fuente: Elaboración propia.

4.6.1.9.- DETERMINACIÓN DE LA PROPORCIÓN DE DURAMEN Y ALBURA

Se calcula el porcentaje de albura y duramen que contiene cada una de las rebanadas extraídas de las vigas, posteriormente se realizan un escaneo y medición de la superficie de las testas de las rebanadas mediante el programa informático Adobe Reader Pro, y se realiza el cálculo de la proporción.

Como resultado se obtienen las variables % *Albura* y % *Duramen*.

4.6.2.- PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE ROTURA A FLEXIÓN

El ensayo de rotura a flexión se realiza según norma UNE-EN 408:2011+A1 (Fig. 13).

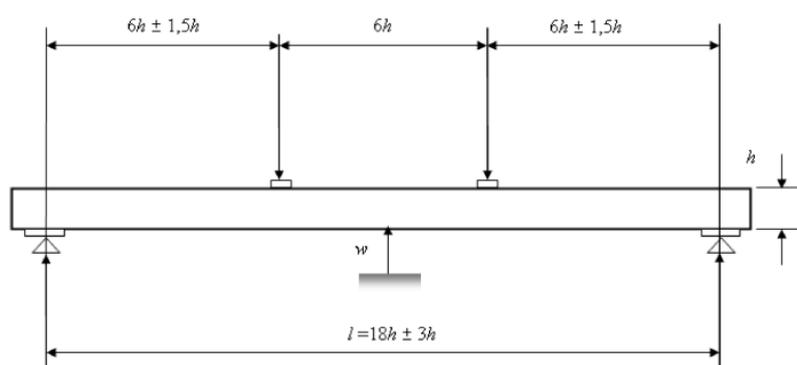


Figura 13. Dispositivo de ensayo para la medición del módulo de elasticidad global en flexión. Fuente: UNE EN 408:2011+A1.

De esta manera la deformación “w” debe medirse en el centro de la luz y en el centro del borde traccionado o comprimido, y en el caso de que “w” se mida en el eje neutro, debe tomarse la media de las mediciones realizadas en ambas caras de la muestra.

Debido a las limitaciones en el equipo de rotura del laboratorio de AIDIMME la deformación “w” medida en los ensayos no corresponde a la especificada por la norma UNE-EN 408:2011+A1, ya que en las instalaciones no se cuenta con una máquina universal de ensayo específica para la realización de este ensayo. En el ANEXO 7 JUSTIFICACIÓN DE LA DEFORMACIÓN “W”, se muestran las comprobaciones realizadas para la observación de la variación de resultados al no realizar el ensayo tal como indica estrictamente la norma. En la Figura 14 se muestran ejemplos de roturas posteriores a la realización del ensayo.



Figura 14. Rotura de vigas en ensayo a flexión. Fuente: Elaboración propia.

El cálculo de la variable *MOE Global flexión* se realiza mediante la siguiente expresión:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)}$$

Siendo:

- a distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo, en milímetros.
- b anchura de la sección transversal en un ensayo a flexión, o la menor dimensión de la sección transversal en milímetros.
- h altura de la sección en los ensayos de flexión, o dimensión mayor de la sección, en milímetros.
- w deformación en milímetros.
- l distancia entre apoyos.
- G módulo de elasticidad transversal, en Newtons por milímetro cuadrado.
- $w_2 - w_1$ es el incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$, en milímetros.

El cálculo de la variable *MOR Resistencia flexión axial* se realiza mediante la siguiente expresión:

$$f_m = \frac{3F_{m\acute{a}x}a}{bh^2}$$

Siendo:

- $F_{m\acute{a}x}$ carga máxima en Newtons.
- a distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo, en milímetros.
- b anchura de la sección transversal en un ensayo a flexión, o la menor dimensión de la sección transversal en milímetros.
- h altura de la sección en los ensayos de flexión, o dimensión mayor de la sección, en milímetros.

4.7.- VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Para validar la metodología propuesta de END mediante TND se comparan estadísticamente los resultados obtenidos del ensayo de rotura a flexión con los obtenidos de las TND. En concreto, la validación se realiza con una población de muestras de 61 vigas, 15 vigas de cada especie exceptuando 16 vigas para la especie de pino carrasco.

Se realizan análisis estadístico de regresión lineal, que nos permite predecir una medida basándonos en el conocimiento de otras. Estas regresiones se realizan con el software SPSS (Statistical Product and Service Solutions) estableciendo un nivel de significación igual a 0,05, y consta de variables dependientes y variables independientes.

Las variables dependientes que se han analizado corresponden a las obtenidas en los ensayos de rotura a flexión, y las variables independientes a las obtenidas mediante TND de los ensayos realizados en las vigas.

El coeficiente de determinación (R^2) permite evaluar la bondad del ajuste, y representa que porcentaje de la varianza de la variable dependiente es explicada por las variables independientes.

5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1.- ANÁLISIS DE LA COMPARACIÓN DE LAS GRÁFICAS “DRILL RESISTANCE” Y “FEED FORCE” MEDIANTE INCISIONES RESISTOGRÁFICAS.

Se realizó una comparación visual mediante la superposición de las gráficas resistográficas en formato de hoja de cálculo Excel y las imágenes escaneadas de las muestras para cada una de las incisiones realizadas, de manera que la longitud de las gráficas coincide con la longitud de la sección de las muestras, presentando las singularidades o deterioros de las muestras a la vez que se observan las variaciones de amplitud de las gráficas.

Mediante el análisis también se pretende verificar si pueden detectarse con mayor eficacia y exactitud diferentes degradaciones de elementos estructurales de madera, realizando un análisis cualitativo de la gráfica resistográfica de fuerza de avance (*feed force*) que es una innovación reciente respecto a las gráficas resistográficas convencionales.

En el ANEXO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS COMPARATIVOS DE GRÁFICAS RESISTOGRÁFICAS SOBRE MUESTRAS se analizan cada una de las muestras, se establece un planteamiento general y se expone cada análisis realizado en función de la tipología, número de muestra y el número de incisión.

En la Figura 15 se muestran dos ejemplos de análisis realizados.

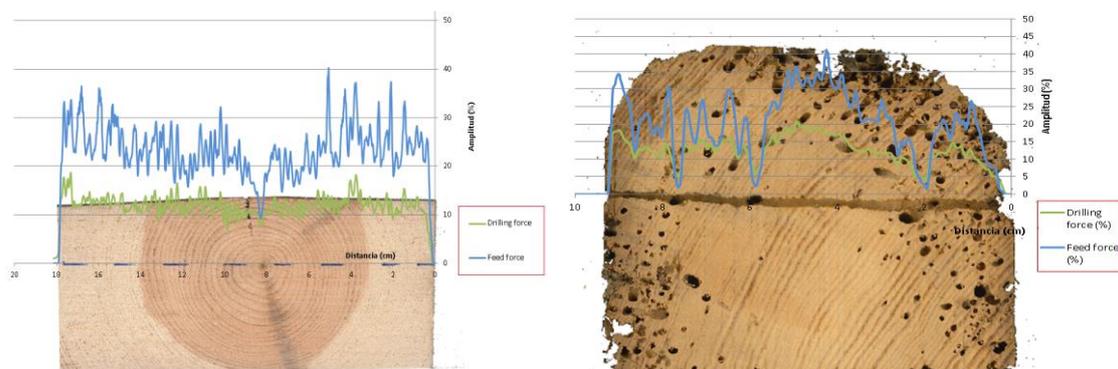


Figura 15. Ejemplos de análisis gráficos sobre muestras. Fuente: Elaboración propia.

A la vista de los resultados obtenidos se concluye que la gráfica *feed force* muestra en general con mayor detalle las degradaciones y anomalías, exceptuando la diferencia entre albura y duramen. Asimismo, hace visibles algunos detalles que en la gráfica *drill resistance* no son apreciables.

A continuación, se explican con más detalle las diferencias y semejanzas de ambas gráficas para la detección de anomalías o degradaciones de la madera:

- **Médula:** Se detecta mejor con la gráfica *feed force*, pues su caída es más acentuada. En algunos casos, en la gráfica *drill resistance* apenas se aprecia la diferencia entre médula y madera normal.
- **Albura/Duramen:** Ninguna de las dos gráficas diferencia entre albura y duramen. Por tanto, la técnica de resistografía no es adecuada para diferenciarlas.
- **Carcoma:** Los orificios se aprecian mejor con la gráfica *feed force*. En algunos casos, en la gráfica *drill resistance* apenas se aprecian.
- **Anillos:** Se diferencian mejor con la gráfica *feed force*.
- **Nudos:** Se aprecian mucho mejor con la gráfica *feed force*, sobre todo cuando la aguja del resistógrafo sale del nudo.
- **Fendas:** Las dos gráficas permiten detectar las fendas. El hecho de que la gráfica *feed force* no muestre con mayor detalle el paso por la fenda podría deberse a la baja sección de las muestras analizadas.

5.2.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA SOBRE VIGAS

En el ANEXO 8. TABLAS DE RESULTADOS se muestran los resultados obtenidos de todo el conjunto de ensayos.

El conjunto completo de análisis realizados se detalla en el ANEXO 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS ENSAYOS SOBRE VIGAS.

Los datos extraídos en la realización de los ensayos se han recopilado y tratado con el programa informático Microsoft Excel 2019 y el Software SPSS.

5.2.1.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MOE ESTÁTICO Y EL MOR ESTÁTICO EN FUNCIÓN DE VARIABLES Y PARÁMETROS DE LA MADERA

Se procede a realizar análisis multivariantes con el programa informático SPSS y las variables dependientes *MOE Global flexión* y *MOR Resistencia flexión* y las variables independientes *especie*, *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *Feed V 0.5*, *Feed H 0.5*, *Drill V 0.5*, *Drill H 0.5*, *velocidad ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR viga completa*, *CKDR zona central*.

5.2.1.1.- Análisis del módulo de elasticidad

Se realizan análisis con las muestras de cada una de las especies por separado, así como un análisis con las muestras de las cuatro especies en su conjunto. Para los análisis de las muestras de cada una de las especies por separado se realizan regresiones lineales entre la variable dependiente *MOE global flexión*, obtenido mediante el ensayo de flexión a rotura, y las siguientes variables independientes: *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *Feed V 0.5*, *Feed H 0.5*, *Drill V 0.5*, *Drill H 0.5*, *velocidad ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR viga completa*, *CKDR zona central*. En el análisis del conjunto con las cuatro especies se lleva a cabo el mismo procedimiento, incluyendo en las variables anteriores la variable independiente *especie*.

Se muestran en la Tabla 5 las ecuaciones y coeficientes de determinación para cada uno de los análisis realizados, obtenidos únicamente con las variables y parámetros estadísticamente significativos (nivel de significación= 0,05).

MÓDULO DE ELASTICIDAD (MOE)		
ESPECIE	ECUACIÓN	COEF. DETER. R² (%)
Pino silvestre	$MOE \text{ global flexión (N/mm}^2) = -15927,5 + 5,797 * \text{Velocidad Ultrasonidos media (m/s)}$.	52,2
Pino resinero	$MOE \text{ global flexión (N/mm}^2) = -28407,4 + 49,2512 * \text{Densidad real (Kg/m}^3) - 392,502 * \text{Feed V 0,5} - 59,6842 * \text{N}^{\circ} \text{ nudos total} + 5,66412 * \text{Velocidad Ultrasonidos media (m/s)}$.	95,1
Pino laricio	$MOE \text{ global flexión (N/mm}^2) = -10011,7 + 4,47387 * \text{Velocidad Ultrasonidos media (m/s)}$.	72,9
Pino carrasco	$MOE \text{ global flexión (N/mm}^2) = -7578,032 + 9,511 * \text{Velocidad Ultrasonidos media (m/s)} - 242,150 * \% \text{ Albura}$	70,9
Para las cuatro especies	$MOE \text{ global flexión (N/mm}^2) = -17900,217 + 17,221 * \% \text{ Duramen} + 257,436 * \text{Feed H 0,5} + 4,839 * \text{Velocidad ultrasonidos media (m/s)}$.	72,8

Tabla 5. Ecuaciones obtenidas para la variable MOE para cada especie, y para las cuatro especies en conjunto. Fuente: Elaboración propia.

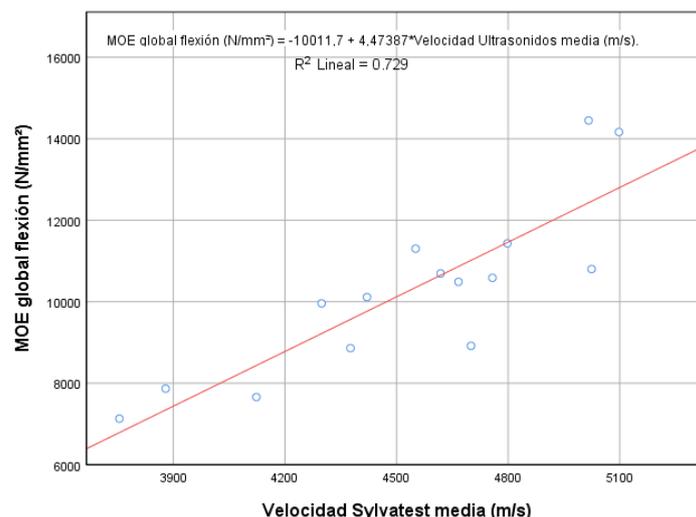


Figura 16. Regresión lineal entre el MOE global flexión y la Velocidad Sylvatest media, para la especie pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

A la vista de los resultados obtenidos se puede concluir que la variable *Velocidad Sylvatest media* es significativa y aparece en todos los análisis, tanto para los análisis del conjunto de especies como para análisis por especies individuales. Las variables que predicen densidad (*densidad real*, *Feed V 0.5*, *Feed H 0.5*) también son escogidas por el programa SPSS con predictoras en algunas especies o para todo el conjunto de las cuatro especies, así como variables de contenido de albura y duramen.

De esta forma las variables que miden nudosidad de las vigas no son significativas en la predicción del *MOE global flexión*, y solo aparece la variable nº nudos total significativa en la especie de pino resinero, aunque únicamente aporta un 5% al R².

Debido a estos resultados se puede comentar que la validación de la metodología no va a incluir la inserción de las variables que miden nudosidad en el cálculo del módulo de elasticidad estático.

5.2.1.2.- Análisis del módulo de rotura/resistencia a flexión

Se realizan análisis con las muestras de cada una de las especies por separado, así como un análisis con las muestras de las cuatro especies en su conjunto. Para los análisis de las muestras de cada una de las especies se realizan regresiones lineales entre *MOR Resistencia flexión axial*, obtenido mediante el ensayo de flexión a rotura, y las siguientes variables y parámetros: *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *Feed V 0.5*, *Feed H 0.5*, *Drill V 0.5*, *Drill H 0.5*, *velocidad ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR viga completa*, *CKDR zona central*. En el análisis del conjunto con las cuatro especies se lleva a cabo el mismo procedimiento, incluyendo en las variables anteriores la variable independiente *especie*.

Se muestran en la Tabla 6 las ecuaciones y coeficientes de determinación para cada uno de los análisis realizados, obtenidos únicamente con las variables y parámetros estadísticamente significativos (nivel de significación= 0,05).

MÓDULO DE ROTURA (MOR)		
ESPECIE	ECUACIÓN	COEF. DETER. R² (%)
Pino silvestre	<i>MOR Resistencia flexión axial = 54,4322 - 555,408*CKDR viga completa.</i>	56,8
Pino resinero	<i>MOR Resistencia flexión axial = 68,113 - 0,148*% Albura - 2857,16*CKDR zona central.</i>	72,1
Pino laricio	<i>MOR Resistencia flexión axial = 49,7245 - 1444,91*CKDR zona central.</i>	50,5
Pino carrasco	<i>MOR Resistencia flexión axial = -30,089 - 1287,19*CKDR viga completa + 5,66023*Drill H 0,5 + 0,938702*% Duramen.</i>	71,3
Para las cuatro especies	<i>MOR Resistencia flexión axial = 53,5025 + 0,468815*Nº nudos total - 1157,01*CKDR viga completa.</i>	60,4

Tabla 6. Ecuaciones obtenidas para la variable MOR para cada especie, y para las cuatro especies en conjunto. Fuente: Elaboración propia.

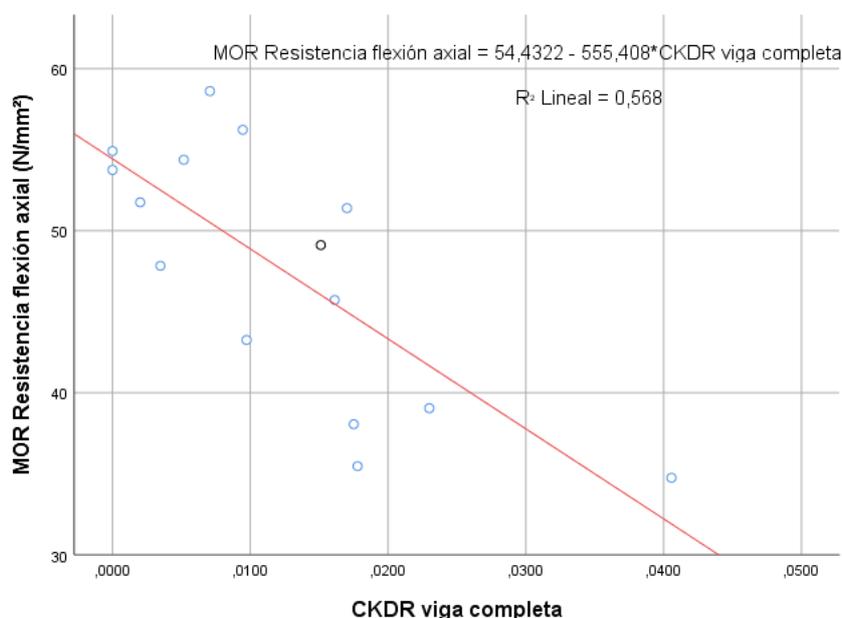


Figura 17. Regresión lineal entre MOR resistencia flexión axial y CKDR viga completa, para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

A la vista de los resultados obtenidos se puede concluir que las variables que proporcionan mayor significatividad en la predicción de la variable *MOR resistencia flexión axial* son las relacionadas con la medición de la nudosidad de las vigas. De esta forma se entiende que los valores de rotura dependen en mayor grado de la nudosidad de las vigas, ya que estos influyen directamente con su resistencia.

La influencia de la relación entre nudosidad y resistencia a flexión hace que este parámetro sea relevante en la validación de la metodología propuesta.

5.2.2.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MOE-MOR ESTÁTICO (ENSAYO DESTRUCTIVO) EN FUNCIÓN DEL MOE Y MOR OBTENIDO MEDIANTE TND Y VARIABLES Y PARÁMETROS DE LA MADERA

Se procede a realizar análisis multivariantes con el programa informático SPSS y las variables dependientes *MOE Global flexión* y *MOR Resistencia flexión* y las variables independientes obtenidas de forma no destructiva mediante la técnica de emisión-recepción de ultrasonidos y vibraciones inducidas (*MOE Sylvatest media* y *MOE Timber grader*) y las siguientes: *especie*, *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *Feed V 0.5*, *Feed H 0.5*, *Drill V 0.5*, *Drill H 0.5*, *velocidad ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR viga completa*, *CKDR zona central*.

5.2.2.1.- Análisis del módulo de elasticidad

Se realizan análisis con las muestras de cada una de las especies por separado, así como un análisis con las muestras de las cuatro especies en su conjunto. Para los análisis de las muestras de cada una de las especies se realizan regresiones lineales entre *MOE Global flexión*, obtenido mediante el ensayo de flexión a rotura, y el MOE dinámico obtenido de forma no destructiva mediante la técnica de emisión-recepción de ultrasonidos y vibraciones inducidas (*Sylvatest media MOE* y *MOE Timber grader*), y las siguientes variables: *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *Feed V 0.5*, *Feed H 0.5*, *Drill V 0.5*, *Drill H 0.5*, *velocidad ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR viga completa*, *CKDR zona central*. En el análisis del conjunto con las cuatro especies se lleva a cabo el mismo procedimiento incluyendo en las variables independientes anteriores la variable especie.

Se muestran en la Tabla 7 las ecuaciones y coeficientes de determinación para cada uno de los análisis realizados obtenidos únicamente con las variables y parámetros estadísticamente significativos (nivel de significación= 0,05).

MÓDULO DE ELASTICIDAD (MOE)		
ESPECIE	ECUACIÓN	COEF. DETER. R² (%)
Pino silvestre	$MOE \text{ global flexión (N/mm}^2) = -15927,5 + 5,79711 * \text{Velocidad Ultrasonidos media (m/s)}$.	52,2
Pino resinero	$MOE \text{ global flexión (N/mm}^2) = -15,358 + 1,01077 * \text{Sylvatest media MOE}$.	82,9
Pino laricio	$MOE \text{ global flexión (N/mm}^2) = -1112,13 + 1,25956 * \text{Timber grader MOE}$.	86,1
Pino carrasco	$MOE \text{ global flexión (N/mm}^2) = -5958,55 + 1,65256 * \text{Timber grader MOE} + 105,034 * \text{N}^\circ \text{ nudos total}$.	89,4
Para las cuatro especies	$MOE \text{ global flexión (N/mm}^2) = -761,455 + 1,26313 * \text{Timber grader MOE} - 381,588 * \text{Drill V 0,5} + 452,362 * \text{Drill H 0,5}$.	81,1

Tabla 7. Ecuaciones obtenidas para la variable MOE en función del dinámico y de características de la madera, para cada especie y para las cuatro especies en conjunto. Fuente: Elaboración propia.

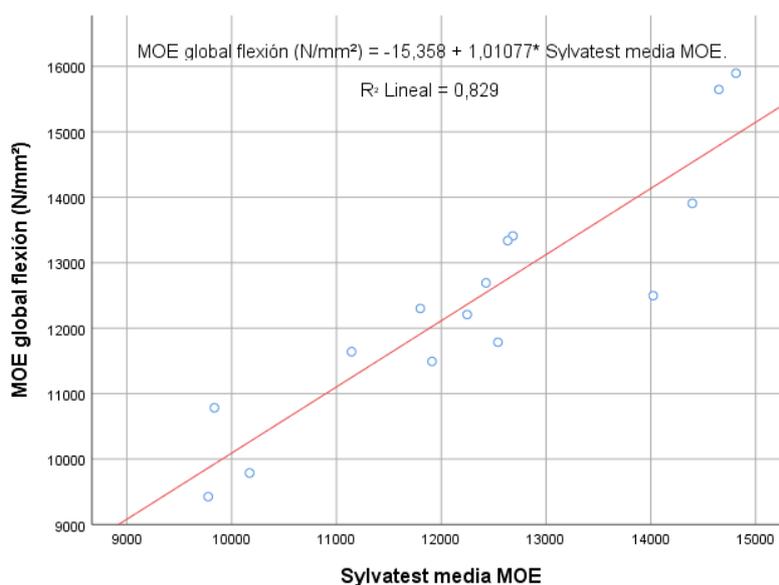


Figura 18. Regresión lineal entre MOE global flexión y Sylvatest media MOE, para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

A la vista de los resultados obtenidos se puede concluir que, en general, incluyendo los equipos que proporcionan directamente valores de MOE y MOR dinámicos se obtienen mejores ajustes de R².

Debido a la importancia de los equipos que proporcionan el MOE dinámico dado su relación con el estático se deberían validar como técnicas a incluir en la metodología.

5.2.2.2.- Análisis del módulo de rotura/resistencia a flexión

Se realizan análisis con las muestras de cada una de las especies por separado, así como un análisis con las muestras de las cuatro especies en su conjunto. Para los análisis de las muestras de cada una de las especies se realizan regresiones lineales entre *MOR Resistencia flexión axial*, obtenido mediante el ensayo de flexión a rotura, y el MOR dinámico obtenido de forma no destructiva mediante la técnica de emisión-recepción de ultrasonidos y vibraciones inducidas (*MOR Sylvatest media* y *MOR Timber grader*), y las siguientes variables: *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *Feed V 0.5*, *Feed H 0.5*, *Drill V 0.5*, *Drill H 0.5*, *velocidad ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR viga completa*, *CKDR zona central*. En el análisis del conjunto con las cuatro especies se lleva a cabo el mismo procedimiento incluyendo en las variables anteriores la variable *especie*.

Se muestran en la Tabla 8 las ecuaciones y coeficientes de determinación para cada uno de los análisis realizados obtenidos únicamente con las variables y parámetros estadísticamente significativos (nivel de significación= 0,05).

MÓDULO DE ROTURA (MOR)		
ESPECIE	ECUACIÓN	COEF. DETER. R² (%)
Pino silvestre	<i>MOR Resistencia flexión axial = 54,4322 - 555,408*CKDR viga completa.</i>	56,8
Pino resinero	<i>MOR Resistencia flexión axial = 68,1135 - 2857,16*CKDR zona central - 0,147502*% Albura.</i>	72,1
Pino laricio	<i>MOR Resistencia flexión axial = 49,725 - 1444,91*CKDR zona central</i>	50,5
Pino carrasco	<i>MOR Resistencia flexión axial = 121,525 + 2,93366*Timber grader MOR - 0,0337525*Velocidad Ultrasonidos media (m/s).</i>	76,7
Para las cuatro especies	<i>MOR Resistencia flexión axial = 42,4883 - 879,499*CKDR viga completa + 1,71395*Timber grader MOR - 0,945908*Ultrasonidos media MOR + 0,423814*Nº nudos total.</i>	70,5

Tabla 8. Ecuaciones obtenidas para la variable MOR en función del dinámico y de características de la madera, para cada especie y para las cuatro especies en conjunto. Fuente: Elaboración propia.

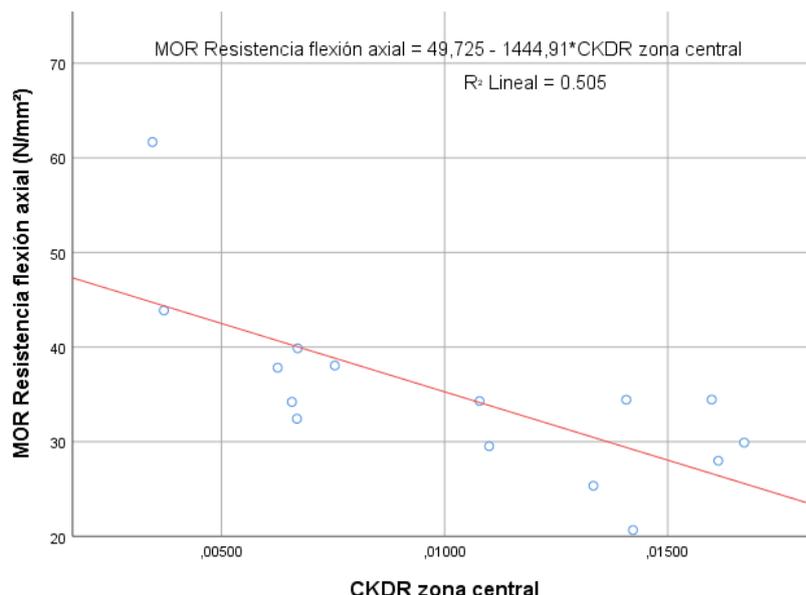


Figura 19. Regresión lineal entre MOR resistencia flexión axial y CKDR zona central, para la especie pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

A la vista de los resultados obtenidos se puede concluir que en general con la incorporación de valores de MOR dinámicos se obtienen mejores ajustes de R^2 , pero para la especie pino resinero no se aprecia aumento del coeficiente R^2 respecto al conseguido sin la incorporación de valores de MOR dinámicos. En cambio, se aprecia para la especie de pino laricio una disminución del coeficiente al incluir valores de MOR dinámicos.

5.2.3.- RESULTADO GENERAL DE LA VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Los resultados estadísticos obtenidos (en todos los análisis se ha obtenido un R^2 superior al 50%) validan la metodología propuesta, si bien hay variables o parámetros no significativos en algunos análisis y, por tanto, la metodología puede simplificarse eliminando algunos ensayos.

Por poner un solo ejemplo, para la predicción del MOE global de flexión de las cuatro especies, basta con que la metodología incluya tres ensayos: determinación de la proporción de duramen y albura, resistografía y emisión-recepción de ultrasonidos.

6.- CONCLUSIONES

Como conclusiones finales principales se citan las siguientes:

- La elaboración de las fichas resumen sobre las técnicas no destructivas ha proporcionado un documento actual, ordenado y con información científico-técnica suficiente del conocimiento sobre la evaluación no destructiva aplicada en madera.
- El análisis comparativo entre las gráficas resistográficas “*drill resistance*” y “*feed force*” ha verificado que esta última gráfica proporciona una detección de degradaciones y anomalías en madera con mayor eficacia y precisión que la gráfica “*drill resistance*”, siendo también más sensible en las variaciones de amplitud al paso de la broca por las anomalías o degradaciones que la gráfica “*drill resistance*”.

A continuación, se explican con más detalle las diferencias y semejanzas de ambas gráficas para la detección de anomalías o degradaciones de la madera:

Médula: Se detecta mejor con la gráfica *feed force*, pues su caída es más acentuada. En algunos casos, en la gráfica *drill resistance* apenas se aprecia la diferencia entre médula y madera normal.

Albura/Duramen: Ninguna de las dos gráficas diferencia entre albura y duramen.

Carcoma: Los orificios se aprecian mejor con la gráfica *feed force*. En algunos casos, en la gráfica *drill resistance* apenas se aprecian.

Anillos: Se diferencian mejor con la gráfica *feed force*.

Nudos: Se aprecian mucho mejor con la gráfica *feed force*, sobre todo cuando la aguja del resistógrafo sale del nudo.

Fendas: Las dos gráficas permiten detectar las fendas. El hecho de que la gráfica *feed force* no muestre con mayor detalle el paso por la fenda podría deberse a la baja sección de las muestras analizadas.

- Se ha propuesto una metodología de END que permite clasificar *in situ* y estructuralmente madera estructural del género *Pinus*.
- La metodología propuesta se ha validado realizando ensayos de flexión a rotura en vigas estructurales. En todos los análisis estadísticos se ha obtenido un R^2 superior al 50%. En algunos análisis hay variables o parámetros no significativos, lo que permite simplificar la metodología eliminando algunos ensayos. Por

poner un solo ejemplo, para la predicción del MOE global de flexión de las cuatro especies, basta con que la metodología incluya tres ensayos: determinación de la proporción de duramen y albura, resistografía y emisión-recepción de ultrasonidos.

- La predicción de la variable que caracteriza la madera (módulo de elasticidad global a flexión) no está relacionada con las variables que contabilizan la nudosidad de las vigas y sí con la velocidad de ondas de ultrasonidos, tanto para el conjunto de las vigas de las cuatro especies ensayadas como para esas mismas especies individualmente. La inclusión de módulos de elasticidad dinámicos calculados por los equipos utilizados aumentan la predicción de las variables estáticas, salvo para el caso del pino resinero.
- La predicción de la variable que caracteriza la madera (módulo de resistencia a flexión axial) está relacionada con las variables que contabilizan la nudosidad de las vigas, y no con la velocidad de las ondas de ultrasonidos. La inclusión de módulos de resistencia a flexión dinámicos no consigue añadir unos aumentos destacables de coeficientes de determinación respecto.

A la vista de los resultados y conclusiones obtenidos se plantean varias posibles líneas futuras de investigación:

- Comparación entre la norma de clasificación visual y la clasificación obtenida mediante las TND, ya que la norma de clasificación visual subestima las propiedades físico-mecánicas reales de la madera.
- Ampliación de la comparación visual de las gráficas resistográficas con un mayor número de ensayos y de variedad de anomalías y degradaciones. También la realización de ensayos sobre probetas con una mayor sección con el fin de que el efecto *soft-fricción* se acentúe y la gráfica *feed force* no muestre dicho efecto.
- Incorporación a la metodología de un nuevo parámetro que incorpore y mida con mayor exactitud la nudosidad de la viga, dándole al parámetro un mayor valor cuando los nudos estén situados en la cara traccionada del ensayo a flexión.
- Aplicación de los mismos ensayos a madera antigua incorporando nuevas variables o parámetros que midan las degradaciones y anomalías típicas de la madera antigua.

7.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FERRÁN, J.J., REDÓN, M., SÁNCHEZ, F.J. (2007). Proyecto y cálculo de estructuras de madera. Parte 1- Teoría (Según CTE SE-M). 278 pp.
- ACUÑA, L., BASTERRA L., CASADO, M., LÓPEZ, G., RAMÓN-CUETO, G., RELEA, E., MARTÍNEZ, C. Y GONZÁLEZ, A. (2011). Aplicación del resistógrafo a la obtención de la densidad y la diferenciación de especies de madera. *Materiales de Construcción* 61(303):451-464.
- ÁLVAREZ, L., BASTERRA, A., CASADO-SANZ, M. Y ACUÑA-RELLO, L. (2005). Aplicación del resistógrafo al diagnóstico de elementos singulares en estructura de madera. *Actas de las I jornadas de investigación en construcción (2-4 de junio de 2005, Madrid)*. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja - CSIC.
- ARRIAGA, F., PERAZA, F., ESTEBAN, M., BOBADILLA, I. Y GARCÍA, F. (2002). Intervención en estructuras de madera. Rivas, AITIM, España.
- BERTHOLF, L.D. (1965). Use of elementary stress wave theory for prediction of dynamic strain in wood. *Bull.* 291. Pullman, WA: Washington State University, College of Engineering.
- BOBADILLA-MALDONADO, I., ESTEBAN-HERRERO, M., ÍÑIGUEZ-GONZÁLEZ, G., ARRIAGA-MARTITEGUI, F., BALLARÍN-MONTESINOS, D. Y PALACIOS-MONTEAGUDO, J. (2007). Estimación de la densidad de la madera aserrada de conífera mediante técnicas no destructivas de arranque de tornillos y penetrómetro y su aplicación en la estimación del módulo de elasticidad. *Informes de la Construcción*, 59(506):107-116.
- BRAY, DON E.; MCBRIDE, DON (1992). *Nondestructive testing techniques* John Wiley & Sons, Inc., 798 p.
- GARCÍA, L., GUNIDEO, A., PEREZA, C., DE PALACIOS, P. (2003). *La madera y su anatomía*. EDITORIAL S.A. MUNDI-PRENSA LIBROS. 330 pp.
- HOYLE, R.J. (1961). A nondestructive test for stiffness of structural lumber. *Forest Products Journal*. 11(6): 251-254.
- JAYNE, B.A. (1955). A nondestructive test of glue bond quality. *Forest Products Journal*. 5(5): 294-301.
- LEE, I.D.G. (1965). Ultrasonic pulse velocity testing considered as a safety measure for timber structures. In: *Proceedings, 2nd Symposium Nondestructive Testing of Wood*. Pullman, WA. 185-203.
- MACHADO, J.S., SARDINHA, R. Y CRUZ, H. (1998). Evaluation of lengthwise variation of mechanical properties by ultrasounds. *Proceedings of 5th World*

- Conference on Timber Engineering, Montreaux, Switzerland, Aug. 1998. Vol. 2:304-311.
- NUTTO, L., BIECHELE, T. (2015). Drilling resistance measurement and the effect of shaft friction - using feed force information for improving decay identification on hard tropical wood. General Technical Report FPL-GTR-239. 19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium.
 - RODRÍGUEZ-ABAD, I. (2009). Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
 - ROSS, R.J. (Ed.). (2015). Nondestructive evaluation of Wood (2nd edition). General Technical Report FPL-GTR-238. Madison, WI: U.S. Department of agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
 - WEI, Q., LEBLON, B., AND LA ROCQUE, A. (2011). On the use of X-ray computed tomography for determining wood properties: a review. Canadian Journal of Forest Research, 41(11):2120-2140.
 - WYCKHUYSE, A. AND MALDAGUE, X. (2001). A study of Wood Inspection by Infrared Thermography, Part I: Wood Pole Inspection by Infrared Thermography. *Research in Nondestructive Evaluation*, 13(1):1-12.

8.- ANEXOS

ÍNDICE ANEXOS

ANEXO 1. FICHAS TND39

ANEXO 2. MATERIAL Y EQUIPOS134

ANEXO 3. METODOLOGÍA SOBRE MUESTRAS PARA ENSAYOS COMPARATIVOS DE GRÁFICAS RESISTOGRÁFICAS159

ANEXO 4. METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS SOBRE VIGAS178

ANEXO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS COMPARATIVOS DE LAS GRÁFICAS “DRILL RESISTANCE” Y “FEED FORCE” MEDIANTE INCISIONES RESISTOGRÁFICAS199

ANEXO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS SOBRE VIGAS.220

ANEXO 7. JUSTIFICACIÓN DE LA DEFORMACIÓN “W”284

ANEXO 8. TABLAS DE RESULTADOS299

ANEXO 1. FICHAS TND

ÍNDICE GENERAL

1.- TÉCNICA DE GEORRADAR	48
1.1.- DEFINICIÓN	48
1.2.- FUNDAMENTOS FÍSICOS.....	49
1.3.- RESULTADOS QUE PROPORCIONA	50
1.4.- VALIDEZ DE LOS RESULTADOS	51
1.5.- VENTAJAS	52
1.6.- DESVENTAJAS	52
2.- TÉCNICA DE MICROONDAS.....	54
2.1.- DEFINICIÓN	54
2.2.- FUNDAMENTOS FÍSICOS.....	55
2.3.- RESULTADOS QUE PROPORCIONA	56
2.4.- VALIDEZ DE LOS RESULTADOS	56
2.5.- VENTAJAS	57
2.6.- DESVENTAJAS	58
3.- TÉCNICA DE RESISTOGRAFÍA	59
3.1.- DEFINICIÓN	59
3.2.- FUNDAMENTOS FÍSICOS.....	60
3.3.- RESULTADOS QUE PROPORCIONA	61
3.4.- VALIDEZ DE LOS RESULTADOS	63
3.5.- VENTAJAS	65
3.6.- DESVENTAJAS	66
4.- TÉCNICA DE RAYOS X	68
4.1.- DEFINICIÓN	68
4.2.- FUNDAMENTOS FÍSICOS.....	69
4.3.- RESULTADOS QUE PROPORCIONA	69
4.4.- VALIDEZ DE LOS RESULTADOS	71
4.5.- VENTAJAS	72

4.6. - DESVENTAJAS	72
5.- TÉCNICA DE ULTRASONIDOS	73
5.1. - DEFINICIÓN	73
5.2. - FUNDAMENTOS FÍSICOS.....	74
5.3. - MÉTODOS DE REALIZACIÓN	76
5.3.1. - MÉTODO DE ECOS DE PULSO	76
5.3.2. - MÉTODO DE TRANSMISIÓN	76
5.3.3. - MÉTODO DE RESONANCIA O DE HAZ ANGULAR	78
5.4. - RESULTADOS QUE PROPORCIONA	78
5.5. - VALIDEZ DE LOS RESULTADOS	78
5.6. - VENTAJAS	81
5.7. - DESVENTAJAS	82
6.- TÉCNICA DE VIBRACIONES INDUCIDAS	83
6.1. - DEFINICIÓN	83
6.2. - FUNDAMENTOS FÍSICOS.....	86
6.3. - RESULTADOS QUE PROPORCIONA	88
6.4. - VALIDEZ DE LOS RESULTADOS	89
6.5. - VENTAJAS	92
6.6. - DESVENTAJAS	92
7.- TÉCNICA DE PENETROMETRÍA	94
7.1. - DEFINICIÓN	94
7.2. - FUNDAMENTOS FÍSICOS.....	95
7.3. - RESULTADOS QUE PROPORCIONA	96
7.4. - VALIDEZ DE LOS RESULTADOS	96
7.5. - VENTAJAS	99
7.6. - DESVENTAJAS	100
8.- TÉCNICA DE EXTRACCIÓN DE TORNILLOS	101
8.1. - DEFINICIÓN	101

8.2.- FUNDAMENTOS FÍSICOS.....	101
8.3.- RESULTADOS QUE PROPORCIONA.....	102
8.4.- VALIDEZ DE LOS RESULTADOS.....	102
8.5.- VENTAJAS	106
8.6.- DESVENTAJAS	106
9.- TÉCNICA DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS.....	108
9.1.- DEFINICIÓN.....	108
9.2.- FUNDAMENTOS FÍSICOS.....	109
9.3.- RESULTADOS QUE PROPORCIONA.....	110
9.4.- VALIDEZ DE LOS RESULTADOS.....	111
9.5.- VENTAJAS	113
9.6.- DESVENTAJAS	113
10.- TÉCNICA DE INSPECCIÓN VISUAL.....	115
10.1.- DEFINICIÓN	115
10.2.- RESULTADOS QUE PROPORCIONA.....	115
10.3.- VENTAJAS	119
10.4.- DESVENTAJAS.....	119
11.- TÉCNICA DE PUNZÓN.....	120
11.1.- DEFINICIÓN	120
11.2.- RESULTADOS QUE PROPOCIONA.....	120
11.3.- VENTAJAS	121
11.4.- DESVENTAJAS.....	121
12.- BIBLIOGRAFÍA ANEXO 1	122
12.1.- BIBLIOGRAFÍA CITADA.....	122
12.2.- BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA.....	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Equipo de georradar comercial.....	49
Figura 2. Ejemplos de antenas de georradar.	49
Figura 3. Estas imágenes muestran: (a) un esquema simplificado de los diferentes componentes de un equipo de georradar; (b) una antena de 1,6 GHz emitiendo sobre una vigueta de madera; (c) un radargrama obtenido en la vigueta.	50
Figura 4. Radargrama obtenido al desplazar la antena del georradar a lo largo de la cara de una vigueta de Pinus radiata.	51
Figura 5. Defectos relacionados con el grano de la madera. La técnica permite detectar el defecto de fibra revirada (spiral grain).	54
Figura 6. Técnica de microondas para la detección de nudos de diferentes tamaños en la sección transversal de un tronco. (a) Distribución real de los nudos. (b) Figura reconstruida con la diferencia de fase entre los dos componentes del campo eléctrico, paralelo y perpendicular a la fibra de la madera.	55
Figura 7. Ensayo de una vigueta de madera con un dispositivo experimental de microondas	55
Figura 8. Comparación de las propiedades de la madera reales y obtenidas con el sistema experimental de microondas para una frecuencia de 10 GHz: a) densidad con la humedad actual; b) densidad en seco; c) contenido en humedad.	57
Figura 9. Instrumento de perforación. 1: asideros; 2: unidad digital de registro de datos; 3: aguja perforadora.	59
Figura 10. Gráfica generada durante el proceso de perforación.	60
Figura 11. Punta de seguridad por la cual surge la aguja perforadora	60
Figura 12. Resistografía de madera de pino y corte de la probeta en la sección del taladro.	62
Figura 13. Variaciones de densidad en Quercus robur (roble común o roble fresnal) como se muestran en una resistografía.....	62
Figura 14. Resistograma de la cabeza de una vigueta atacada por hongos de pudrición. La capacidad mecánica de esa zona es casi nula.	62
Figura 15. Resistograma de la cabeza de una viga de carga atacada por termitas. Varios centímetros del elemento están completamente degradados.....	63
Figura 16. Resistograma del centro de una cercha atacada por termitas. Desde un punto de vista estructural, a partir de una profundidad de 7 cm el elemento ha desaparecido.	63

Figura 17. Gráficas de densidad bruta de madera seca obtenidas mediante rayos X y gráficas de resistografía para las especies <i>Abies alba</i> (izquierda) y <i>Larix decidua</i> (derecha). La correspondencia es casi exacta.....	64
Figura 18. Perfil resistográfico de madera con degradación al final de la muestra...	65
Figura 19. Perfil resistográfico de madera con ataque por hongos de pudrición.	65
Figura 20. Equipo comercial CT Log de inspección de madera mediante rayos X en tiempo real.	68
Figura 21. Reconstrucción 3D del interior de un tronco mediante CT Log. A partir de la Figura puede realizarse un aserrado óptimo, con el mínimo desperdicio de material.	68
Figura 22. Sistema portátil digital de rayos X RTR-4.	68
Figura 23. Perfiles de densidad de <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>urophylla</i> (La zona A está sana y la zona B presenta hongos de pudrición) obtenidos mediante densitometría de rayos X.....	70
Figura 24. Proceso de análisis por rayos X de una sección de un tronco (tomografía). Puede apreciarse en (d) la presencia de varios nudos y las zonas de albura (gris claro) y duramen (negra).....	70
Figura 25. Figura 3D por rayos X de un tronco.	70
Figura 26. Verificación del método de calibración de la escala de grises (derecha) usando ciertas muestras de madera de varias especies (derecha) para correlacionar con la densidad.	71
Figura 27. Equipo de ultrasonidos Sylvatest TRIO.....	74
Figura 28. Equipo de ultrasonidos Pundit PL-200	74
Figura 29. Equipo de ultrasonidos FAKOPP UltraSonic-Timer.	74
Figura 30. Ensayo de ultrasonidos en forjado de madera mediante método indirecto.	77
Figura 31. Viga con extensa degradación en el extremo.	79
Figura 32. Sección de una de las vigas de madera antigua analizada.	80
Figura 33. Sección de otra de las vigas de madera antigua analizada.....	80
Figura 34. Correlación entre los valores del módulo de elasticidad (MOE) dados por métodos no destructivos y los obtenidos mediante el ensayo destructivo que establece la norma UNE EN 408:2003.....	81
Figura 35. Equipo de vibraciones inducidas FAKOPP Microsecond Timer.	84
Figura 36. Equipo de vibraciones inducidas FAKOPP Portable Lumber Grader.....	84

Figura 37. Esquema de un ensayo con FAKKOP Portable Lumber Grader y ensayo real. La balanza se necesita para determinar el peso de la viga, con el cual se calcula la densidad.	85
Figura 38. Equipo de vibraciones inducidas Timber Grader MTG.....	85
Figura 39. Equipo IML Micro Hammer (derecha) y aplicación a un árbol en pie (izquierda).....	85
Figura 40. Equipo Dynagrade para clasificación de madera mediante vibraciones inducidas.....	86
Figura 41. Separación de ondas de presión longitudinales en una vigueta de 427 cm longitud y sección 2x4 cm.....	87
Figura 42. Localizaciones de los puntos nodales en una viga vibrando libremente para el primer modo de vibración (izquierda) y para el tercero (derecha). L es la longitud de la viga.	88
Figura 43. Equipo de vibraciones inducidas con FAKOPP Microsecond Timer. El aparato proporciona solamente la velocidad de la onda de presión (en microsegundos)	89
Figura 44. Resultados de un ensayo con el equipo de vibraciones inducidas Timber Grader MTG. El aparato proporciona en su pantalla el módulo de elasticidad (13947 N/mm ²) y la clase resistente de la madera (C30), que depende de su módulo de rotura	89
Figura 45. Comparación del módulo de elasticidad estático obtenido mediante máquina universal de ensayos según la norma UNE EN 408:2004 y del módulo de elasticidad dinámico obtenido mediante FAKKOP Microsecond Timber (arriba izquierda), IML Micro Hammer (arriba derecha) y FAKKOP Portable Lumber Grader (debajo), haciendo los ensayos de testa a testa en los tres casos. La especie fue abeto de Douglas (197 vigas).	90
Figura 46. Comparación entre las clases resistentes asignadas según el resultado del ensayo de flexión a rotura de acuerdo con la norma UNE EN 408:2004 y las clases resistentes asignadas según el resultado del ensayo no destructivo mediante FAKKOP Portable Lumber Grader. La especie fue abeto de Douglas (197 vigas).....	90
Figura 47. Comparación del módulo de elasticidad estático obtenido mediante máquina universal de ensayos según la norma ASTM D 198 (ASTM 2002) y del módulo de elasticidad dinámico obtenido mediante Timber Grader MTG. La especie fue haya (106 vigas).	91
Figura 48. Penetrómetro PILODYN J6 con la varilla estándar de 2,5 mm de diámetro conectada. El cuerpo del instrumento tiene 270 mm de longitud (con varilla en extensión, 320 mm) y 50 mm de diámetro. La escala de medición se muestra en el	

medio del dispositivo. Todos los pines se conectan con una rosca M10 al instrumento	94
Figura 49. Penetrómetro PILODYN 6J Forest penetrando en un árbol.....	94
Figura 50. Penetrómetro PILODYN 6J Forest.....	95
Figura 51. Penetración del instrumento PILODYN 6J.	95
Figura 52. Empleo del penetrómetro en una viga.....	96
Figura 53. Cerchas de madera antigua analizadas.	97
Figura 54. Correlación entre la profundidad de penetración obtenida con Pilodyn y la densidad de la madera antigua	97
Figura 55. Valores medios de profundidad de penetración (mm) en las viguetas analizadas.	99
Figura 56. Valores medios de profundidad de penetración (mm) de las viguetas, con valores entre 9 y 12 mm.	99
Figura 57. El aparato para esta técnica consta de un dispositivo de sujeción del tornillo, un transductor que registra la fuerza máxima de arranque, y un husillo, para la extracción del tornillo.....	101
Figura 58. Extractor de tornillo y tornillos de 3, 4, y 5 mm de diámetro.....	102
Figura 59. Resultados de regresión lineal y no lineal entre la densidad específica y la máxima fuerza de extracción de tornillos.....	103
Figura 60. Vista de las zonas elegidas para realizar los arranques.....	104
Figura 61. Corte de la probeta con los agujeros de los tornillos alcanzando un nudo oculto y fibra desviada.	104
Figura 62. Representación gráfica de la densidad media (g/cm ³) frente a la resistencia media al arranque en el canto del elemento analizado (kN).	105
Figura 63. Cámara de Infrarrojos E6 con MSX.....	108
Figura 64. Figura termográfica de un techo de madera con filtración de agua.....	108
Figura 65. Termograma de parte de un estribo extraído tras un calentamiento previo.	111
Figura 66. Termograma de vista del conjunto del interior de una cubierta desde el camaranchón donde puede distinguirse la estructura de pares y la tablazón.	112
Figura 67. Termograma de la vista del par con deterioro superficial por pudrición parda.	112
Figura 68. Termograma de la vista de un par con fenda.	112
Figura 69. Termograma de la vista de un par con nudos.	112
Figura 70. Termograma de la vista de par reparado con empalme de madera nueva.	112

Figura 71. Ataque producido por cerambícidos117
Figura 72. Ataque y presencia de termitas.....117
Figura 73. Penetración en la madera del punzón en diferente grado.121

1.- TÉCNICA DE GEORRADAR

1.1.- DEFINICIÓN

La técnica de georradar (GPR: Ground Penetrating Radar) consiste en emitir ondas electromagnéticas hacia el interior de la muestra de madera mediante una antena colocada en su superficie (García, 1997), siendo parcialmente reflejada en las interfaces donde existe un cambio de propiedades dieléctricas. En concreto, los georradares utilizan bandas de frecuencia situadas entre los 10 MHz y los 3 GHz; es decir, bandas de radiofrecuencias y de microondas. Los pulsos utilizados duran entre 0,5 y 100 nanosegundos. Las ondas electromagnéticas que refleja el material se registran (normalmente amplificándolas antes), se procesan y se analizan con el objetivo de caracterizar el medio por el cual se propagan las ondas.

Esta técnica no destructiva ha ido desarrollándose y perfeccionándose desde la década de 1950 en investigaciones de alta resolución del subsuelo o de ciertos medios en ingeniería, minería y geología (Benedetto y Pajewski, 2015). Por los avances tecnológicos en antenas, ha llegado a ser una herramienta prospectiva de uso multidisciplinar y de elevada resolución para profundidades que van desde centímetros hasta decenas de metros (con los equipos y configuraciones adecuados, puede alcanzarse hasta 50 m de profundidad).

Actualmente se utiliza de forma regular en áreas muy diversas: geología, recursos naturales, hidrología, estudios medioambientales, arqueología, patrimonio histórico y artístico e ingeniería civil. Un uso habitual de esta técnica (Rodríguez-Abad, 2009) consiste en el estudio de edificios históricos para detectar humedades en el subsuelo, determinar profundidades y espesores de zapatas de cimentación, encontrar estructuras o cavidades enterradas en el subsuelo (criptas, enterramientos, etc.).

Asimismo, últimamente se aplica cada vez más para estudiar y caracterizar materiales de construcción (hormigón, obra de fábrica, etc.); así como en la inspección, diagnosis y estudio de los daños que presentan (Rodríguez-Abad, 2009). Por ejemplo, Benedetto y Pensa (2007) analizaron su utilidad para detectar daños en el pavimento y llevaron a cabo sus pruebas en un pavimento al cual inyectaron agua durante varias horas.

Un equipo típico de georradar se compone de una antena emisora y una antena receptora, un sistema de control de la radiación y una unidad de almacenamiento de registros. El conjunto formado por la unidad de almacenamiento de registros y el

sistema de control de la radiación se conoce como unidad de control o unidad central. Esta unidad efectúa la coordinación y control de las antenas, así como de los diferentes accesorios que se puedan añadir al equipo, de la señal emitida. También efectúa la coordinación del almacenamiento de la señal en algún tipo de formato, como en papel, fotográfico o magnético.



Figura 1. Equipo de georradar comercial. Fuente: <http://www.orcromindustrial.com>

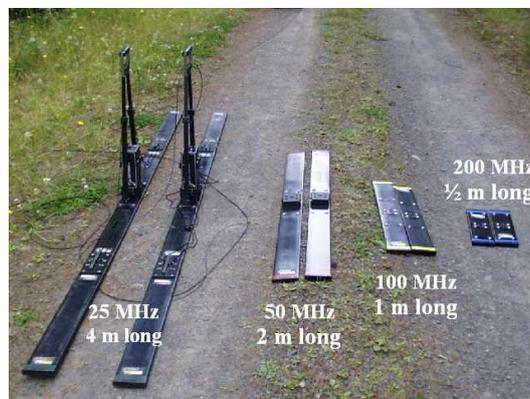


Figura 2. Ejemplos de antenas de georradar. Fuente: https://people.uwec.edu/jolhm/Past_Students/Wenell/whatisgpr.htm

En la madera, el georradar detecta cavidades internas, y permite establecer su posición y tamaño (Ross, 2015).

1.2.- FUNDAMENTOS FÍSICOS

El principio teórico básico de la fundamentación de la técnica de georradar se basa en la teoría clásica de campos electromagnéticos y en la óptica geométrica. Se emiten y propagan ondas electromagnéticas por un medio y después se reciben las señales reflejadas por las discontinuidades del medio.

La velocidad de las ondas en el medio depende de la permitividad dieléctrica relativa del medio, la conductividad, la frecuencia de emisión y la permeabilidad magnética, que son magnitudes que mide el georradar.

Según Razafindratsima *et al.* (2017), en el caso concreto de la madera, el contenido en humedad, la densidad y la dirección de la fibra influyen en la permitividad. El factor más influyente es la cantidad de agua en la madera.

1.3.- RESULTADOS QUE PROPORCIONA

Los resultados se muestran en un registro conocido como radargrama. En ocasiones es posible dar una interpretación directa de los radargramas. Sin embargo, a menudo, debe realizarse un largo proceso de interpretación para poder llegar a una conclusión final sobre la calidad de la madera (Rodríguez-Abad, 2009).

Este proceso requiere calcular parámetros del georradar como el rango, la posición del inicio, el número de pulsos emitidos por segundo durante la adquisición de datos, el factor de superposición de trazas, la función de ganancia y los filtros que se han aplicado al radargrama durante la adquisición o en posteriores tratamientos de las señales.



Figura 3. Estas imágenes muestran: (a) un esquema simplificado de los diferentes componentes de un equipo de georradar; (b) una antena de 1,6 GHz emitiendo sobre una vigueta de madera; (c) un radargrama obtenido en la vigueta. Fuente: Rodríguez-Abad (2009).

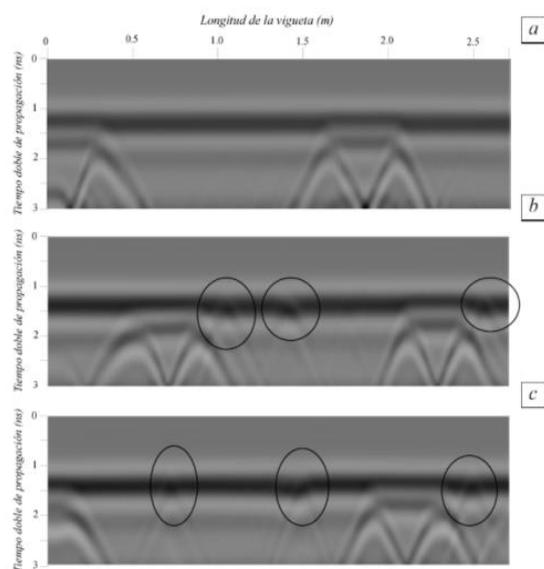


Figura 4. Radargrama obtenido al desplazar la antena del georradar a lo largo de la cara de una viga de *Pinus radiata*. Fuente: Rodríguez-Abad (2009).

1.4.- VALIDEZ DE LOS RESULTADOS

Por el momento no existen muchos trabajos publicados que investiguen la aplicación del georradar a la madera. Algunos trabajos, como (Butnor *et al.*, 2001) y (Butnor *et al.*, 2003), se centran en la detección de raíces de los árboles en el suelo. Otros se centran en determinar mediante georradar el contenido de humedad en el volumen ocupado por las raíces. Por ejemplo, Hruska *et al.* (1999), Hagrey y Müller (2000) y Hagrey (2007).

Con respecto a la aplicación concreta del georradar a la madera estructural existen investigaciones publicadas en Capuz R (2003), Rodríguez-Abad *et al.* (2007a), Rodríguez-Abad *et al.* (2007b), Rodríguez-Abad *et al.* (2008a), Rodríguez-Abad *et al.* (2008b), Rodríguez-Abad *et al.* (2009a) y Rodríguez-Abad *et al.* (2009b). En la misma línea está Rodríguez (2009), que aplica georradar a madera de *Pinus Radiata* D.

Existen algunos estudios sobre el uso de georradar en estructuras muy concretas de madera, por ejemplo, Mai *et al.*, 2014, pero se han enfocado en establecer las buenas relaciones existentes entre la permitividad dieléctrica y el contenido en humedad de la madera; es decir, el georradar se ha utilizado como técnica de evaluación no destructiva de la humedad de la madera, pero no de su resistencia mecánica.

Hasta ahora no existen investigaciones amplias sobre la aplicación del georradar a las especies de madera más utilizadas en la construcción, ni a madera antigua.

1.5.- VENTAJAS

- Tiene una alta capacidad de penetración y proporciona buenos resultados de la estructura interna de la madera.
- Detecta huecos y cavidades ocultas en el interior de la madera.
- Muestra la distribución de humedades de un elemento.
- No necesita un contacto directo con el elemento que se analiza, si bien un porcentaje mínimo de la huella de la antena (30-40%) debe quedar cubierta por la madera.

1.6.- DESVENTAJAS

- Se necesita personal especializado para la interpretación de los radargramas.
- No existe un procedimiento para establecer una equivalencia entre los tamaños de las anomalías detectadas en los radargramas y la reducción de resistencia mecánica de la madera que conlleva la existencia de aquéllas.
- A menudo, salvo en casos extremos, los resultados son difíciles de interpretar. No existen actualmente algoritmos para detectar automáticamente defectos en los radargramas ni tampoco para relacionarlos con la calidad estructural.
- Se necesita más investigación para establecer una equivalencia entre los tamaños de las anomalías detectadas en los radargramas y la reducción de resistencia mecánica de la madera que conlleva su existencia.
- No proporciona valores de resistencia mecánica ni sus resultados son susceptibles de convertirse directamente en esos valores. Los resultados pueden servir para rechazar elementos de madera nueva (en la industria) o para recomendar el refuerzo de elementos de madera antigua (en rehabilitación), pero no para clasificarlos según el sistema de clases resistentes del CTE.
- Las maderas de menor densidad (por ejemplo, chopo o paulownia) tienen propiedades dieléctricas menores, lo que hace más difícil detectar defectos en los radargramas.
- A lo largo de un elemento de madera, la antena del georradar debería desplazarse a velocidad constante para que los resultados sean comparables. Esto es muy difícil de conseguir, porque por el momento los georradares se utilizan manualmente.

- Por el momento, no están definidas para madera la resolución del georradar para defectos (tamaño del nudo mínimo que puede detectarse, distancia entre nudos, distancia a la superficie de la pieza, desviación de la fibra).
- No existen georradares específicos para madera o que estén configurados previamente para ésta.
- No existe investigación sobre el uso de georradar en casos en los cuales los elementos de madera (cerchas, vigas, viguetas) están empotradas en otros materiales (ladrillos, hormigón, piedra), como sucede en los empotramientos en muros. Estas situaciones pueden analizarse con la técnica de resistografía.
- No figura como técnica de evaluación y diagnóstico de la madera en la norma UNE 41805-8:2009 IN (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera).

2.- TÉCNICA DE MICROONDAS

2.1.- DEFINICIÓN

Esta técnica permite formar imágenes de la estructura de un material basándose en la determinación de sus propiedades dieléctricas. Para interpretar correctamente las imágenes de microondas es necesario conocer la respuesta del material a los campos eléctricos y magnéticos, así como entender los mecanismos de interacción entre la muestra analizada y la sonda que se utiliza.

En el caso concreto de la madera, esta técnica empezó a utilizarse industrialmente para mejorar los procesos de secado, en especial para madera de especies densas o nerviosas, y los de encolado (tableros, madera microlaminada, madera laminada encolada). Actualmente las aplicaciones industriales de la técnica se dirigen principalmente hacia la detección de defectos como nudos, fibra revirada, desviación de la fibra y discontinuidades estructurales en troncos, piezas aserradas y compuestos derivados de la madera. Para estos compuestos, los principales defectos que pueden detectarse son huecos, agujeros, ampollas, delaminaciones y otros defectos de adhesión (Bucur, 2003). La escala de estos defectos está comprendida entre 10⁻¹ y 10⁻³ m.

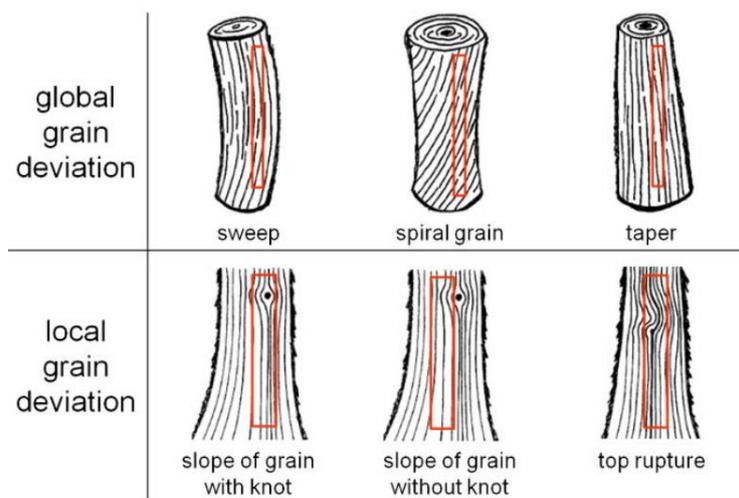


Figura 5. Defectos relacionados con el grano de la madera. La técnica permite detectar el defecto de fibra revirada (spiral grain). Fuente: Denzler et al. (2013).

Existen dos técnicas básicas de microondas: la de transmisión y la de reflexión. El análisis de la señal de la sonda es relativamente simple y se relaciona con la medición de la amplitud, fase y la polarización de las ondas. Estos parámetros se utilizan para

la reconstrucción de imágenes de estructura interna del elemento de madera. La técnica también puede emplearse para la detección de imágenes de la vegetación, incluidas las hojas, tallos, así como tallos en varias condiciones de humedad y temperatura, en un amplio rango de frecuencias, como demuestran Choffel (1999) y Ulaby y Jedlicka (1984).

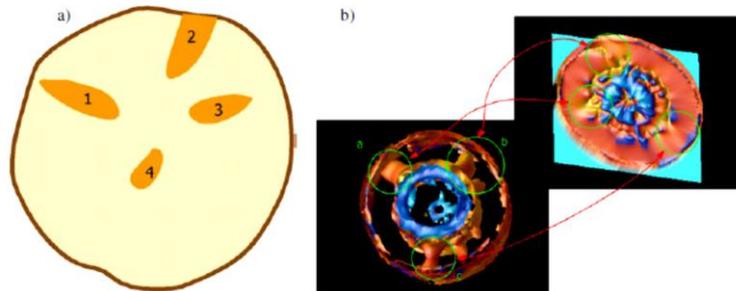


Figura 6. Técnica de microondas para la detección de nudos de diferentes tamaños en la sección transversal de un tronco (Kaester y Baath, 2000). (a) Distribución real de los nudos. (b) Figura reconstruida con la diferencia de fase entre los dos componentes del campo eléctrico, paralelo y perpendicular a la fibra de la madera.

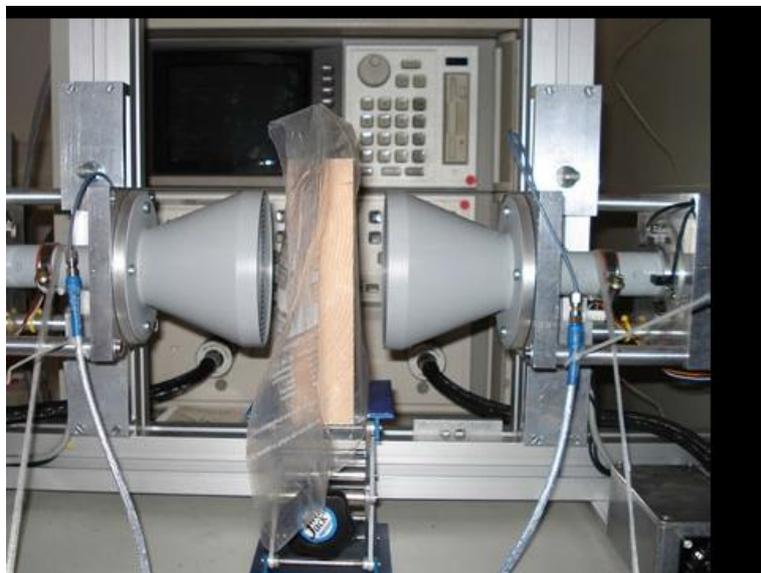


Figura 7. Ensayo de una vigueta de madera con un dispositivo experimental de microondas. Fuente: Aichholzer et al. (2013)

2.2.- FUNDAMENTOS FÍSICOS

Se basa en la transmisión o bien en la reflexión de ondas electromagnéticas de microondas (300 MHz-30 GHz), y en la determinación de parámetros como las constantes dieléctricas en las tres direcciones, la pérdida dieléctrica, la amplitud, la fase, y la polarización de la onda en el medio (Kharkovsky y Zoughi, 2007).

Cuando las ondas de microondas se propagan en un material dieléctrico anisótropo son despolarizadas, atenuadas y su fase cambia. Las propiedades dieléctricas de la madera (y en general todas sus propiedades físicas) difieren en cada una de las tres direcciones anatómicas (tangencial, radial y longitudinal), y están influidas por la densidad, humedad y la dirección de la fibra (Torgovnikov, 1993). Por tanto, la técnica de microondas puede determinar en principio la densidad, el contenido en humedad y el ángulo de la fibra de la madera (King y Yen, 1981).

2.3.- RESULTADOS QUE PROPORCIONA

La técnica permite obtener la densidad, el contenido en humedad y el ángulo de fibra de la madera. Asimismo, permite detectar defectos en la madera.

2.4.- VALIDEZ DE LOS RESULTADOS

El contenido de humedad de la madera se encuentra relacionado con la velocidad de propagación de las ondas de microondas. Se han obtenido correlaciones muy elevadas, de $R^2 > 90\%$, entre el contenido de humedad de la madera y la velocidad de propagación de la onda (Danko, 1994).

Investigaciones como las que figuran en Martin *et al.* (1987) y Kharadly (1985) afirman que pueden llegar a obtenerse correlaciones superiores al 80% entre la densidad de la madera y la amplitud de las ondas en el rango de las microondas. Dichos autores han obtenido en sus investigaciones correlaciones de R^2 de 73% y 83% para la relación entre la velocidad de propagación de la onda en la madera con su densidad, lo cual confirma, como era de esperar, que las propiedades dieléctricas de la madera se relacionan fuertemente con la densidad. Sin embargo, la falta de información sobre el ángulo de la fibra en esos trabajos hace que esas afirmaciones no sean concluyentes, pues las medidas obtenidas son propensas a desviaciones en la dirección de la fibra.

En (Aichholzer *et al.*, 2013) se propone un sistema experimental de microondas, basado en un diseño previo de Schajer y Orhan (2005, 2006), que puede usarse para determinar simultáneamente la densidad, el contenido en humedad y el ángulo de la fibra de la madera. Este sistema se ha perfeccionado después para trabajar de 8 a 12 GHz (Aichholzer *et al.*, 2013). Los resultados expuestos, que corresponden solamente a la especie *Picea abies*, resultan prometedores, si bien se necesita mucha más investigación y pruebas en esa línea.

La efectividad de esta técnica para detectar defectos de la madera está bien establecida en la bibliografía y se utiliza en la industria (aserraderos) para descartar troncos y tablones con defectos internos (Denzler y Weidenhiller, 2015). En ocasiones, es difícil aplicarla en aserraderos porque debido a las velocidades altas de inspección en línea, las vibraciones mecánicas de los troncos o los tablones perturban la medida de la polarización de la onda de microondas. Si los sistemas de microondas no se han extendido ampliamente en la industria es por la naturaleza física cambiante de las microondas y, por otro lado, por la falta de equipos y componentes electrónicos apropiados, robustos y de bajo coste (Aichholzer *et al.*, 2017).

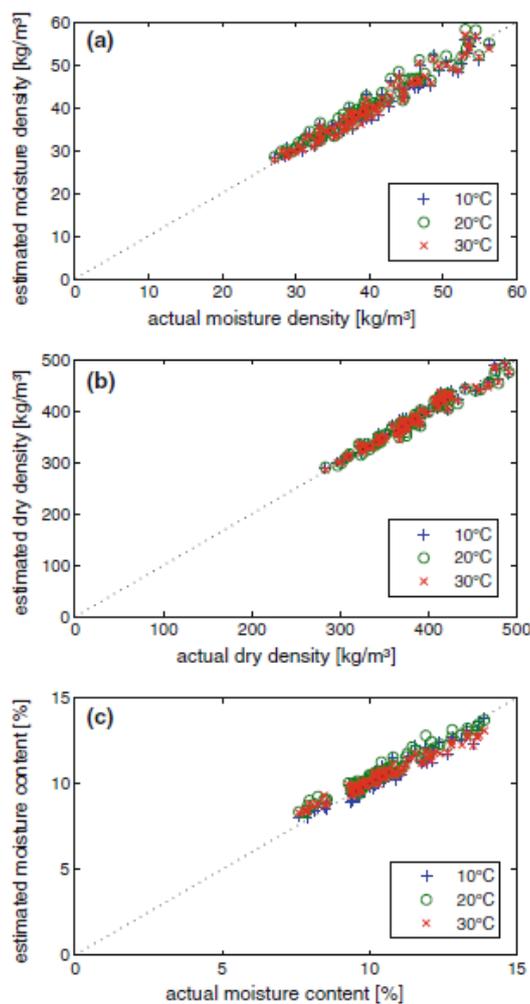


Figura 8. Comparación de las propiedades de la madera reales y obtenidas con el sistema experimental de microondas de (Aichholzer *et al.*, 2013) para una frecuencia de 10 GHz: a) densidad con la humedad actual; b) densidad en seco; c) contenido en humedad.

2.5.- VENTAJAS

- Tiene una alta capacidad de penetración y proporciona buenos resultados de la estructura interna de la madera.

- Detecta huecos y cavidades ocultas en el interior de la madera.
- Determina con precisión la humedad de la madera.
- No necesita un contacto directo con el elemento que se analiza.
- Permite obtener medidas en tiempo real en línea.
- Requiere baja potencia.

2.6.- DESVENTAJAS

- No existen equipos comerciales de microondas específicos para inspección de madera en obra (in situ). Los equipos existentes son para líneas de aserraderos o laboratorios, o bien experimentales.
- Hasta la fecha, los sistemas de microondas no se han extendido ampliamente en los aserraderos por la naturaleza física cambiante de las microondas y, por otro lado, por la falta de equipos y componentes electrónicos apropiados, robustos y de bajo coste.
- No proporciona valores de resistencia mecánica. Los resultados pueden servir para rechazar elementos de madera nueva (en la industria) o para recomendar el refuerzo de elementos de madera antigua (en rehabilitación), pero no para clasificarlos según el sistema de clases resistentes del CTE.
- En los aserraderos, debido a las velocidades altas de inspección en línea, las vibraciones mecánicas de los troncos o los tablones perturban la medida de la polarización de la onda de microondas, lo que ocasiona una pérdida significativa de resolución en cuanto a los defectos.
- Aunque las potencias de trabajo son bajas, por seguridad no es conveniente radiar microondas sin protección.
- Se requiere mucha más investigación y pruebas en el campo de la madera.
- No existe investigación sobre el uso de microondas en casos en los cuales los elementos de madera (cerchas, vigas, viguetas) están empotradas en otros materiales (ladrillos, hormigón, piedra), como sucede en los empotramientos en muros. Estas situaciones pueden analizarse con la técnica de resistografía.
- No figura como técnica de evaluación y diagnóstico de la madera en la norma UNE 41805-8:2009 IN (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera).

3.- TÉCNICA DE RESISTOGRAFÍA

3.1.- DEFINICIÓN

Se basa en cuantificar, mediante un equipo denominado resistógrafo, la resistencia que ofrece la madera a la perforación mediante una broca extremadamente fina (Abián y Zapata, 2007). El equipo va registrando durante el ensayo la resistencia que presenta el material a la penetración de la broca de 3 mm de diámetro en la punta y de 1,5 mm en el fuste a velocidad constante, mediante un potenciómetro conectado al motor eléctrico.

Por medio del potenciómetro se mide el consumo de energía eléctrica del motor encargado de la rotación de la broca. La resistencia que la madera ofrece al avance de la broca está muy relacionada con la densidad de la madera; los resultados del equipo permiten diferenciar los anillos de crecimiento, pues se registran perfectamente las variaciones de densidad entre la madera de verano y de primavera (Arriaga *et al.*, 2002), que también se denominan madera temprana (earlywood) o madera tardía (latewood), respectivamente. Como la resistografía detecta áreas de baja densidad en elementos de madera, puede detectar zonas con posible decaimiento o deterioro, así como zonas de la madera con baja densidad por motivos naturales de crecimiento del árbol del cual procede.



Figura 9. Instrumento de perforación. 1: asideros; 2: unidad digital de registro de datos; 3: aguja perforadora. Fuente: AIDIMME.



Figura 10. Gráfica generada durante el proceso de perforación. Fuente: AIDIMME.

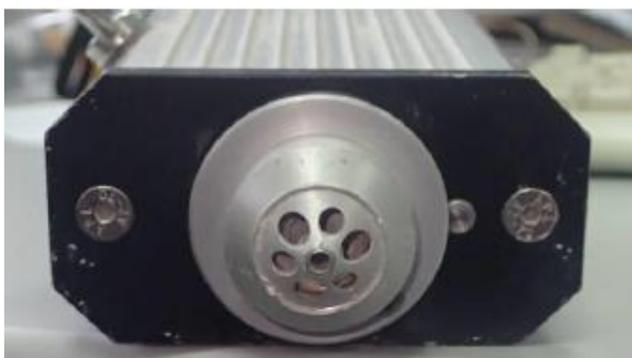


Figura 11. Punta de seguridad por la cual surge la aguja perforadora. Fuente: AIDIMME

En los modelos más recientes de resistógrafos, el registro de datos se realiza gráficamente a través de una memoria y una pantalla digital que reproduce las resistografías o perfiles resistográficos. Una unidad digital registra todos los datos correspondientes a cada una de las perforaciones llevadas a cabo. En algunos modelos anteriores la gráfica se imprimía mediante una impresora conectada al resistógrafo.

Esta técnica se utiliza tanto en árboles en pie como en rollizos y en madera aserrada. Algunos estudios destacados sobre su efectividad y resultados en árboles en pie se exponen en Lima *et al.* (2007), Kahl *et al.* (2009), López *et al.* (2010) y Oliveira *et al.* (2015).

3.2.- FUNDAMENTOS FÍSICOS

El fundamento de la resistografía se basa en que la resistencia a penetración es directamente proporcional a la densidad de la madera.

3.3.- RESULTADOS QUE PROPORCIONA

Los resultados obtenidos son datos numéricos que se expresan mediante gráficas de porcentaje de amplitud (resistografías o perfiles resistográficos), cuyas unidades se desconocen.

Durante el proceso de perforación se genera la gráfica o resistografía, la cual se visualiza mediante una pantalla digital en el modelo de resistógrafo IML-RESI PD400.

La gráfica creada muestra una correlación lineal entre los valores de resistencia y densidad de la madera, según los estudios realizados por Rinn (1994), y las variaciones se explican considerando el ángulo formado por el recorrido de la aguja y el borde del anillo. Cuando la penetración es perpendicular, el perfil es claro e inequívoco (Álvarez *et al.*, 2005); pero cuando es tangencial, la aguja tiende a desviarse hacia la madera de primavera, que opone menor resistencia, y los perfiles no muestran variaciones significativas, lo que puede ocasionar malas interpretaciones del estado de la madera.

Los valores medios de los perfiles resistográficos o resistografías se correlacionan con la densidad media de la madera. En el eje de abscisas se representa la longitud de la perforación y en el de las ordenadas la resistencia a la perforación en % ofrecida por la pieza (amplitud resistográfica, AR). En este sentido, en las resistografías, es posible identificar posibles pudriciones (depresiones o niveles inferiores al de las zonas de madera temprana de la madera circundante), y defectos de la madera, tanto en la puesta en obra como en árboles vivos (Acuña *et al.*, 2011). Además de analizar la calidad interna de la madera, la técnica permite determinar el crecimiento anual de los anillos en función de la resistencia que presente a la microperforación.

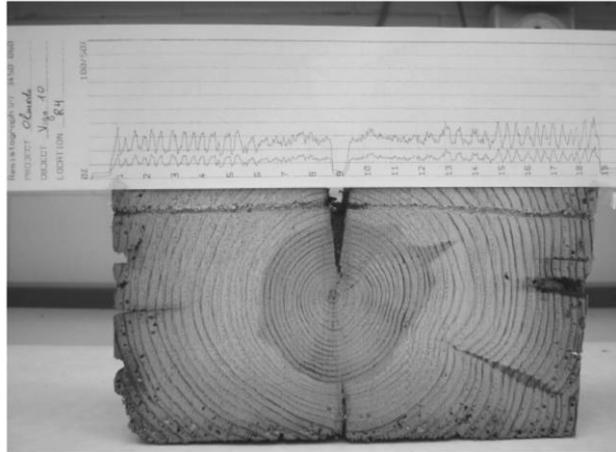


Figura 12. Resistografía de madera de pino y corte de la probeta en la sección del taladro. Fuente: Acuña et al. (2011).

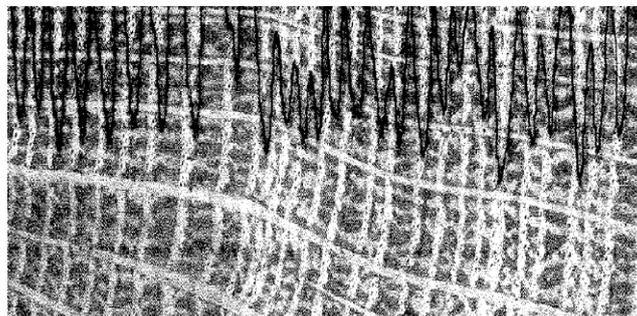


Figura 13. Variaciones de densidad en *Quercus robur* (roble común o roble fresnal) como se muestran en una resistografía. Fuente: Rinn et al. (1996).

A continuación, se muestran tres resistografías en las que se aprecia una disminución de la resistencia a penetración que coincide con degradaciones de la madera.

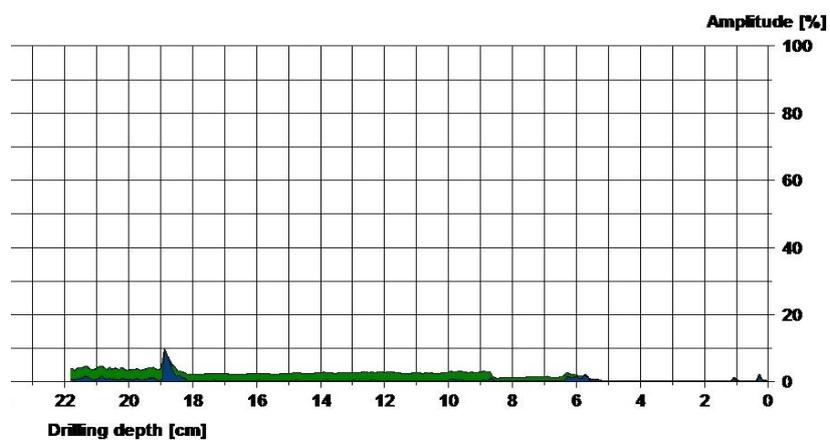


Figura 14. Resistograma de la cabeza de una vigueta atacada por hongos de pudrición. La capacidad mecánica de esa zona es casi nula. Fuente: AIDIMME.

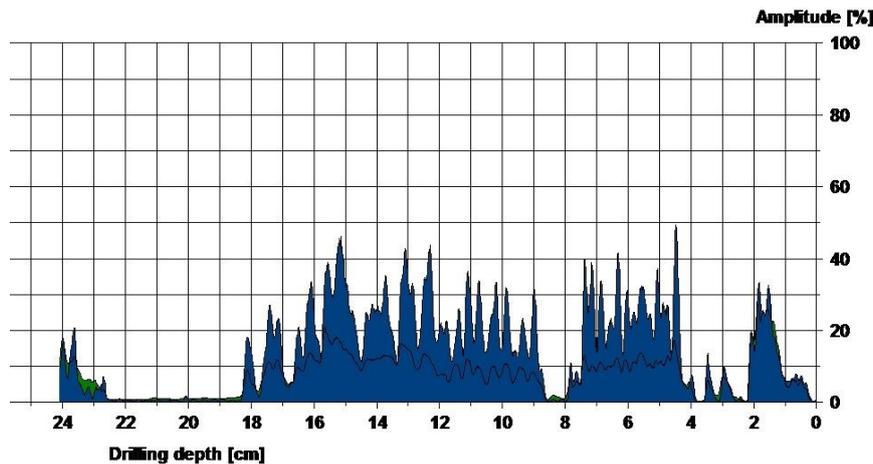


Figura 15. Resistograma de la cabeza de una viga de carga atacada por termitas. Varios centímetros del elemento están completamente degradados. Fuente: AIDIMME.

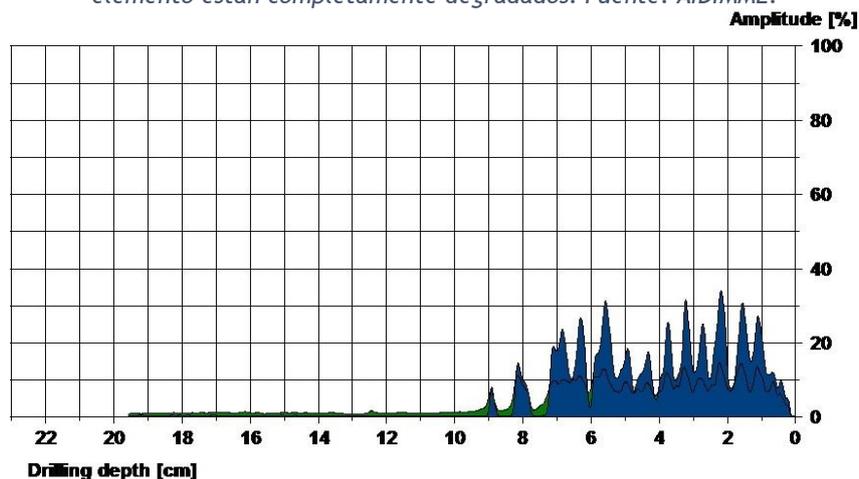


Figura 16. Resistograma del centro de una cercha atacada por termitas. Desde un punto de vista estructural, a partir de una profundidad de 7 cm el elemento ha desaparecido. Fuente: AIDIMME.

En las instrucciones de todos los modelos de resistógrafos se explica que los resultados se expresan como un porcentaje de amplitud; pero en ninguno de ellos, ni en ninguna fuente bibliográfica, se explica en qué unidades se mide esa amplitud, posiblemente por secreto industrial.

3.4.- VALIDEZ DE LOS RESULTADOS

El grado de correlación de las gráficas de resistografía con la densidad de la madera seca es muy elevado ($r^2=0,8$) (Arriaga *et al.*, 2002).

Según Acuña *et al.* (2011) la determinación de la densidad mediante equipos de resistografía es realmente precisa, superando, sin lugar a dudas, a otro tipo de dispositivos o ensayos cuyo objetivo esencial es éste; obteniendo relaciones entre las variables resistográficas y la densidad de valores de $r^2>0,9$.

Existen estudios comparativos entre los resultados de la resistografía y los perfiles de densidad de la madera obtenidos mediante rayos X para diversas especies de madera. Por ejemplo, Rinn *et al.* (1996) determina que los valores medios de la resistografía se correlacionan fuertemente ($r^2 > 0,8$) con la densidad bruta de la madera seca.

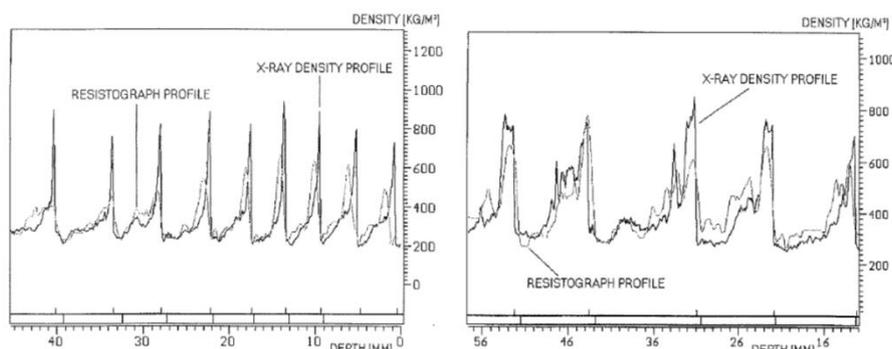


Figura 17. Gráficas de densidad bruta de madera seca obtenidas mediante rayos X y gráficas de resistografía para las especies *Abies alba* (izquierda) y *Larix decidua* (derecha). La correspondencia es casi exacta. Fuente: Rinn *et al.* (1996).

En un proyecto de investigación llevado a cabo en AIDIMME se estudió la relación entre la variable dependiente (amplitud) y la variable independiente (densidad) de diferentes tabloncillos de madera de las especies *Pinus radiata* D. Don y *Pinus sylvestris* L., y se obtuvieron coeficientes de determinación (R^2) de hasta 0,821.

Los resistógrafos comerciales existentes hasta 2016 muestran solamente la gráfica de resistencia a la perforación (drill resistance). Esta gráfica presenta en algunos casos errores (no se detectan caídas de densidad y por tanto se considera como madera en buen estado madera que realmente se encuentra degradada), debido a la fricción de la broca con las virutas de madera: mientras se realiza la perforación, la broca queda aprisionada por las virutas de madera que se crean en el propio túnel de perforación, y el aprisionamiento de la broca, y por tanto su rozamiento, aumenta conforme más largo es el túnel de perforación. Este fenómeno de aprisionamiento y fricción creado en el túnel de la broca se conoce como fricción del eje (saft-friction).

Como novedad, los modelos actuales de resistógrafos de la serie IML-RESI PD miden tanto la resistencia a la perforación de la broca como la fuerza de avance (feed force), siendo esta última la fuerza que se necesita para empujar la aguja hacia la madera. De esta manera se obtienen así una gráfica de fuerza de avance; se ha demostrado tanto teórica como experimentalmente que la gráfica de fuerza de avance resulta mínimamente afectada por el efecto de fricción del eje.

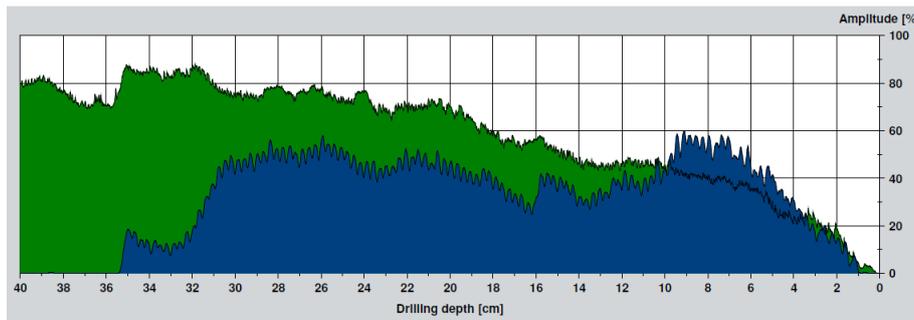


Figura 18. Perfil resistográfico de madera con degradación al final de la muestra. Fuente: IML.

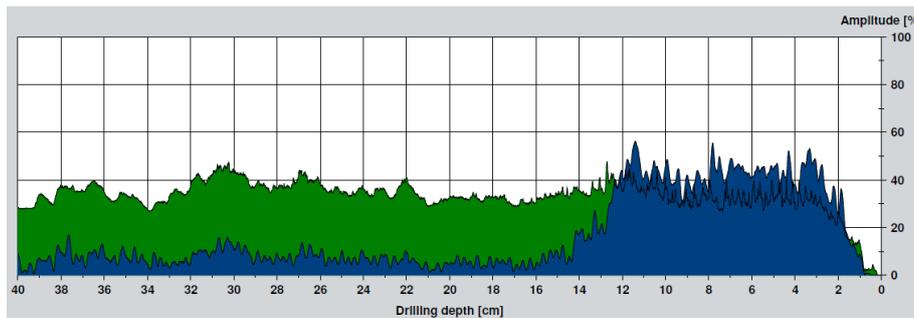


Figura 19. Perfil resistográfico de madera con ataque por hongos de pudrición. Fuente: IML.

3.5.- VENTAJAS

- Permite el acceso a elementos que no son visibles y de difícil acceso como empotramientos de vigas o viguetas en muros y muretes.
- Pueden realizarse varios ensayos de resistografía en un mismo elemento, ya que las perforaciones son de carácter local; haciendo 6 ensayos en un elemento, separado cada punto de medida 60° del siguiente, es posible reconstruir el interior del elemento con una buena precisión.
- Las perforaciones pueden hacerse diagonalmente sobre el plano de la sección, lo cual aporta más información sobre el estado del elemento perforado que una resistografía perpendicular o transversal (Mariño *et al.*, 2002).
- Permite conocer el estado de la muestra a la vez que se realiza la inspección (en dispositivos con muestra de grafica en pantalla digital).
- Hace posible diferenciar claramente la madera que presenta un ataque por hongos de la afectada por un ataque de insectos (Álvarez *et al.*, 2005). La resistencia a la penetración disminuye significativamente hasta un nivel constante cuando el ataque ha sido realizado por hongos; mientras que la

resistencia disminuye de forma muy localizada en un ataque por insectos (cuando el resistógrafo atraviesa las galerías producidas por ellos o sus larvas).

- Puede usarse con ángulos inferiores a 90° , lo que posibilita la inspección in situ de estructuras de madera ocultas. Por otro lado, los perfiles resistográficos obtenidos con ángulos de 90° reflejan con exactitud la geometría interna de la madera y pueden servir para determinar directamente sus dimensiones (Álvarez *et al.*, 2005).
- Con los nuevos resistógrafos, como el modelo IML-RESI PD400, puede medirse la resistencia a la perforación y la resistencia de la fuerza de avance, obteniendo así graficas de resistencia a la perforación (drill resistance) y de fuerza de avance (feed force) respectivamente. Las gráficas de fuerza de avance son más precisas que las de resistencia a perforación y evitan algunas incapacidades de detección de madera degradada que sufrían los anteriores resistógrafos.
- Por la portabilidad del equipo, la técnica pueda aplicarse perfectamente en obra. Como los resultados se obtienen al mismo tiempo que se realiza el ensayo, pueden tomarse decisiones de sustitución, refuerzo o consolidación en la propia obra.
- Existe mucha experiencia en la aplicación de la resistografía a la evaluación de madera en obra.
- Existe documentación específica al respecto de cómo debe emplearse para evaluar madera en obra (Rinn, 2012).
- La norma UNE 41805-8:2009 IN (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera) incluye la técnica de resistografía como una moderna técnica de clasificación por métodos no destructivos, aplicable en el ámbito del diagnóstico de madera puesta en obra.

3.6.- DESVENTAJAS

- No proporciona directamente perfiles de densidad de la madera, si bien los perfiles resistográficos obtenidos son muy aproximadamente proporcionales a la densidad.
- Es conveniente conocer la especie del tipo de madera que se está perforando, ya que la madera de duramen de muchas especies de frondosas (teca, iroko) puede tener altos niveles de resistencia (más del 50%), mientras que la madera

de duramen de coníferas poco densas (por ejemplo, pino de plantaciones de crecimiento rápido) puede tener bajos niveles de resistencia a la penetración (en el rango del 15% al 50% más, dependiendo de su densidad exacta). Es decir, algunas especies tienen de forma natural, por su baja densidad, bajos valores de resistencia a la penetración, pero ello no constituye un síntoma de degradación (Ross, 2015).

- Para preservar completamente el aspecto estético del elemento analizado, hay que rellenar los diminutos orificios efectuados por la perforación de la broca con productos como selladores de silicona, adhesivos o masilla de serrín.
- No proporciona valores de resistencia mecánica ni sus resultados son susceptibles de convertirse directamente en esos valores. Los resultados pueden servir para rechazar elementos de madera nueva (en la industria) o para recomendar el refuerzo de elementos de madera antigua (en rehabilitación), pero no para clasificarlos según el sistema de clases resistentes del CTE.

4.- TÉCNICA DE RAYOS X

4.1.- DEFINICIÓN

Esta técnica usa rayos X para detectar variaciones de densidad en la madera (la atenuación de la radiación varía directamente con la densidad del medio). Por tanto, puede detectar defectos internos (huecos, grietas, degradaciones, bolsas de resina, etc.).



Figura 20. Equipo comercial CT Log de inspección de madera mediante rayos X en tiempo real. Fuente: Microtec.



Figura 21. Reconstrucción 3D del interior de un tronco mediante CT Log. A partir de la Figura puede realizarse un aserrado óptimo, con el mínimo desperdicio de material. Fuente: Microtec.



Figura 22. Sistema portátil digital de rayos X RTR-4. Fuente: LEIDOS.

4.2.- FUNDAMENTOS FÍSICOS

Los rayos X son radiación electromagnética de longitud de onda mucho más corta que la luz (0,5-2,5 Å; 1 Å = 10⁻¹⁰ m). Esta radiación, de tipo ionizante, se produce cuando una partícula cargada eléctricamente (habitualmente electrones) con suficiente energía cinética es frenada rápidamente. Se produce mediante tubos de rayos X, que son tubos de vacío que convierten la energía eléctrica en rayos X. Tienen un ánodo y un cátodo, que emite electrones en el vacío hacia el ánodo. La energía eléctrica, de gran voltaje (por ejemplo, de 30 a 150 kV) es utilizada para acelerar los electrones.

La atenuación de los rayos X en un medio está relacionada con la densidad. Por tanto, puede medirse el coeficiente de atenuación de la radiación para determinar la densidad del medio atravesado (Fu, 2005).

Para el caso de la madera, los parámetros de la inspección con rayos X dependen de factores como la especie, el tamaño de la muestra, el nivel de contraste en la densidad para detectar defectos y el objetivo que se persigue con la inspección, que influyen en la resolución exigible a las imágenes radiográficas y el tiempo que se requiere en tomarlas, como se detalla en Wagner (1989) y Grönlund (1994).

4.3.- RESULTADOS QUE PROPORCIONA

Los resultados suelen mostrarse como perfiles de coeficientes de atenuación de la radiación, perfiles de densidad (directamente relacionada con la atenuación) o como imágenes digitales 2D (tomogramas) o 3D generados mediante software especiales.

En el caso de las imágenes digitales, suele usarse la escala de unidades de Hounsfield (HU en inglés) que se obtiene de transformar la escala de coeficientes de atenuación lineal de los rayos X en una nueva escala en la que el valor de atenuación del agua pura destilada en condiciones normales de presión y temperatura (1 atm y 0°C) se define como 0 unidades de Hounsfield o HU y la radiodensidad del aire en esas mismas condiciones como -1.000 (Bucur, 2003).

En el análisis por imagen, los valores útiles de la escala Hounsfield van de -1.024 HU hasta 3.071 HU, que se representan como 4.096 niveles de gris.

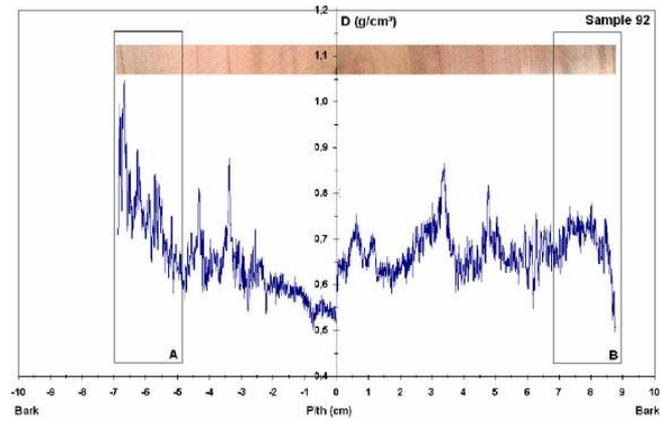


Figura 23. Perfiles de densidad de *Eucalyptus grandis* x *urophylla* (La zona A está sana y la zona B presenta hongos de pudrición) obtenidos mediante densitometría de rayos X. Fuente: Tomazello et al. (2008).

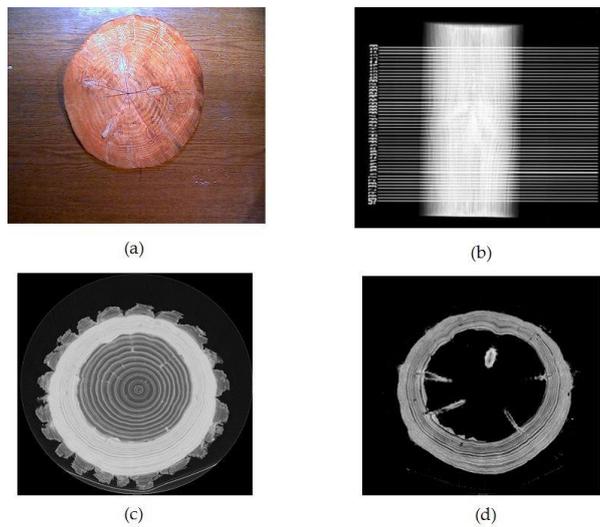


Figura 24. Proceso de análisis por rayos X de una sección de un tronco (tomografía). Puede apreciarse en (d) la presencia de varios nudos y las zonas de albura (gris claro) y duramen (negra). Fuente: Aguilera et al. (2012).

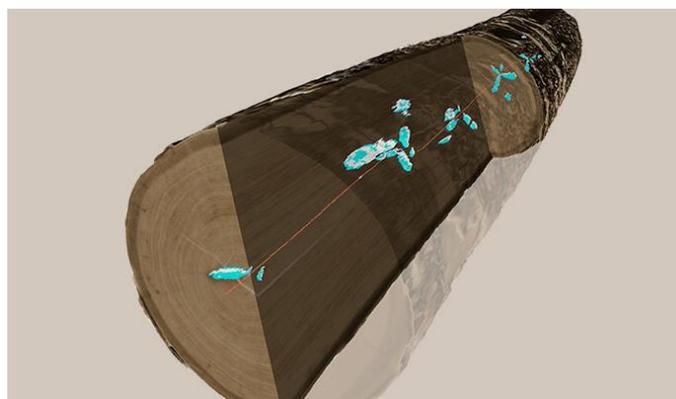


Figura 25. Figura 3D por rayos X de un tronco. Fuente: DANZER.

4.4.- VALIDEZ DE LOS RESULTADOS

Aunque el uso más conocido de los rayos X es el ámbito médico, desde 1930 se han utilizado para evaluar la densidad y la calidad interna de materiales. En el caso de la madera, la investigación para determinar sus variaciones de densidad (densitometría) mediante rayos-X comenzó prácticamente en la década de 1980. También en esa década surgieron los primeros equipos de rayos X para analizar el estado interno de troncos y de madera aserrada.

La validez y precisión de la densitometría y de la tomografía por rayos X para la madera es aceptada por toda la bibliografía, como se documenta en la revisión bibliográfica de Wei *et al.* (2011). En el caso concreto de las tomografías de rayos X, en Freyburger *et al.* (2009) se analiza la aplicación para determinar la densidad de especies de madera en un rango muy amplio de densidades (133-1319 kg/m³) y se llega a la conclusión de que la relación entre la densidad y los números de Hounsfield tiene una correlación muy elevada ($R^2 > 0,999$).

En el caso de la inspección *in situ* mediante equipos portátiles digitales de rayos X, según Kruglowa *et al.* (2011), la densidad tiene una excelente correlación lineal hasta una densidad de 1000 kg/m³ (R^2 entre 0,90 y 0,98). Resultados similares pueden encontrarse en Fu (2005) y Lechner *et al.* (2013).

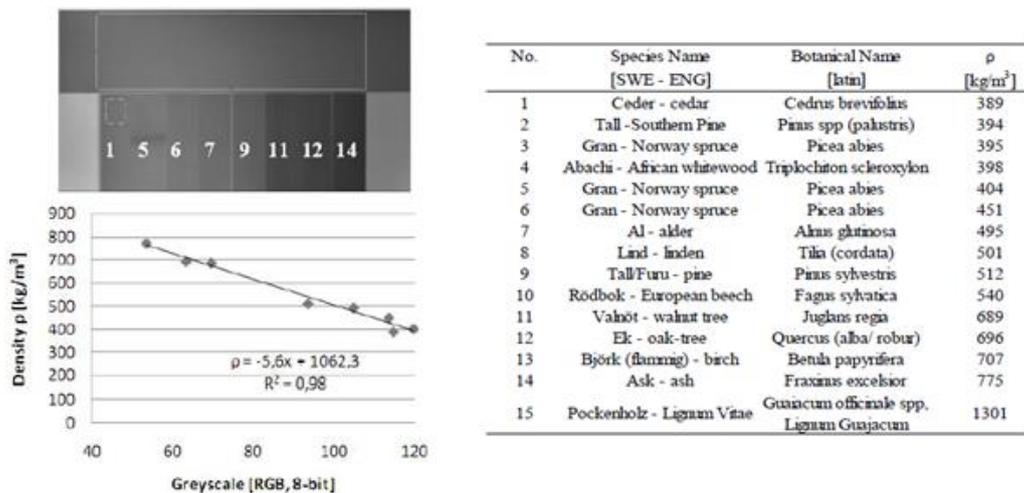


Figura 26. Verificación del método de calibración de la escala de grises (derecha) usando ciertas muestras de madera de varias especies (derecha) para correlacionar con la densidad. Fuente: Kruglowa *et al.* (2011).

4.5.- VENTAJAS

- Es muy efectiva para determinar la densidad y la existencia de defectos internos con gran precisión.
- Con los equipos portátiles digitales de rayos X, es posible su uso para evaluar estructuras *in situ*.
- No es necesario el contacto con el elemento que se desea analizar.

4.6.- DESVENTAJAS

- La técnica no es compatible con ambientes sucios, como suelen ser las obras en rehabilitación.
- Se necesita calibración previa para determinar la densidad de la madera.
- Los equipos portátiles de rayos X son caros todavía. Por ahora no hay ninguno específico para madera.
- Los equipos portátiles de alta resolución generan por ahora imágenes de zonas pequeñas (30 x 40 cm), por lo que no resultan prácticos para analizar grandes estructuras.
- Es necesaria la protección radiológica del personal que la usa. Éstos deben dosímetros para detectar cualquier irradiación.
- La zona de seguridad es muy grande: 3 metros alrededor del emisor de rayos X, 30 metros en la dirección de medida y 11 metros perpendicular a ella (Franke y Franke, 2014).
- Precisa personal cualificado.
- No proporciona valores de resistencia mecánica ni sus resultados son susceptibles de convertirse directamente en esos valores. Los resultados pueden servir para rechazar elementos de madera nueva (en la industria) o para recomendar el refuerzo de elementos de madera antigua (en rehabilitación), pero no para clasificarlos según el sistema de clases resistentes del CTE.
- No figura como técnica de evaluación y diagnosis de la madera en la norma UNE 41805-8:2009 IN (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera).

5.- TÉCNICA DE ULTRASONIDOS

5.1.- DEFINICIÓN

La técnica de ultrasonidos permite determinar el módulo de elasticidad dinámico a partir de la densidad de la madera y la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas. Una vez conocido el módulo de elasticidad dinámico (MOE dinámico), puede determinarse su resistencia a flexión o módulo de rotura dinámico (MOR dinámico). Como el MOE y el MOR dinámicos obtenidos así están fuertemente correlacionados con el MOE y el MOR estáticos (es decir, obtenidos mediante ensayos destructivos de flexión) y son buenos predictores de éstos (Acuña y Casado, 2015), puede asignarse mediante esta técnica una clase resistente al elemento analizado, según el Código Técnico de la Edificación. Cualquier defecto de la madera (como pudrición por hongos, ataques de insectos, grietas, etc.) influye directamente en la velocidad de propagación de la onda ultrasónica y en su atenuación, por lo que también afecta a MOE y MOR.

Según Ross (2015), la realización de la prueba queda determinada por varios factores como la fuente emisora, la potencia, la frecuencia, el receptor y el acoplamiento. Las fuentes generan ondas de ultrasonidos, que son ondas acústicas de la misma naturaleza física que las ondas sónicas, pero que se encuentran por encima de la zona audible.

Las ondas ultrasónicas tienen una frecuencia mínima de 20 KHz y llegan hasta rangos de MHz. La resolución de las pruebas de ultrasonidos varía en función de la frecuencia aplicada a la muestra: se detectan los defectos más pequeños en la madera a frecuencias más altas.

Algunos equipos comerciales que se pueden encontrar en el mercado son los siguientes:

- Sylvatest.
- Pundit (Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Tester).
- FAKOPP UltraSonic-Timer.



Figura 27. Equipo de ultrasonidos Sylvatest TRIO. Fuente: DAGAS.



Figura 28. Equipo de ultrasonidos Pundit PL-200. Fuente: PROCEQ.



Figura 29. Equipo de ultrasonidos FAKOPP UltraSonic-Timer. Fuente: FAKOPP.

5.2.- FUNDAMENTOS FÍSICOS

En un medio sólido infinito pueden aparecer ondas longitudinales o de compresión y ondas de cizallamiento o transversales. Las primeras tienen un movimiento de partícula paralelo a la dirección de propagación de la onda y perpendicular al frente

de onda; las ondas transversales son inversas a las longitudinales, y el movimiento de partícula es perpendicular a la dirección de propagación de la onda y paralelo al frente de onda.

Por tanto, en un material ortotrópico como la madera, que dispone de tres direcciones principales: longitudinal (en la misma dirección de la longitud del eje del árbol), radial (desde el exterior pasando por el centro) y tangencial (desde el exterior sin pasar por el centro), se tendrá para cada una de ellas una velocidad de onda longitudinal, así como dos velocidades de onda transversales.

Mediante la ley de Hooke y los tensores de rigidez de Christoffel se definen las ecuaciones de movimiento, relacionando la velocidad de propagación de las ondas y la rigidez del material. Para ondas longitudinales que viajan a lo largo de un eje principal, puede deducirse la relación matemática siguiente:

$$E_D = \varphi \times V_L^2$$

donde

E_D es el módulo de elasticidad dinámico

φ es la densidad

V_L^2 es la velocidad de la onda longitudinal

En las ecuaciones de propagación de las ondas transversales intervienen los coeficientes de Poisson, y éstas pueden consultarse en Hearmon (1961), Graff (1975) y Bucur (2006).

En el caso de la madera, las diferentes velocidades de propagación se ven influidas por diferentes factores: la temperatura, el contenido de humedad y el nivel de tensión que actúa en el elemento.

El contenido de humedad influye ligeramente en la velocidad de propagación de los ultrasonidos de tal manera que por cada incremento de un 1% de humedad se produce una disminución de la velocidad de aproximadamente un 0,8%, siguiendo una relación lineal entre el 5 y el 30% de contenido de humedad (Sandoz, 1989).

La temperatura también altera ligeramente la velocidad de transmisión, de forma que un aumento de la temperatura reduce la velocidad. A su vez esta influencia de la temperatura es más importante cuanto mayor es el contenido de humedad, por lo que

algunos aparatos incluyen sondas de temperatura y humedad para tener en cuenta estos dos factores (Arriaga *et al.*, 2002).

La velocidad de propagación de los ultrasonidos varía ligeramente en función de la tensión de carga a la que se ve sometida el elemento (Bucur, 1979). Según Arriaga *et al.* (1992), la variación es muy pequeña y no parece viable su aplicación práctica en la obra.

5.3.- MÉTODOS DE REALIZACIÓN

Se distinguen diferentes métodos en la realización de la técnica de ultrasonidos, utilizando estas uno, dos o múltiples sensores. En una primera clasificación de las diferentes técnicas se distinguen entre métodos que utilizan un único sensor, denominándose estos métodos de ecos, y métodos que usan dos sensores conociéndose como métodos de transmisión.

En cuanto a la fuente emisora esta puede estar orientada de tal manera que el pulso incidente en la superficie de la muestra sea normal o en ángulo (Ross, 2015).

A continuación, se explican los tres métodos diferentes más usados.

5.3.1.- MÉTODO DE ECOS DE PULSO

Este método se compone de un solo sensor transductor que actúa como emisor y receptor de señal. De esta forma, al actuar el transductor como fuente, emite ondas ultrasónicas que viajan por el elemento, reflejándose en la pared opuesta del mismo y siendo detectadas.

Cuando la onda encuentra en su camino algún tipo de defecto como grietas, fisuras, fendas, huecos, etc., éstas producirán un eco que se representa gráficamente en un osciloscopio.

Es un procedimiento que da buenos resultados en ensayos de metales u otros materiales homogéneos, pero no resulta adecuado para materiales heterogéneos como la madera.

5.3.2.- MÉTODO DE TRANSMISIÓN

Esta prueba recibe su nombre al estar compuesta por dos transductores, actuando uno como emisor y otro como receptor, de esta forma la onda generada solo necesita viajar a través de la muestra una vez. La onda producida adquiere una frecuencia más baja que en el método de ecos de pulso obteniendo ondas ultrasónicas más largas que

rodean con mayor facilidad los obstáculos e irregularidades que se encuentren en el material.

Los defectos e irregularidades como grietas, nudos, fendas que se encuentran en una muestra se aprecian en el aumento del tiempo transcurrido por la onda del emisor al receptor, ya que el camino a recorrer por dichas ondas es mayor; o incluso en el bloqueo total de la onda, que no llega a ser detectada por el receptor.

Da buenos resultados en materiales heterogéneos como la madera (Arriaga *et al.*, 2002).

En cuanto a la metodología empleada al efectuar el método de transmisión, este puede efectuarse de tres formas. En el método directo los transductores, que actúan como emisor y receptor, se disponen enfrentados. En el método semidirecto se disponen sobre caras distintas de la pieza. En el método indirecto se colocan sobre una cara de la pieza. Lo más adecuado y preciso es aplicar el método directo colocando los transductores en las testas de la pieza; pero, como habitualmente en obra las testas de los elementos estructurales de madera se encuentran empotradas u ocultas en muros, se recurre a la lectura colocando los transductores en las caras de la pieza, dándoles una inclinación de unos 45°.

Actualmente se utilizan transductores de tipo cónico, para asegurar el contacto es necesario realizar una pequeña incisión donde se coloca la punta del transductor; no es necesario ningún tipo de material de acoplamiento.



Figura 30. Ensayo de ultrasonidos en forjado de madera mediante método indirecto. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.- MÉTODO DE RESONANCIA O DE HAZ ANGULAR

Este método es mucho más complejo que los dos anteriores y solamente se aplica en laboratorio. Consiste en excitar la muestra a su frecuencia propia mediante un emisor produciendo un fuerte aumento de la amplitud. A partir de la densidad, dimensiones de la probeta, y la frecuencia de resonancia se calculan las constantes elásticas.

Según Ross (2015), este método puede requerir más potencia que el método de transmisión, ya que las distancias de recorrido de la onda son a menudo mayores.

5.4.- RESULTADOS QUE PROPORCIONA

Se obtiene la velocidad de onda ultrasónica en la madera, y conociendo la densidad de ésta puede deducirse el módulo de elasticidad de la madera y su resistencia a flexión (dinámicos).

Algunos equipos proporcionan solamente la velocidad de la onda (por ejemplo, FAKOPP Microsecond Timer) y otros calculan también el MOE y MOR y la clase resistente de la madera (Sylvatest) introduciendo la especie y humedad de la madera.

5.5.- VALIDEZ DE LOS RESULTADOS

La correlación entre la velocidad de propagación en la dirección longitudinal y las propiedades mecánicas de la madera (MOE y MOR) da valores de R^2 que oscilan entre 0,63 y 0,85 (Sandoz, 1989; Machado *et al.*, 1998).

En piezas de cierta escuadría (100x120 y 120x240 mm), el coeficiente de determinación entre la velocidad de transmisión y la tensión de rotura a flexión se encuentra comprendido entre 0,67 y 0,79, y con el módulo de elasticidad entre 0,56 y 0,88 (Kessel *et al.*, 1998).

En secciones de 100x120 y 100x150 mm se han obtenido coeficientes de determinación de 0,75 a 0,87 entre el módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a flexión, y de 0,81 a 0,87 con el módulo de elasticidad estático (Kuklík *et al.*, 1998).

Los anteriores resultados son todos para madera actual. Para madera antigua, en Emerson *et al.* (2002) se inspeccionaron con ultrasonidos grandes puentes de madera antigua.



Figura 31. Viga con extensa degradación en el extremo. Fuente: Emerson et al. (2002).

Los resultados obtenidos permitieron concluir lo siguiente:

- 1) La velocidad de la onda ultrasónica es un buen parámetro para detectar y cuantificar degradaciones moderadas o graves, pero no es un buen indicador de las degradaciones incipientes o tempranas. Un 50% de disminución en la velocidad de la onda puede indicar la presencia de una degradación moderada y corresponde a una disminución del 60% en el módulo de elasticidad y a una disminución del 40% en la resistencia a compresión en la dirección perpendicular a la fibra de la madera. Si la velocidad de la onda disminuye menos de un 5% se debe a la presencia de degradaciones incipientes o tempranas, que producen cambios en las propiedades de compresión de la madera.
- 2) El voltaje del pico ultrasónico y el voltaje eficaz parecen mejores parámetros que la velocidad de onda para detectar y cuantificar niveles iniciales de degradación. Sin embargo, a niveles de degradación moderados o graves, los cambios relativos en los parámetros de la amplitud de la onda resultan insignificantes. Disminuciones del voltaje de pico de aproximadamente de 50 a 80% y disminuciones en el voltaje eficaz de 40 a 70% indican la presencia de una degradación incipiente y corresponde a una disminución del 15-20% en el módulo de elasticidad y del 15-20% en la resistencia a compresión perpendicular a la fibra de la madera.
- 3) La frecuencia de pico de la onda ultrasónica es un razonable indicador de la presencia de degradación, pero no es fiable para cuantificar el nivel de degradación. Una disminución en la frecuencia de pico del 20 al 50% indica la presencia de degradación.
- 4) El voltaje de pico ultrasónico es el mejor parámetro para detectar la presencia de degradaciones incipientes. Es más sensible a la presencia de degradación incipiente que la velocidad de onda ultrasónica y la frecuencia de pico.

5) El voltaje de pico ultrasónico y la velocidad de onda deberían usarse juntas para determinar y cuantificar todos los niveles de degradación. El voltaje de pico puede usarse para detectar y cuantificar degradaciones tempranas, mientras que la velocidad de onda puede usarse para detectar y cuantificar degradaciones moderadas y severas.

En la investigación expuesta en Branco *et al.* (2010) se analizaron con varias técnicas no destructivas cerchas de madera de la especie *Picea abies* Karst., de más de 70 años de antigüedad. Para la técnica de ultrasonidos se obtuvo un coeficiente de determinación de 0,62 entre el módulo de elasticidad dinámico obtenido y el módulo de elasticidad estático obtenido mediante ensayo destructivo según la norma UNE EN 408:2003. En comparación, la clasificación visual de la madera según la norma italiana UNI 11035 no fue en absoluto significativa ($R^2=0,06$).



Figura 32. Sección de una de las vigas de madera antigua analizada en Branco *et al.* (2010).



Figura 33. Sección de otra de las vigas de madera antigua analizada en Branco *et al.* (2010).

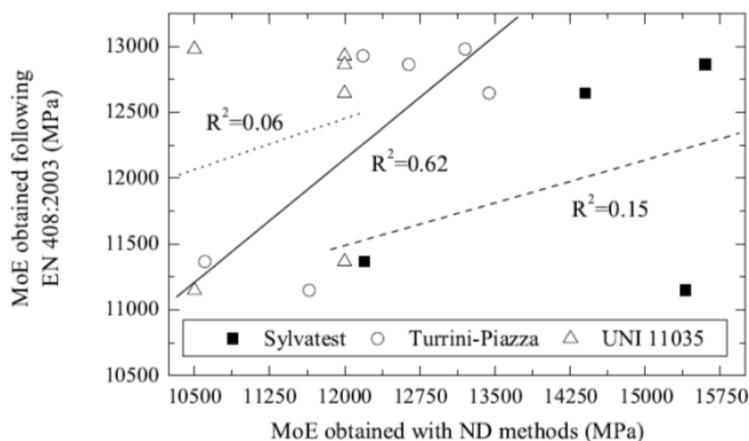


Figura 34. Correlación entre los valores del módulo de elasticidad (MOE) dados por métodos no destructivos y los obtenidos mediante el ensayo destructivo que establece la norma UNE EN 408:2003. Los resultados etiquetados como Sylvatest corresponden a ultrasonidos; los resultados etiquetados como Turrini-Piazza corresponden a un estudio anterior; los resultados etiquetados como UNI 11035 corresponden a una norma italiana de clasificación visual. Fuente: Branco et al. (2010).

En Mantilla-Carrasco y Rocha-Teixeira (2012) se propone una metodología para detectar patologías de la madera mediante ultrasonidos que se prueba en estructuras de madera antigua de Brasil. Si bien los autores consideran que la metodología proporciona resultados satisfactorios, lo cierto es que el número de estructuras ensayadas y de datos obtenidos resultan insuficientes para validarla. Para eso se necesitaría mucha más investigación con muchas especies distintas de madera.

5.6.- VENTAJAS

- Permite determinar el módulo de elasticidad, la resistencia a flexión y, por tanto, la clase resistente de la madera según el CTE.
- El tiempo de toma de la medida es breve.
- Los equipos comerciales son robustos, lo que permite su uso en obra.
- Está firmemente asentado en la industria.
- La norma UNE 41805-8:2009 IN (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera) incluye la técnica de ultrasonidos como una moderna técnica de clasificación por métodos no destructivos, aplicable en el ámbito del diagnóstico de madera puesta en obra.

5.7.- DESVENTAJAS

- La técnica de transmisión ultrasónica exige asegurar un acoplamiento óptimo entre los transductores y el material. En el caso de la madera se recomienda usar brocas cónicas para realizar los orificios donde se colocan los extremos de los transductores, pues se mejora significativamente la repetitividad de los resultados (Acuña *et al.*, 2007).
- Como se realizan perforaciones para colocar los transductores en el elemento de madera que vaya a evaluarse, después, si se quiere preservar el aspecto estético del elemento, deben taparse los orificios realizados con productos como selladores de silicona, adhesivos o masilla de serrín.
- En entornos donde hay muchas vibraciones (por excavaciones, equipos electrógenos, perforadoras, etc.), los resultados son incorrectos o el equipo no responde apropiadamente.
- Los resultados de equipos de transmisión ultrasónica de distintos fabricantes en cuanto a velocidades de onda son muy distintos. Las velocidades obtenidas con distintos equipos no son comparables entre sí, aunque se examinen elementos de la misma especie y la misma calidad estructural (Acuña *et al.*, 2007).
- La falta de normalización de los equipos de medida obliga a efectuar mediciones de contraste para comprobar la influencia que puede tener en la medida la distancia de separación entre los transductores. Dependiendo del umbral de detección, propio del diseño del equipo, habrá un aparente retraso en la lectura de recepción de la onda, que, si es grande, como en el caso del equipo Sylvatest, supondrá obtener, para idénticas calidades, menores valores de la velocidad al aumentar la longitud de las piezas (Acuña *et al.*, 2007).

6.- TÉCNICA DE VIBRACIONES INDUCIDAS

6.1.- DEFINICIÓN

Esta técnica se basa en inducir ondas de presión o impacto que recorran el elemento a inspeccionar. Al igual que en la técnica de ultrasonidos, se calcula el tiempo que tarda la onda de presión en recorrer cierta distancia, se determina la velocidad de propagación de la onda y, a partir de ésta y de la densidad del medio, se deduce el módulo de elasticidad dinámico (MOE dinámico) y el módulo de rotura o de resistencia a flexión dinámico (MOR dinámico). Como el MOE y el MOR dinámicos obtenidos así están fuertemente correlacionados con el MOE y el MOR estáticos (es decir, obtenidos mediante ensayos destructivos de flexión) y son buenos predictores de éstos (Sotomayor-Castellanos y Villaseñor-Aguilar, 2006; Acuña y Casado, 2015), puede asignarse mediante esta técnica una clase resistente al elemento analizado, según el Código Técnico de la Edificación. Si la onda se encuentra con algún tipo de defecto en el elemento analizado su tiempo de recorrido aumentará respecto al tiempo de recorrido en un elemento sin defectos.

La onda de presión se provoca mediante un impacto producido por un martillo o mediante las vibraciones inducidas generadas por un dispositivo vibratorio. El martillo o dispositivo vibratorio incorpora un acelerómetro que emite una señal de inicio a un temporizador. Al producir el impacto en la pieza, la onda viaja por el elemento y un segundo acelerómetro, instalado en el otro lado del elemento capta el borde delantero de la onda de propagación, enviando una segunda señal al temporizador. Mediante este procedimiento se determina el tiempo de recorrido. El impacto o la vibración pueden ser producidos por un dispositivo que no lleve instalado un acelerómetro; en este caso la onda se propaga y detecta mediante dos acelerómetros instalados en dos puntos a lo largo de su trayectoria.

Cuando la muestra de ensayo está libre por ambos extremos, o al menos por uno (como una viga o vigueta en voladizo), puede detectarse la vibración de la muestra sometida a impacto o vibración mediante cabezales de vibración o mediante cabezales láser sin contacto directo. Después, se calculan las frecuencias de resonancia mediante análisis discretos de Fourier. Conociendo la masa y las dimensiones de la muestra, las frecuencias de resonancia pueden usarse para calcular el módulo de elasticidad dinámico y, a partir de él, la resistencia a flexión dinámica y el módulo de cizalla perpendicular a la parte plana de la muestra (Bell *et al.*, 1954).

Algunos equipos de dimensiones reducidas basados en la técnica de vibraciones inducidas/ondas de presión que pueden encontrarse en el mercado son los siguientes:

- FAKKOP Microsecond Timber.
- FAKKOP Portable Lumber Grader.
- Timber Grader MTG (Rozema, 2007).
- IML Micro Hammer.



Figura 35. Equipo de vibraciones inducidas FAKOPP Microsecond Timer. Fuente: FAKOPP.

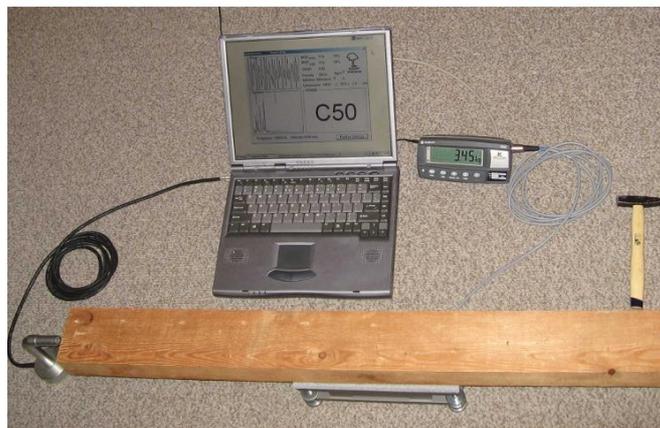


Figura 36. Equipo de vibraciones inducidas FAKOPP Portable Lumber Grader. Fuente: FAKOPP.

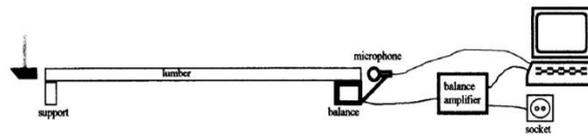


Figura 2. Esquema del ensayo con el PLG. (Fuente FAKOPP)



Figura 3. Ensayo con el PLG



Figura 4. Detalle de la colocación del micrófono y balanza

Figura 37. Esquema de un ensayo con FAKOP Portable Lumber Grader y ensayo real. La balanza se necesita para determinar el peso de la viga, con el cual se calcula la densidad. Fuentes: FAKOPP y Casado et al. (2011).



Figura 38. Equipo de vibraciones inducidas Timber Grader MTG. Fuente: Elaboración propia.



Figura 39. Equipo IML Micro Hammer (derecha) y aplicación a un árbol en pie (izquierda). Fuentes: Merlo-Sánchez et al. (2008) e IML.

Según Bethge *et al.* (1996), el uso de esta técnica también se ha utilizado para la detección de pudriciones y defectos internos en árboles en pie; pero no es posible describir la geometría del defecto de la pieza. Se obtiene una mejor evaluación de árboles en pie combinando las técnicas de vibraciones inducidas y resistografía con la inspección visual.

En el mercado existen varias máquinas basadas en esta técnica para su uso en líneas de aserraderos y de fábricas de madera laminada encolada. Dos de ellas son Dynagrade y Precigrader. En estas máquinas, la vibración producida por un pequeño impacto en el extremo del elemento de madera es grabada por micrófonos. Al mismo tiempo, la longitud se mide mediante un láser.

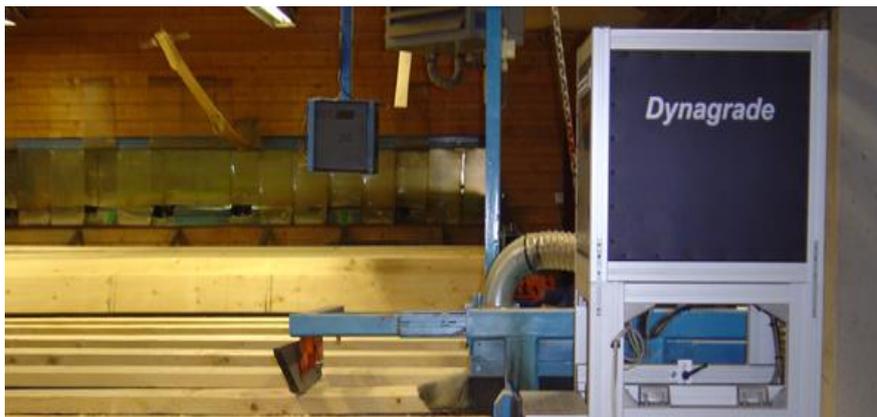


Figura 40. Equipo Dynagrade para clasificación de madera mediante vibraciones inducidas. Fuentes: DYNALISE.

6.2.- FUNDAMENTOS FÍSICOS

Como ya se explicó en la técnica de ultrasonidos, la madera es un material orgánico y ortotrópico por lo que la resistencia y las propiedades del material varían en función de la dirección considerada, obteniendo velocidades de ondas distintas en el eje radial, transversal y longitudinal. Considerando esta propiedad, un golpe en la testa de la pieza de madera causará mayoritariamente ondas de impacto longitudinales a lo largo de la estructura celular del eje longitudinal de la pieza; y, al contrario, golpeando la parte superior de la pieza se producirán ondas principalmente en la dirección perpendicular al eje longitudinal de la pieza.

Para ondas de impacto longitudinales que viajan a lo largo de un eje principal, puede deducirse la relación matemática siguiente:

$$E_D = \rho \times V_L^2$$

donde

E_D es el módulo de elasticidad dinámico

ρ es la densidad

V_L^2 es la velocidad de la onda longitudinal

Si la muestra de ensayo está libre por ambos extremos, o al menos por uno (como una viga o vigueta en voladizo), la velocidad de la onda de presión longitudinal puede determinarse, en vez de dividiendo la distancia recorrida por el tiempo empleado en recorrerla, a partir de la frecuencia de vibración longitudinal (f).

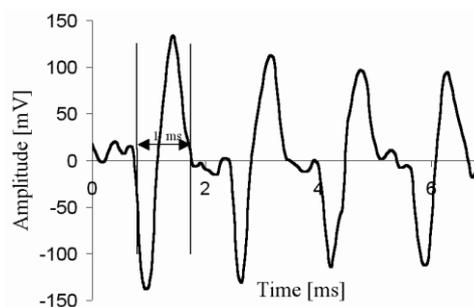


Figura 41. Separación de ondas de presión longitudinales en una vigueta de 427 cm longitud y sección 2x4 cm. Fuente: Divós y Tanaka (2005).

En el caso de vigas o viguetas muy largas, para determinar el MOE dinámico a partir de la frecuencia resulta conveniente aplicar esta corrección (Rayleigh y Lindsay 1945):

$$f = f_0 \left(1 + \frac{n^2 \pi^2 \mu^2 (a^2 + b^2)}{24L^2} \right)$$

Donde:

f es la frecuencia limitante para una viga muy larga

f_0 es la frecuencia observada

μ es el coeficiente de Poisson

a y b son las dimensiones de la sección del elemento

n es el número del modo de vibración

L es la longitud del elemento

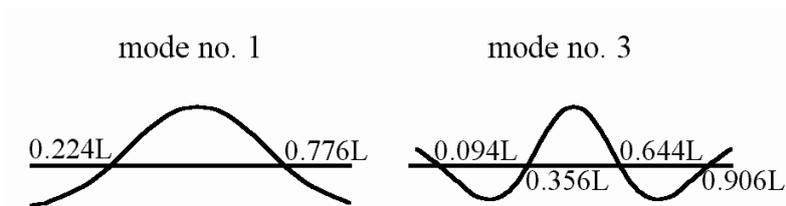


Figura 42. Localizaciones de los puntos nodales en una viga vibrando libremente para el primer modo de vibración (izquierda) y para el tercero (derecha). L es la longitud de la viga. Fuente: Divós y Tanaka (2005).

Las ondas producidas perpendiculares a la fibra tienen tiempos de transmisión que oscilan entre 850 y 1000 $\mu\text{s}/\text{m}$; y las ondas longitudinales, tiempos de transmisión próximos a 200 $\mu\text{s}/\text{m}$.

La humedad del elemento estructural influye en las velocidades de propagación de las ondas de presión: el caso que éstas se propaguen en el eje tangencial o radial, disminuye el tiempo de recorrido para contenidos inferiores del 30% de humedad. Sin embargo, las velocidades de propagación de las ondas no sufren variaciones de valores significativos cuando la humedad supera el 30% (punto de saturación de la fibra o PSF).

6.3.- RESULTADOS QUE PROPORCIONA

Se obtiene la velocidad de la onda de presión en la madera, y conociendo la densidad de ésta puede deducirse el módulo de elasticidad de la madera y su resistencia a flexión (dinámicos). También puede obtenerse la frecuencia de resonancia (Bell *et al.*, 1954) y, conociendo la masa del elemento y sus dimensiones, puede deducirse el módulo de elasticidad de la madera y, a partir de ella, su resistencia a flexión y el módulo de cizalla (dinámicos).

Algunos equipos proporcionan solamente la velocidad de la onda (FAKOPP Microsecond Timer e IML Micro Hammer). Otros calculan a partir de la frecuencia de resonancia el MOE y MOR y la clase resistente de la madera (Timber Grader MTG y FAKKOP Portable Lumber Grader), siempre que se calcule y se introduzca antes la densidad de ésta en el equipo. Puede no calcularse la densidad y seleccionar una especie en la pantalla de estos dos equipos, pero entonces la densidad que el equipo usa para el cálculo será aproximada, no la real, y los resultados obtenidos serán más imprecisos.



Figura 43. Equipo de vibraciones inducidas con FAKOPP Microsecond Timer. El aparato proporciona solamente la velocidad de la onda de presión (en microsegundos). Fuente: FAKOPP



Figura 44. Resultados de un ensayo con el equipo de vibraciones inducidas Timber Grader MTG. El aparato proporciona en su pantalla el módulo de elasticidad (13947 N/mm²) y la clase resistente de la madera (C30), que depende de su módulo de rotura. Fuente: Brookhu.

6.4.- VALIDEZ DE LOS RESULTADOS

Las técnicas de vibraciones inducidas/ondas de presión se han aplicado y se han obtenido buenas correlaciones para evaluar el estado de estructuras de madera (Clausen *et al.*, 2001), para detectar defectos en árboles en pie (Wang *et al.*, 2004) para determinar las propiedades mecánicas de troncos de pequeños diámetro (Wang *et al.*, 2001), de productos derivados de la madera como tableros contrachapados (Ross *et al.* 1998), madera laminada encolada (Yang *et al.*, 2008), y productos de madera reciclada (Han *et al.*, 2005). La efectividad de las máquinas de clasificación de la madera basadas en técnicas de vibración es una de las conclusiones obtenidas por Diebold *et al.* (2000). La técnica de vibraciones inducidas se ha usado también con éxito para evaluar estructuras hechas de otros materiales. Por ejemplo, Mazurek *et al.* (1992) describe el uso de vibraciones inducidas para evaluar puentes construidos con vigas de aluminio.

La correlación entre la velocidad de propagación de la onda de presión en la dirección longitudinal y las propiedades mecánicas de la madera (MOE y MOR estáticos) da

valores de R^2 relevantes, que pueden llegar a 0,91 (Ross *et al.*, 1991; Ross *et al.*, 1997). Resultados similares se han obtenido para Pinus Pinaster de bosques españoles (Casado *et al.*, 2008).

En el caso de la madera de Pseudotsuga menziesii (abeto de Douglas), se han obtenido correlaciones con valores de R^2 de 0,82 entre el módulo de elasticidad estático obtenido mediante máquina universal de ensayos según la norma UNE EN 408:2004 y el módulo de elasticidad dinámico obtenido mediante el equipo de FAKKOP Portable Lumber Grader (Fernández Ordiz *et al.*, 2009).

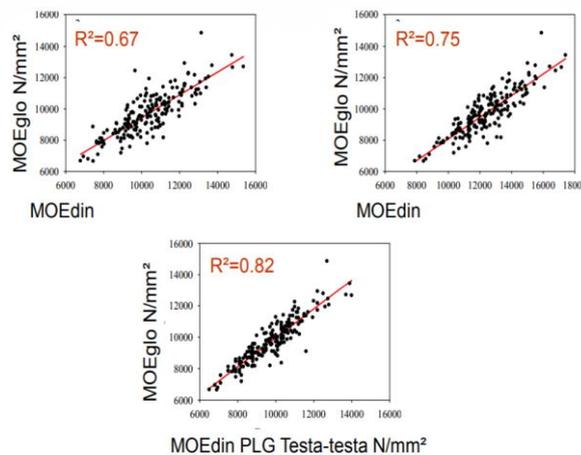


Figura 45. Comparación del módulo de elasticidad estático obtenido mediante máquina universal de ensayos según la norma UNE EN 408:2004 y del módulo de elasticidad dinámico obtenido mediante FAKKOP Microsecond Timber (arriba izquierda), IML Micro Hammer (arriba derecha) y FAKKOP Portable Lumber Grader (debajo), haciendo los ensayos de testa a testa en los tres casos. La especie fue abeto de Douglas (197 vigas). Fuente: Fernández-Ordiz *et al.* (2009).

Comparación clases resistentes asignadas con PLG y rotura

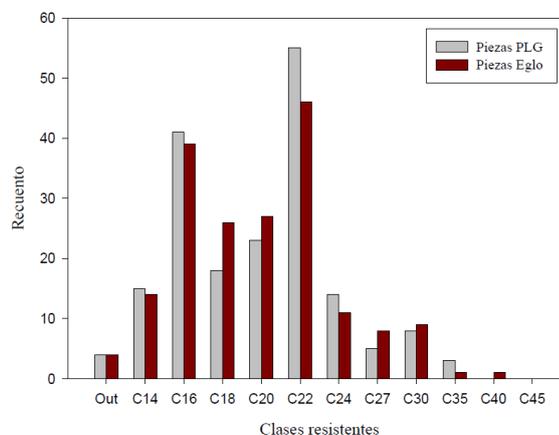


Figura 46. Comparación entre las clases resistentes asignadas según el resultado del ensayo de flexión a rotura de acuerdo con la norma UNE EN 408:2004 y las clases resistentes asignadas según el resultado del ensayo no destructivo mediante FAKKOP Portable Lumber Grader. La especie fue abeto de Douglas (197 vigas). Fuente: Fernández-Ordiz *et al.* (2009).

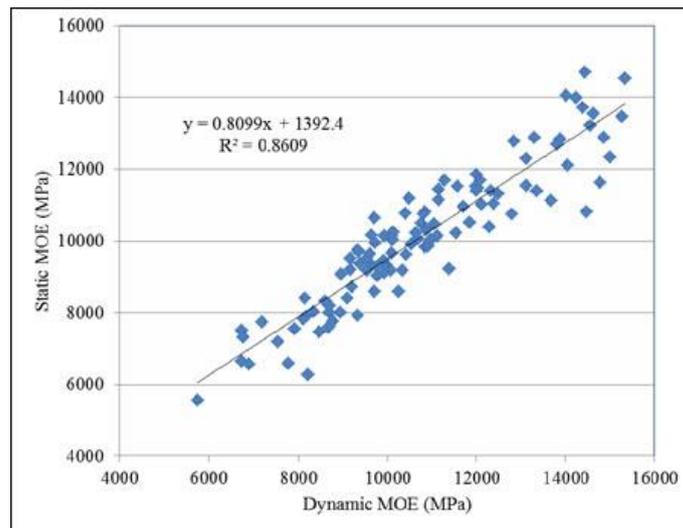


Figura 47. Comparación del módulo de elasticidad estático obtenido mediante máquina universal de ensayos según la norma ASTM D 198 (ASTM 2002) y del módulo de elasticidad dinámico obtenido mediante Timber Grader MTG. La especie fue haya (106 vigas). Fuente: Guntekin et al. (2014).

Según Casado *et al.* (2007), que probaron FAKKOP Portable Lumber Grader con 57 piezas de *Pinus sylvestris* L. estructural de sección transversal de 75x155 mm y 80x200 mm, la técnica de vibraciones inducidas del equipo PLG como predictora del MOE estático (obtenido mediante máquina universal de ensayos siguiendo la norma UNE-EN 408:2011+A1) ofrece unos resultados bastante aceptables y permite una clasificación estructural de las piezas muy similar a los resultados de los ensayos destructivos de flexión, si bien la asignación de clases resistentes según el software del equipo es conservadora y subestima la calidad de las piezas en las clases resistentes más altas.

En esta técnica se observa un aumento considerable en los tiempos de transmisión de las ondas de impacto en elementos de madera con defectos internos, que aumentan significativamente cuando la transmisión se realiza perpendicularmente a la fibra de la madera.

Por ejemplo, los tiempos de transmisión en la especie *Pseudotsuga menziesii* Mirb. (abeto de Douglas) en maderas sanas es de aproximadamente 800 $\mu\text{s}/\text{m}$, mientras que en elementos con degradaciones severas el tiempo aumenta a 3200 $\mu\text{s}/\text{m}$, e incluso más (Arriaga *et al.*, 2002).

En general, aumentos del 30% en el tiempo de transmisión de ondas respecto a los valores obtenidos en maderas sanas implican aproximadamente una pérdida de resistencia del 50%, y aumentos de tiempo del 50% denotan madera muy degradada (Pellerin *et al.*, 1985).

Para madera antigua, en Cavallia y Tognia (2013) se describe una investigación en la que se analizaron 13 viejos elementos de *Abies Alba Mill* rescatados de diferentes edificios históricos del área de Florencia. Se clasificaron visualmente y se ensayaron con distintas técnicas no destructivas para la densidad y el módulo de elasticidad: ensayos de vibración de flexión y longitudinales, tiempo de transmisión de ondas de presión y profundidad de penetración con Pilodyn. Los elementos de madera se sometieron también a un ensayo de flexión de cuatro puntos para determinar el módulo de elasticidad local y global. Los modelos propuestos obtuvieron coeficientes de determinación (R^2) comprendidos entre 0,63 y 0,83. Aunque los resultados son prometedores, el número de elementos ensayados es muy reducido (13). Para corroborarlos, se necesitaría ampliar la investigación con más elementos y diferentes especies de madera.

6.5.- VENTAJAS

- Permite determinar el módulo de elasticidad, la resistencia a flexión y, por tanto, la clase resistente de la madera según el CTE.
- El tiempo de toma de la medida es muy breve (pueden tomarse, por ejemplo, 30 medidas por minuto en el equipo Timber Grader MTG).
- La norma UNE 41805-8:2009 IN (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera) incluye la técnica de vibraciones inducidas como una moderna técnica de clasificación por métodos no destructivos, aplicable en el ámbito del diagnóstico de madera puesta en obra.

6.6.- DESVENTAJAS

- En general, la técnica no es muy precisa para las especies de madera menos homogéneas que presentan gran número de defectos individuales (nudos, por ejemplo). Por tanto, tampoco resulta precisa para madera antigua, que a menudo tienen muchos defectos individuales, causados por termitas, carcoma y hongos de pudrición.
- En el caso de algunos equipos, como FAKKOP Microsecond Timber, se realizan perforaciones para colocar los acelerómetros en el elemento de madera que vaya a evaluarse. Después, si se quiere preservar el aspecto estético del elemento, deben taparse los orificios realizados con productos como selladores de silicona, adhesivos o masilla de serrín.

- En el caso de los equipos Timber Grader MTG y FAKKOP Portable Lumber Grader, el ensayo debe realizarse en elementos de madera con los extremos libres (es decir, con elementos no sujetos a estructuras), por lo cual este equipo es inapropiado para usarse en elementos ya instalados en obras. Por otra parte, estos equipos requieren introducir la densidad de la muestra, que en algunos casos es difícil de determinar (p.ej., por geometría irregular o variable) y para lo que se precisa una báscula. Puede no calcularse la densidad y seleccionar una especie en la pantalla de los equipos, pero entonces la densidad que estos dos equipos usan para el cálculo será aproximada, no la real, y los resultados obtenidos serán más imprecisos.
- Al igual que sucede con los equipos de ultrasonidos, los resultados de equipos de vibraciones inducidas de distintos fabricantes en cuanto a velocidades de onda son muy distintos. Las velocidades obtenidas con distintos equipos no son comparables entre sí, aunque se examinen elementos de la misma especie y la misma calidad estructural.
- En entornos donde hay muchas vibraciones (por excavaciones, equipos electrógenos, perforadoras, etc.), los resultados son incorrectos o el equipo no responde apropiadamente.

7.- TÉCNICA DE PENETROMETRÍA

7.1.- DEFINICIÓN

Se basa en la medición de la densidad y dureza de la madera mediante un instrumento portátil conocido como penetrómetro (el más conocido se denomina PILODYN). El instrumento es un cilindro metálico, en cuyo interior se aloja un muelle que se comprime manualmente hasta que acumula una energía potencial determinada (6 Julios en el modelo PILODYN J6).

Cuando el muelle se libera, impulsa una varilla metálica contra la madera. Dependiendo de la profundidad alcanzada por la varilla, pueden predecirse valores de densidad y dureza. La punta de la varilla se cambia cada 5.000 golpes aproximadamente.

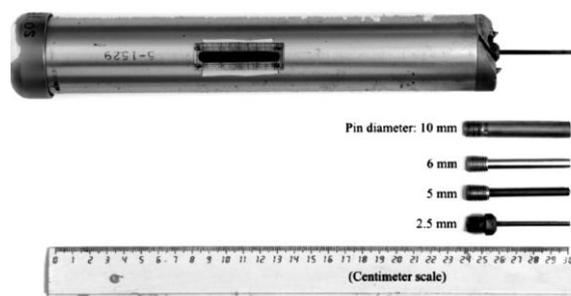


Figura 48. Penetrómetro PILODYN J6 con la varilla estándar de 2,5 mm de diámetro conectada. El cuerpo del instrumento tiene 270 mm de longitud (con varilla en extensión, 320 mm) y 50 mm de diámetro. La escala de medición se muestra en el medio del dispositivo. Todos los pines se conectan con una rosca M10 al instrumento. Fuente: Mäkipää et. al. (2011) y Palaia (2014).

Además de para detectar deterioros en la madera y para caracterizar la madera aserrada destinada a fines estructurales y sus materiales derivados, este instrumento se emplea para medir el crecimiento de los anillos anuales del núcleo radial en árboles vivos. Para este caso, permite comparar el desarrollo de la densidad de la madera en función del clima, altitud, topografía y naturaleza del suelo.



Figura 49. Penetrómetro PILODYN 6J Forest penetrando en un árbol. Fuente: DAGA.

El modelo 6J (Energía de impacto: 6 Julios) se usa comúnmente para la detección de deterioros en madera estructural y en postes.



Figura 50. Penetrómetro PILODYN 6J Forest. Fuente: DAGA.

7.2.- FUNDAMENTOS FÍSICOS

Al accionar el dispositivo se cuantifica la penetración de la varilla metálica percutora en la madera, impulsada por la fuerza elástica del resorte, mediante una escala graduada de 40 mm de distancia máxima. La densidad se obtiene relacionando con el valor de incisión del cilindro.

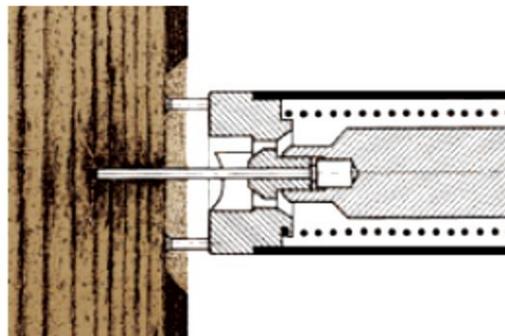


Figura 51. Penetración del instrumento PILODYN 6J. Fuente: DAGA SL.

Mediante el disparo de la varilla metálica sobre la madera con una energía uniforme (normalmente, 6 Julios), se obtiene una penetración de la varilla cuya profundidad se lee en una escala de 0-40 mm. A partir de la profundidad se determina la densidad de la madera y su dureza.

La penetración de la aguja es inversamente proporcional a la densidad o estado de conservación de la madera, teniendo importancia su contenido de humedad, puesto que su mayor o menor contenido afecta a las propiedades físicas del material (Palaia, 2014).

7.3.- RESULTADOS QUE PROPORCIONA

Da valores de profundidad de penetración (mm). Los valores normales para madera en buen estado van de 9 a 12 mm, pudiendo llegar a 13 mm, dependiendo de la especie en concreto. Valores superiores a 13 mm pueden indicar degradación de la madera.

Los resultados son locales. Es decir, corresponden al área dónde se aplica el instrumento, y no a todo el elemento.



Figura 52. Empleo del penetrómetro en una viga. Fuente: Palaia (2014).

7.4.- VALIDEZ DE LOS RESULTADOS

En Hoffmeyer (1978) se analizaba el uso del penetrómetro para determinar la resistencia a impacto a la madera. Inicialmente se empleó para evaluar el estado de los postes de madera empleados en los tendidos eléctricos (Wilson, 1981), sobre todo para detectar en ellos deterioros por hongos de pudrición.

En 1987 se publicó el primer trabajo de determinación de densidades a partir de los resultados del penetrómetro (Villeneuve *et al.*, 1987), en el cual se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0,66 entre la profundidad de penetración y la densidad de la madera de pino gris o de Banks (*Pinus banksiana* Lamb.), y de 0,57 para la madera de picea negra (*Picea mariana* Mill.).

Este instrumento se ha empleado frecuentemente para analizar árboles vivos, bien para seleccionar los árboles que deben cortarse en las claras o los árboles de más interés en cruces de ejemplares, bien para predecir las propiedades mecánicas que tendrá la madera aserrada procedente del árbol (López, 1995; Wu, 2010).

Como establecen Watt (1996), Iñiguez (2007) y Bobadilla-Maldonado *et al.* (2007), se ha usado también para determinar la densidad de la madera estructural en inspecciones de viviendas y edificios.

En la investigación expuesta en Branco *et al.* (2010) se analizaron con varias técnicas no destructivas cerchas de madera de la especie *Picea abies* Karst., de más de 70 años de antigüedad. Con la técnica del penetrómetro, se obtuvo un coeficiente de determinación de 0,50 entre la profundidad de penetración y la densidad de la madera considerando los valores medios obtenidos en las mediciones realizadas en las cuatro caras de elementos de cerchas, con un contenido de humedad de alrededor del 12%.

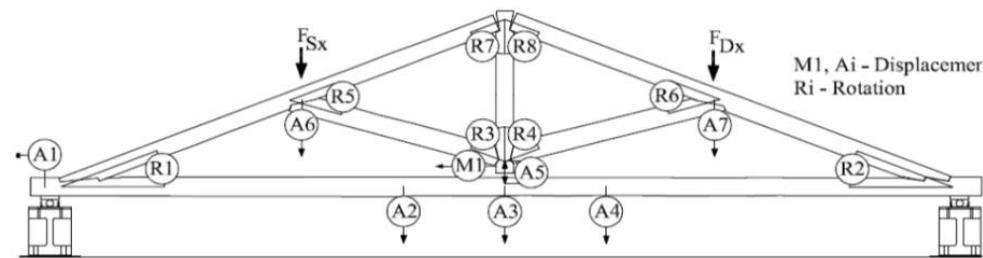


Figura 53. Cerchas de madera antigua analizadas en Branco *et al.* (2010).

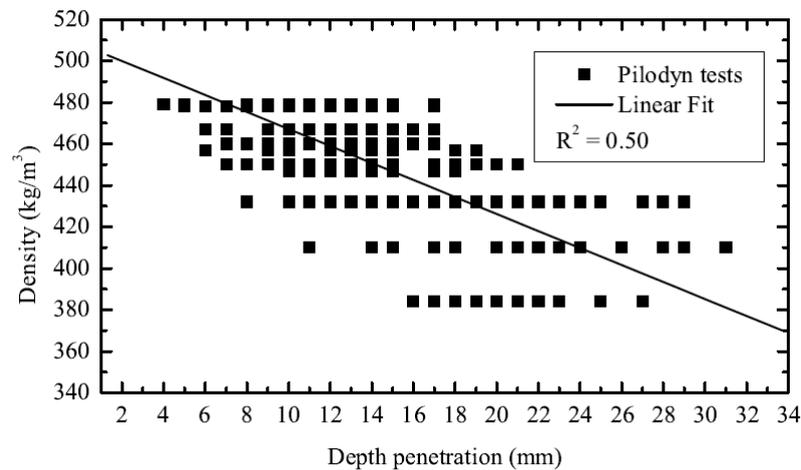


Figura 54. Correlación entre la profundidad de penetración obtenida con Pilodyn y la densidad de la madera antigua. Fuente: Branco *et al.* (2010).

En Montón (2012) se analizaron con el penetrómetro 150 muestras de pino radiata, con una penetración en la cara tangencial y otra en la radial para cada una de las muestras. Los resultados dieron un valor de penetración ligeramente superior en la cara tangencial que en la radial (12,83 y 12,20 mm, respectivamente). Sin embargo, los

coeficientes de determinación fueron muy bajos y, por tanto, no significativos ($R^2=0,31$ en la cara radial; $R^2=0,19$ en la cara tangencial).

Según Bobadilla-Maldonado *et al.* (2007), en el empleo del penetrómetro existen diferencias significativas de penetración de la aguja según las especies: la penetración media en *Pinus radiata* es de 10,06 mm, en *Pinus sylvestris* de 10,78 y en *Pinus nigra*, 9,62 mm, correspondiendo a valores medios de densidad de 481, 500 y 586 kg/m³ respectivamente. El coeficiente de determinación común para las tres especies fue de 0,486, pese a que fue un estudio amplio, en el cual se estudiaron 395 muestras (vigas de secciones de 150x200 y 150x250 mm). Además, los valores de densidad obtenidos fueron entre un 9 y un 11% inferiores a los reales.

En la investigación detallada en Iñiguez (2007) se estudiaron 155 muestras de pino radiata, 120 de pino laricio y 120 de pino silvestre, y se concluyó que existía un coeficiente de determinación de 0,59 entre la densidad media y la profundidad de penetración. En otra investigación similar (Notivol *et al.*, 2008) se encontró para pino resinero un R^2 de 0,73, resultado que permite usar el penetrómetro para predecir la densidad en esa especie. Sin embargo, para otros autores como Bonamini *et al.* (1990), la correlación obtenida entre densidad y profundidad de penetración no es en general significativa. Muchos autores proponen emplear el penetrómetro con otras técnicas no destructivas (Basterra *et al.*, 2005; Montón, 2012). Sea cual sea el caso, las mediciones relacionadas con este instrumento atañen a la superficie de la madera, y no son útiles para piezas de gran sección.

Comparando los resultados en madera sana y madera con defectos, que suele ser el caso de la madera antigua, según el trabajo de Palaia (2014), los valores de profundidad de penetración arrojaron resultados de entre 9 y 12 mm en viguetas de madera en buen estado, mientras que estos valores eran de 14 a 25 mm, e incluso más en las viguetas afectadas por hongos de pudrición. Analizando los valores de penetración de 13 mm, que se produjeron en 28 viguetas de 192 (268 puntos de lectura) con una incidencia de un 10 % de los valores de penetración, se pudo comprobar que, según la inspección visual, correspondían tanto a viguetas de madera en buen estado como a madera con degradaciones muy localizadas.

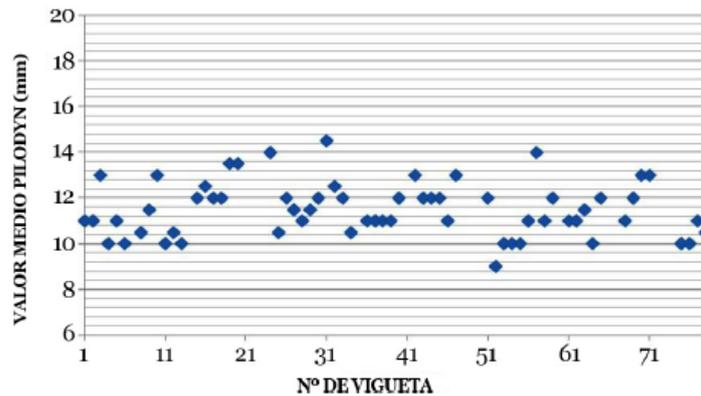


Figura 55. Valores medios de profundidad de penetración (mm) en las viguetas analizadas. Fuente: Palaia (2014).

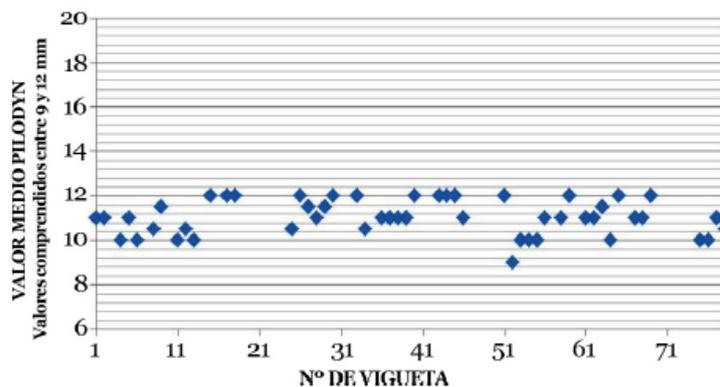


Figura 56. Valores medios de profundidad de penetración (mm) de las viguetas, con valores entre 9 y 12 mm. Fuente: Palaia (2014).

En Palaia *et al.* (2010) se analiza el caso concreto de una estructura de madera patrimonial en Meliana empleando, entre otras técnicas, la del penetrómetro.

La humedad de la madera influye en el resultado obtenido con el penetrómetro, como se analiza en Smith y Morrell (1986).

7.5.- VENTAJAS

- Se puede determinar la densidad de la madera de forma rápida y no destructiva.
- Es un instrumento ligero, fácilmente transportable, y de fácil uso, pudiendo evaluar los árboles en pie o en servicio.
- La norma UNE 41805-8:2009 IN (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera) recoge la técnica de penetrometría (Pilodyn) como una moderna técnica de clasificación

por métodos no destructivos, aplicable en el ámbito del diagnóstico de madera puesta en obra.

- Es más cómodo de usar que los equipos de ultrasonidos y de resistografía.

7.6.- DESVENTAJAS

- La correlación de los resultados obtenidos con la densidad de la madera no es por el momento concluyente para cualquier especie de madera. En algunos casos la correlación es claramente no significativa.
- Su uso se limita a valorar el estado superficial de la pieza, hasta 40 mm de profundidad.
- Es necesario determinar el contenido de humedad a la hora de realizar los ensayos, por medio de un xilohigrómetro, debido a la influencia del contenido de humedad en las características mecánicas de la madera (Smith y Morrell, 1986).
- Muchos autores recomiendan usarlo en combinación con otras técnicas no destructivas como resistografías o ultrasonidos, a fin de contrastar y mejorar resultados.
- Es conveniente tener en cuenta la dirección en la que se está introduciendo la varilla, puesto que pueden variar los resultados.
- No proporciona valores de resistencia mecánica ni sus resultados son susceptibles de convertirse directamente en esos valores. Los resultados pueden servir para rechazar elementos, de pequeña sección, de madera nueva (en la industria) o para recomendar el refuerzo de elementos de madera antigua (en rehabilitación), pero no para clasificarlos según el sistema de clases resistentes del CTE.

8.- TÉCNICA DE EXTRACCIÓN DE TORNILLOS

8.1.- DEFINICIÓN

Se introduce un tornillo en la pieza de madera de interés y mediante un dispositivo se registra la máxima fuerza que se necesita para sacar el tornillo de la pieza. Mediante esta técnica se logra relacionar la fuerza de arranque con la densidad de la madera, y además pueden detectarse daños y degradaciones ocultas en las piezas de madera.



Figura 57. El aparato para esta técnica consta de un dispositivo de sujeción del tornillo, un transductor que registra la fuerza máxima de arranque, y un husillo, para la extracción del tornillo. Fuente: SANITE.

En cuanto a la aplicación de esta técnica, una vez sujeta firmemente con unas sargentas la muestra a analizar, para evitar cualquier vibración y movimiento, se introducen los tornillos sin pretaladro hasta la profundidad deseada y se coloca el extractor siguiendo las instrucciones del fabricante.

La velocidad de giro del husillo en el sentido de las agujas del reloj se fija a un ritmo de media vuelta en 3 o 4 segundos. Cuando el dispositivo de sujeción entra en contacto con la cabeza del tornillo comienza a registrar la fuerza aplicada, y el dato resultante del ensayo es la fuerza máxima registrada en el momento de la rotura de las fibras y arranque del tornillo.

8.2.- FUNDAMENTOS FÍSICOS

Se mide mediante un transductor o un dinamómetro la fuerza máxima de extracción de los tornillos que previamente se han introducido en la madera. Dicha fuerza está relacionada con la densidad media de la madera.

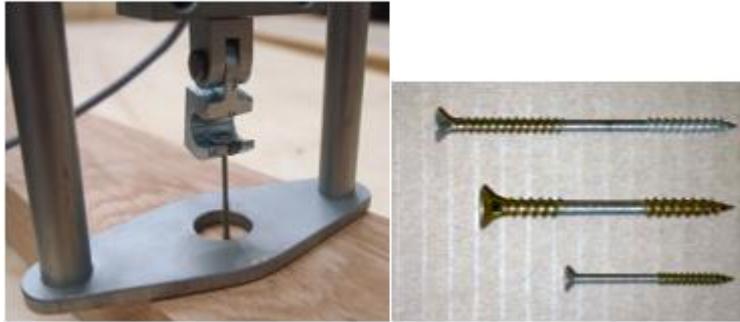


Figura 58. Extractor de tornillo y tornillos de 3, 4, y 5 mm de diámetro. Fuente: Basterra et al. (2005).

8.3.- RESULTADOS QUE PROPORCIONA

Proporciona la fuerza (en Newtons) de extracción del tornillo de la madera. Después, se emplea la fuerza de extracción para predecir la densidad de la madera.

Por ejemplo, en Basterra *et al.* (2009) se propone la siguiente relación para la madera de la Plaza Mayor de Chinchón (Madrid):

$$Densidad (g/cm^3) = \frac{1}{0,93 + \frac{2,47}{Fuerza\ canto (kN)}}$$

8.4.- VALIDEZ DE LOS RESULTADOS

La resistencia que ofrece la madera a la extracción del tornillo depende de varios factores o parámetros que influyen y deben tenerse en cuenta: diámetro del tornillo, longitud de introducción del tornillo, definición de las zonas donde se realizan los ensayos y número de extracciones que deben hacerse por muestra.

La extracción de tornillos se utiliza básicamente como método de aproximación a la densidad de la madera.

Varias investigaciones de autores como Talbot (1982), Winandy *et al.* (1998), Cai *et al.* (2002) y Fakopp (2014) han correlacionado la resistencia que ofrece la extracción del tornillo con las propiedades físicas y mecánicas de la madera, como la densidad, el módulo de elasticidad, el módulo de rotura y el módulo de cizallamiento.

En Cai *et al.* (2002) se estableció la siguiente relación entre densidad y fuerza de extracción del tornillo:

$$D = 0.729 + 0.000596 \times F$$

Donde:

D densidad específica de la madera al 12% de contenido en humedad (adimensional).

F resistencia al arranque de tornillos (lbf o libras-fuerza).

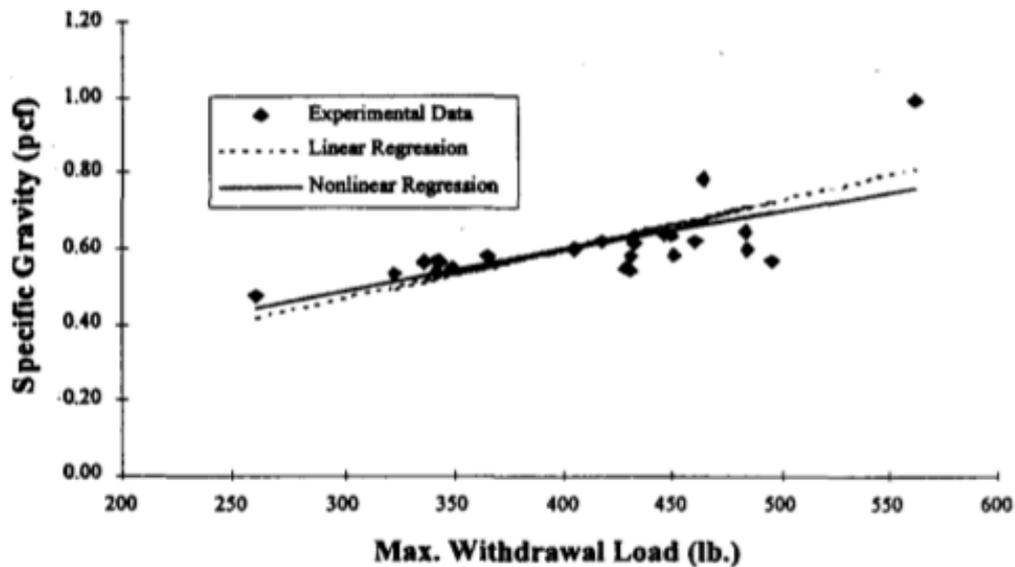


Figura 59. Resultados de regresión lineal y no lineal entre la densidad específica y la máxima fuerza de extracción de tornillos. Fuente: Cai et al. (2002)

En Divós *et al.* (1999) se exponen los resultados de una investigación en la que se combinaron cuatro técnicas de evaluación de la madera: examen visual, extracción de tornillos, ultrasonidos y muestreo mediante taladro. Relacionando la resistencia al arranque de los tornillos y la velocidad de onda ultrasónica obtenida, se obtuvo la siguiente ecuación para predecir la resistencia a flexión o módulo de rotura (MOR) para frondosas:

$$MOR_{est} = 1,258 \times F \times v^2 + 36,9$$

Donde:

MOR_{est} módulo de rotura estimado con el modelo (MPa)

F resistencia al arranque de tornillos (kN)

v velocidad de la onda ultrasónica (km/s)

El coeficiente de correlación entre la resistencia a flexión y MOR_{est} fue de 0,74.

Para coníferas, le ecuación obtenida fue la siguiente:

$$MOR_{est} = 0,809 \times F \times v^2 + 26,8$$

En Casado *et al.* (2005) se estudiaron 39 viguetas de *Pinus sylvestris* L. de espesor 7,5 cm, anchura variable 17,5-20,5 y 22,5 cm, y longitud de 300-400 y 500 cm. Dichas viguetas habían pertenecido al forjado de un edificio singular de la ciudad de Valladolid. Las viguetas se analizaron mediante ultrasonidos y extracción de tornillos.



Figura 60. Vista de las zonas elegidas para realizar los arranques. Fuente: Casado *et al.* (2005).



Figura 61. Corte de la probeta con los agujeros de los tornillos alcanzando un nudo oculto y fibra desviada. Fuente: Casado *et al.* (2005).

Los resultados obtenidos demostraron que la resistencia a flexión estática (determinada mediante ensayo destructivo) y la fuerza media de extracción obtenida en cada vigueta no tienen una relación estadísticamente significativa. Continuando en la línea de Divós *et al.* (1999), realizado en probetas de tamaño mediano-pequeño, se intentó determinar una relación entre la resistencia a flexión estática y una variable conjunta formada por la resistencia a la extracción y la velocidad de propagación de ultrasonidos (ambas variables son independientes).

Se logró establecer una relación estadísticamente significativa con un grado de confianza del 95%, pero el coeficiente de determinación obtenido en el ajuste fue tan bajo que la ecuación establecida no puede usarse para predecir la resistencia a flexión estática basándose en la velocidad de la onda ultrasónica y en la resistencia a la extracción, al menos en viguetas del mismo tipo que las ensayadas.

Se estableció que existía una relación estadísticamente significativa y con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,65 entre la densidad y la fuerza de extracción en el canto del elemento analizado:

$$Densidad (g/cm^3) = \frac{1}{0,956276 + \frac{2,3611}{Fuerza\ canto (kN)}}$$

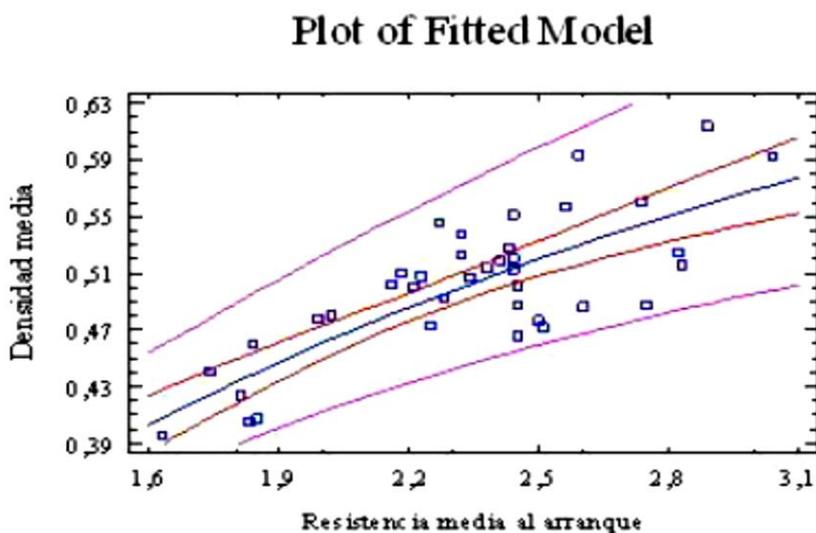


Figura 62. Representación gráfica de la densidad media (g/cm^3) frente a la resistencia media al arranque en el canto del elemento analizado (kN). Fuente: Casado *et al.* (2005).

Además, se comprobó que la fuerza media de arranque medida en el canto presenta la mejor relación estadística con la densidad media. Al mismo tiempo hace más fáciles y ágiles los trabajos de análisis en estructuras de madera, y evita también deteriorar innecesariamente los elementos analizados.

Finalmente, Casado *et al.* (2005) concluyeron que la extracción de tornillos puede emplearse con éxito como técnica de diagnóstico predictora de daños bióticos en la madera puesta en obra, pues detecta diferencias en la resistencia a la extracción dependiendo del estado de la madera, siempre que el tornillo se introduzca hasta una profundidad de 28 mm. Concluyeron también que la extracción de tornillos es un buen predictor de la densidad de la madera y que no es influido por el contenido en humedad de la madera, al menos para el rango de humedad 8,5-12,5%.

El fabricante de uno de los equipos de extracción de tornillos comercializados (Fakopp Enterprise) asegura que la resistencia al arranque de tornillos es un parámetro local, pero que escogiendo una posición representativa en la viga se obtienen resultados útiles para evaluar una estructura de madera. En este sentido, utilizando muestras de

madera de 4x6x80 cm, el fabricante efectúa un ajuste entre la resistencia a flexión y la resistencia de extracción de los tornillos en el cual obtiene un coeficiente de determinación de 0,72. También efectúa un ajuste entre la resistencia al arranque y la densidad, resultando en este caso un coeficiente de 0,79. Hasta el momento, estos resultados no han sido reproducidos en investigaciones de otros autores.

Debido a que esta técnica ha sido poco empleada en España y a que el número de estudios extranjeros es reducido aún, muchos expertos consideran que debe utilizarse en combinación con otras (inspección visual, ultrasonidos, vibraciones inducidas/ondas de presión, resistografía) para tener un mejor diagnóstico del estado del elemento analizado y poder comparar los resultados obtenidos con diversas técnicas.

8.5.- VENTAJAS

- Es una técnica de fácil implantación en obra y rápido uso.
- El equipamiento es ligero.
- Permite predecir la existencia de daños bióticos en la madera puesta en obra, pues detecta diferencias en la resistencia a la extracción dependiendo del estado de la madera. Esto resulta interesante, sobre todo en aquellos casos en los que la madera no presenta externamente indicios de degradación (Casado *et al.*, 2005).
- Permite predecir la densidad de la madera y no influyen en los resultados el contenido de humedad de la madera, al menos para el rango de humedad 8,5-12,5% (Casado *et al.*, 2005).
- Determinada la densidad de la madera mediante esta técnica, el valor obtenido puede emplearse como predictor de otras características o como primer paso para el cálculo del módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a flexión dinámica mediante técnicas como ultrasonidos o vibraciones inducidas/ondas de presión.

8.6.- DESVENTAJAS

- No figura en las técnicas de evaluación de los procesos patológicos mediante procesos no destructivos de la norma UNE 41805-8:2009 IN (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera).
- Se usa poco en España.

- El empleo de tornillos no recomendados por el fabricante, de mayores diámetros, conlleva aplicar mayor fuerza de extracción y, por tanto, dificultades de aplicación en obra. Además, en ciertos casos (madera de mobiliario, en general, madera antigua con gran contenido en duramen), puede alcanzarse la fuerza límite del servicio del extractor.
- Por sí sola, no permite predecir fiablemente ni el módulo de elasticidad ni la resistencia a flexión. Por tanto, no permite clasificar la madera según el CTE. Incluso complementándolo con la técnica de ultrasonidos y tomando como otro parámetro la velocidad de propagación de la onda no predice bien ni el MOE ni el MOR (Divós *et al.*, 1999).

9.- TÉCNICA DE TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS

9.1.- DEFINICIÓN

La termografía es una técnica de inspección no destructiva que sin necesidad de establecer un contacto directo permite obtener resultados sobre grandes áreas y con una sola medición. Se basa en los principios físicos de transmisión de calor y permite obtener a partir de la energía emitida por un objeto, en el rango de infrarrojos, la temperatura superficial del mismo (Kaplan, 1999).

Con la inspección inicial termográfica de una estructura de madera se detectan los focos de humedad y, por tanto, las zonas donde más probable es que haya problemas de pudrición y pérdidas de densidad (Balageas, 2007).

Mediante unos dispositivos ópticos, esta radiación es recogida por una cámara termográfica y transformada en señales eléctricas. Así se obtienen los llamados termogramas: mapas térmicos en los cuales cada tono de color representa la temperatura de la superficie en ese punto. Según un rango de valores se establecen las diferencias de temperaturas del objeto.



Figura 63. Cámara de Infrarrojos E6 con MSX. Fuente: FLIR Systems.

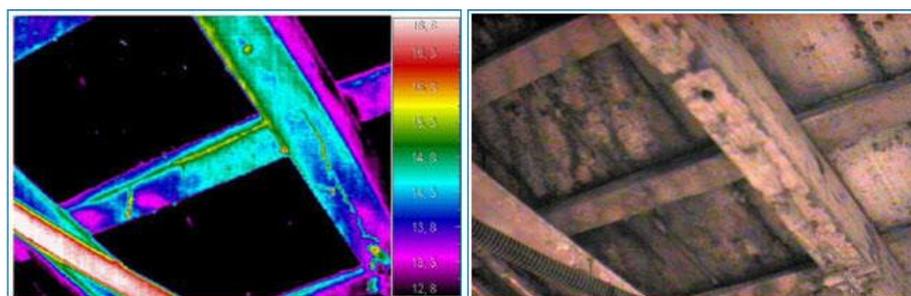


Figura 64. Figura termográfica de un techo de madera con filtración de agua. Fuente: TRATECVAl.

9.2.- FUNDAMENTOS FÍSICOS

La radiación infrarroja, que se define en física mediante la ley de Stefan-Boltzmann, es proporcional a la temperatura del cuerpo y a las propiedades térmicas propias del material como la emisividad, que depende de la longitud de onda, la temperatura y el ángulo de incidencia (Pitts and Sisson, 1998). En consecuencia, objetos con la misma temperatura superficial pueden aparecer con distintas temperaturas en un termograma si tienen distintas emisividades.

La relación entre la radiación infrarroja emitida y la temperatura de superficie viene establecida por la siguiente ecuación (Pitts and Sisson, 1998):

$$Q_{emitida} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4 \quad (W, \text{vatios})$$

Donde:

$Q_{emitida}$ Componente emitida de la radiación total que fluye desde el cuerpo.

ε Emisividad del material.

σ Constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

A_s Área de la superficie.

T_s Temperatura de la superficie.

En los objetos reales, la emisividad es inferior a 1; la radiación que fluye desde su superficie viene dada por la adición de tres componentes: la componente emitida (Q_e), la reflejada desde el entorno (Q_r) y la transmitida a través de ella (Q_t).

Como muchos objetos son opacos a la radiación infrarroja, en ese caso la radiación resultante será la suma de la componente emitida y la reflejada (Pitts and Sisson, 1998):

$$Q_{sal} = Q_{em} + Q_{ref}$$

Donde:

Q_{sal} Radiación total que fluye desde la superficie de un objeto.

Q_{em} Componente emitida de la radiación total.

Q_{ref} Componente reflejada de la radiación total.

Siendo:

$$1 = \varepsilon + \rho$$

ε Emisividad del material.

ρ Reflectividad del material.

En el caso concreto de la madera, su emisividad toma un valor aproximado de 0,90 (Rodríguez-Liñan *et al.*, 2011). Es decir, el 90% de la energía que fluye desde su superficie es energía emitida, mientras que un pequeño porcentaje es reflejado desde el ambiente. Por ello puede asegurarse que la termografía es una técnica fiable. Ahora bien, cualquier medición termográfica puede ser influida por fenómenos ambientales externos (temperatura ambiental, velocidad del viento, transmisión de la atmósfera, etc.).

Las propiedades térmicas de la madera que intervienen en una inspección con termografía son el calor específico, la conductividad térmica y la difusividad térmica (Rodríguez-Liñan *et al.*, 2011). El calor específico corresponde a la cantidad de calor necesaria para aumentar 1° C un material por unidad de masa (unidades: J/kg·°C). En la madera, el calor específico no depende de la especie de madera y de la densidad, si bien varía con el contenido de humedad.

La conductividad térmica es la cantidad de calor que pasa a través de la unidad de superficie para un cuerpo de una unidad de espesor en una unidad de tiempo (unidades: W/m·°C). La madera es un buen aislante térmico porque presenta un valor bajo de conductividad térmica (0,17 W/m·°C).

La difusividad térmica (unidades: m²/s) es obtenida de los parámetros anteriores y representa la velocidad con que se difunde el calor por un material. La madera presenta un valor de difusividad térmica baja (aproximadamente, 0,13 x 10⁻⁶ m²/s); por tanto, en su mayor parte el calor es absorbido por la propia madera y solamente un pequeño porcentaje de ese calor es conducido (Pitts and Sisson, 1998). La difusividad térmica cambia con la densidad y con el contenido de humedad.

Por todo lo dicho, la técnica de termografía permite diferenciar en principio maderas con distintas densidades y detectar zonas con distinto contenido de humedad y densidad (Rodríguez-Liñan *et al.*, 2011).

9.3.- RESULTADOS QUE PROPORCIONA

Proporciona termogramas. En el caso de la madera, los termogramas permiten diferenciar, cuando es posible, distintas especies de madera en la medida que cada una de ellas tenga un valor de densidad distinto a los de las demás. También permite

detectar defectos y degradaciones no superficiales, dependiendo de su tamaño y profundidad. En este sentido, en las variaciones de contenido de humedad, puede detectarse el tamaño y profundidad de los defectos detectables con esta técnica (Rodríguez-Liñan *et al.*, 2011).

9.4.- VALIDEZ DE LOS RESULTADOS

Según Tanaka y Divós (2000), las propiedades térmicas de la madera sana y la madera deteriorada son diferentes, debido a la diferencia de humedad entre ambas. En el caso de la madera degradada bióticamente, la humedad es mayor debido a que su estructura interna es menos densa que la de la madera en buen estado. También Wyckhuysse y Maldague (2001) y López *et al.* (2014) coinciden con lo expuesto antes.

En Wyckhuysse y Maldague (2001) se analizaron con termografía postes de madera y se llegó a la conclusión de que, debido a las grandes profundidades de los defectos, a la baja difusividad térmica de la madera y a que las propiedades de la madera dependen de la temperatura, humedad, especie y orientación de las fibras, esta técnica no es adecuada para inspeccionar postes, salvo en el caso en que los defectos estén cerca de la superficie.

En Rodríguez-Liñan *et al.*, (2011) se analizó la madera del oratorio San Felipe Neri (Cádiz) mediante termografía. Los parámetros controlados directamente desde la cámara fueron la temperatura reflejada (no la temperatura ambiente) y la emisividad de la madera.

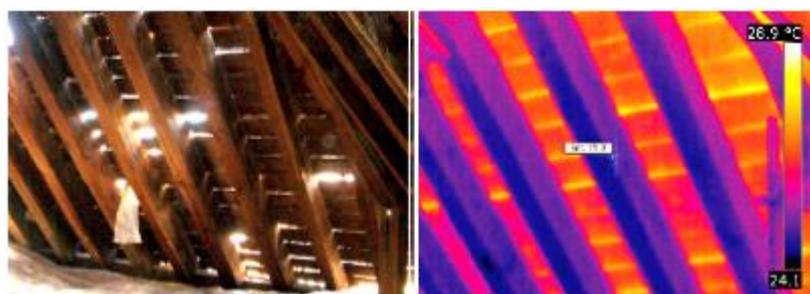


Figura 65. Termograma de parte de un estribo extraído tras un calentamiento previo. Fuente: Rodríguez-Liñan *et al.* (2011).

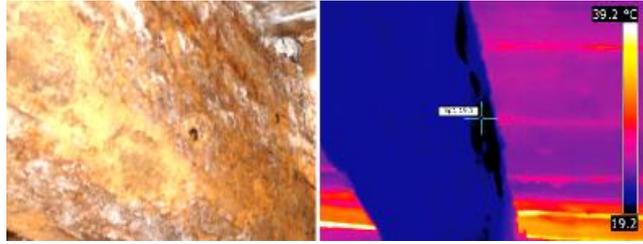


Figura 66. Termograma de vista del conjunto del interior de una cubierta desde el camaranchón donde puede distinguirse la estructura de pares y la tablazón.

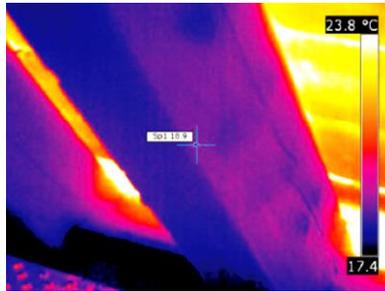


Figura 67. Termograma de la vista del par con deterioro superficial por pudrición parda. Fuente: Rodríguez-Liñan et al. (2011).

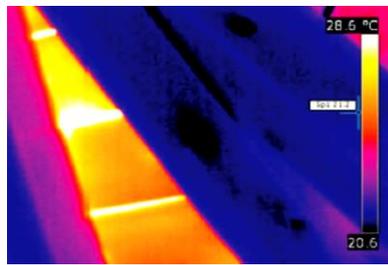


Figura 68. Termograma de la vista de un par con fenda. Fuente: Rodríguez-Liñan et al. (2011).



Figura 69. Termograma de la vista de un par con nudos. Fuente: Rodríguez-Liñan et al. (2011).

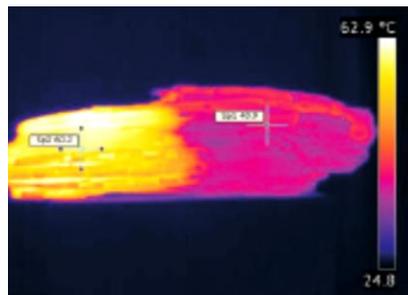


Figura 70. Termograma de la vista de par reparado con empalme de madera nueva.

Según los resultados obtenidos por Rodríguez-Liñan *et al.* (2011), puede afirmarse que usando termografía puede obtenerse información sobre varios aspectos: zonas con diferente contenido de humedad y que, en consecuencia, puedan presentar, en el momento de la inspección o en un futuro, signos de ataques por hongos xilófagos. También es posible distinguir maderas de distinta densidad (tablazón y pares y zonas con madera de reparación), zonas reparadas que presentan una discontinuidad del material, zonas con deterioro superficial (si tienen un contenido en humedad superior al propio de la madera en buen estado) y pérdida generalizada por pudrición, y presencia de fendas y nudos. Asimismo, para obtener datos más precisos sobre la pérdida de densidad por ataque de xilófagos (termitas, carcoma, hongos de pudrición) en el interior de la madera resulta preciso usar técnicas complementarias como ultrasonidos y resistografía.

9.5.- VENTAJAS

- Permite inspeccionar en una sola medición superficies amplias incluso en zonas de difícil accesibilidad.
- Los termogramas se obtienen muy rápidamente.
- En la madera, permite detectar in situ diferentes contenidos de humedad, refuerzos y distintos materiales, así como zonas con pérdidas de densidad y deterioro.

9.6.- DESVENTAJAS

- Se usa poco debido al elevado precio de los equipos de termografía infrarroja.
- La presencia de defectos en la madera influye en la conductividad del calor generando zonas de concentración o disipación de calor. Por otra parte, este tipo de discontinuidades también puede interpretarse como una diferencia de emisividad, ya que dicho parámetro depende del ángulo de incidencia. Por tanto, debe tenerse en cuenta la relevancia del tamaño del defecto y su relación con la distancia hasta la cámara y las características de ésta (sobre todo, la resolución). En ese sentido, el defecto puede resultar imperceptible a mayores distancias.
- No existe mucha experiencia documentada para usos in situ.
- La técnica es de fácil aplicación, pero se necesita personal experimentado para interpretar los termogramas.

- Se recomienda hacer las inspecciones termográficas en días sin viento, pues el viento atenúa las temperaturas superficiales de los cuerpos y las diferencias térmicas que pueda existir entre las distintas zonas por el efecto de la convección, y por lo tanto puede enmascarar los resultados reales.
- No figura en las técnicas de evaluación de los procesos patológicos mediante procesos no destructivos de la norma UNE 41805-8:2009 IN (Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera).
- No proporciona, directa o indirectamente, el módulo de elasticidad ni la resistencia a flexión. Por tanto, no permite clasificar la madera según el CTE.

10.- TÉCNICA DE INSPECCIÓN VISUAL

10.1.- DEFINICIÓN

La inspección visual es la técnica no destructiva más utilizada, y en la industria es la que permite detectar el 80% de los defectos que se presentan en los materiales (Bray y McBride, 1992). Consiste en identificar visualmente los elementos de madera con el fin de valorar su estado.

Existen normas específicas para evaluar y clasificar visualmente el estado de la madera, como las normas UNE 56544:2011 y UNE 56546:2007, y por lo general subestiman la resistencia de la madera.

Con esta técnica se consiguen valorar diferentes particularidades o características que reducen la resistencia mecánica de la madera, por un lado, se identifican las particularidades o defectos que presenta la madera, como pueden ser la presencia de singularidades como nudos, fendas, desviaciones de la fibra, etc., y por otra parte las degradaciones abióticas y bióticas que haya podido sufrir el elemento estructural de madera.

10.2.- RESULTADOS QUE PROPORCIONA

La técnica requiere de un técnico cualificado y con experiencia en madera estructural y en el campo de las degradaciones causadas por agentes abióticos y bióticos, ya que en multitud de ocasiones la apreciación visual de madera en mal estado no es sinónimo de una mala calidad en las propiedades de resistencia mecánica y viceversa.

El uso de esta técnica obtiene mejores resultados en madera antigua que presenta degradaciones tanto abióticas como bióticas, ya que en madera nueva la aplicación de normas de clasificación visual por lo general infraestima el valor real de la capacidad portante del elemento estructural.

Dado que la madera es un material biológico esta presenta lo que habitualmente se conoce como singularidades, defectos, o anomalías de la madera que provocan una disminución en la resistencia mecánica de la madera. Algunas de estas particularidades son los nudos, desviaciones en la dirección de las fibras, fendas, acebolladuras, entrecasco, gemas, bolsas de resina, anillos de crecimiento, médula, madera juvenil, madera de reacción o deformaciones.

La norma UNE 56544:2011 establece la clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural de madera de coníferas estableciendo como principios de clasificación las características generalidades de la madera, singularidades, deformaciones y alteraciones de tipo biológico que puedan presentar la madera.

Estableciendo una clasificación en cuanto a patologías bióticas producidas por organismos xilófagos se distinguen los siguientes grupos:

- Hongos xilófagos (mohos y hongos cromógenos, y hongos de pudrición).
- Insectos de ciclo larvario.
- Insectos sociales (termitas).
- Otros insectos.
- Xilófagos marinos.

Los diferentes tipos de ataques por hongos que afectan a la madera pueden ser distinguidos por la técnica de inspección visual, detectados por un color anormal de la madera, su manifestación sobre la superficie de la madera, la degradación del material o la presencia de insectos xilófagos que suelen acompañarlos (Arriaga *et al.*, 2002).

La pudrición por hongos se clasifica en pudrición parda o cúbica, pudrición blanca o fibrosa, y pudrición blanda y a su vez se puede distinguir y reconocer los diferentes tipos por su aspecto visual.

La madera afectada por pudrición parda o cúbica presenta un residuo de color marrón oscuro formado principalmente por lignina estableciendo una estructura de pequeños cubos o prismas que se disgrega con facilidad entre los dedos como si fuera polvo.

La madera afectada por pudrición blanca o fibrosa toma un color blancuzco debido al complejo celulósico resultante, apareciendo zonas con vetas blancas separadas por zonas de madera normal.

Por último, la pudrición blanda da como resultado un aspecto final blando o esponjoso, parecido al del queso fresco (Arriaga *et al.*, 2002).

Mohos y Hongos cromógenos se alimentan de las sustancias de reserva de la madera y no producen degradaciones en la pared celular, por lo que no afectan a las propiedades mecánicas (Arriaga *et al.*, 2002). La madera sufre un cambio en su coloración, y su crecimiento se detecta cuando la superficie se oscurece o cuando el cuerpo fructífero forma sobre la superficie de la madera una pelusilla transparente, con tonalidades que van desde el color blanco al negro.

Ataques producidos por insectos pueden ser identificados visualmente, diferenciando entre anóbidos, cerambícidos, líctidos, curculiónidos, bostríchidos e insectos sociales.

Los anóbidos conocidos comúnmente como carcoma fina producen orificios de salida de 3 a 5 mm de longitud con forma circular y de 1.5 a 4 mm de diámetro.

Los cerambícidos conocidos comúnmente como carcoma gruesa realizan galerías con forma ovalada según la dirección de la fibra, suelen estar taponados de serrín y presentan marcas o estrías en las paredes de las mismas. El serrín es basto, tiene forma cilíndrica y no es expulsado al exterior, ya que las galerías están cerradas por una fina película de madera (Arriaga *et al.*, 2002).



Figura 71. Ataque producido por cerambícidos. Fuente: Elaboración propia.

Visualmente se puede reconocer los ataques producidos por insectos sociales, termitas, las cuales construyen galerías paralelas a la dirección de la fibra de la madera atacada y dejan una capa fina exterior pasando desapercibidas en el interior de la madera, con un espesor de la capa de 1 a 2 mm. Entre las galerías dejan tiras de madera sin atacar, adquiriendo un aspecto de “hojas de libro”. Construyen tubos o canales de pequeño diámetro de 1 a 2 mm y de pared gruesa.



Figura 72. Ataque y presencia de termitas. Fuente: Elaboración propia.

Las particularidades o defectos que presenta la madera se pueden clasificar en:

- Nudos.
- Desviaciones en la dirección de la fibra.
- Fendas.
- Acebolladuras.
- Entrecasco.
- Gemas.
- Bolsas de resina.
- Anillos de crecimiento.
- Médula.
- Madera juvenil.
- Madera de reacción.
- Deformaciones.

La norma española UNE-EN 1310:1997 establece los métodos de medida de las singularidades para madera aserrada y madera en rollo.

Los nudos se consideran el defecto natural más común en la madera y se definen como las partes de las ramas que quedan rodeadas por la madera del tronco. La norma UNE-EN 1310:1997 clasifica los nudos según su forma, dimensiones, y posición. Se consideran varios tipos de nudos: nudo vivo o fijo, nudo muerto, negro o nudo flojo, nudo saltadizo y nudo vicioso.

La dirección de las fibras habitualmente no es siempre paralela a los cantos de las piezas y además puede ocurrir en un plano o simultáneamente en dos. La medición se realiza con instrumento denominado trazador que consiste en una manivela provista de un pomo articulado en un extremo y un clavo ligeramente inclinado en el otro.

La presencia de fendas puede ser causada por esfuerzos internos producidos durante el crecimiento del árbol al no ser capaz la madera de soportarlos. Se definen como agrietamientos longitudinales que cortan radialmente los anillos de crecimiento en una sección transversal. Según el origen de los esfuerzos se distinguen entre fendas de viento, de heladura, de insolación y de desecación.

Las acebolladuras son grietas longitudinales producidas por la separación de los anillos de crecimiento, originadas por la falta de adherencia entre capas de madera debidas a irregularidades del crecimiento del árbol.

Cuando el aserrado intercepta la superficie del troco del árbol se produce la falta de madera en las aristas de las piezas estructurales, denominándose a este fenómeno como gemas. Las bolsas de resina son cavidades entre los anillos de crecimiento que contienen resina.

Se conoce como médula a la zona situada en el interior del primer anillo de crecimiento, constituida fundamentalmente de tejido blando. Esta zona se ve envuelta de madera juvenil, ya que en los primeros años de vida del árbol las células no necesitan ser especialmente resistentes y la madera es más ligera y menos resistente, adquiriendo un carácter más nervioso y puede producir piezas alabeadas o curvadas de canto y de testa, sobre todo en piezas que contienen parte de madera madura y de juventud.

La madera de reacción se conoce como un tipo especial de madera que presenta características anatómicas diferenciadas, formada normalmente en partes de ramas y troncos inclinados o curvados sometidos a tensiones elevadas cuando el árbol intenta recuperar su posición vertical. El inconveniente radica en su anormal contracción longitudinal, causando fuertes deformaciones en las piezas.

La norma UNE 41805-8:2009 IN Diagnóstico de edificios. Parte 8: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera, recoge las técnicas convencionales a base de comprobaciones visuales, según normativas fijadas, aplicables en el ámbito del diagnóstico de madera puesta en obra.

10.3.- VENTAJAS

- Rápido, sencillo y fácil uso.
- No es excluyente, se puede utilizar en combinación con otros métodos.
- Proporciona resultados inmediatos.

10.4.- DESVENTAJAS

- Limitación al acceso de zonas no visibles.
- Superficie de inspección debe estar limpia.
- Depende fuertemente de la agudeza y experiencia visual del inspector.
- Para madera antigua, en muchos casos la valoración visual exterior guarda escasa relación con el estado interno de la madera.
- No proporciona, directa o indirectamente, el módulo de elasticidad ni la resistencia a flexión. Por tanto, no permite clasificar la madera según el CTE.

11.- TÉCNICA DE PUNZÓN

11.1.- DEFINICIÓN

La técnica permite conocer de una manera muy rápida el estado de degradación que ha sufrido la madera bajo la superficie externa. Consiste en clavar el punzón sobre la madera y valorar su estado, en función de la resistencia que ofrece la madera a la penetración.

En zonas de poco espesor sirve para conocer la profundidad del ataque. Si se ha producido algún ataque por parte de algún organismo xilófago pueden extraerse muestras haciendo palanca.

La viruta desprendida al realizar la incisión del punzón también permite valorar el estado de la madera y la identificación del tipo de ataque.

Con el mango del punzón también se puede golpear un elemento estructural detectando así zonas atacadas en el interior, al producirse un sonido hueco.

Se aconseja su uso en combinación con la inspección visual.

Una rotura brusca o quebradiza indica la madera podrida, mientras que una rotura astillada indica madera sana. Aunque la técnica es un método de inspección simple, se requiere experiencia para interpretar los resultados (Ross, 2015).

11.2.- RESULTADOS QUE PROPORCIONA

La técnica ofrece una valoración de las características resistentes de la madera al observar la fuerza necesaria para calvar el punzón. El resultado puede ser desde una penetración completa del punzón en la madera debido a una degradación o singularidad, o incidir en ella tan solo unos pocos milímetros.

El uso de esta técnica se hace más recomendable en la evaluación de madera antigua que presenta degradaciones tanto abióticas como bióticas, ya que en madera nueva no aporta una representación de la resistencia mecánica.



Figura 73. Penetración en la madera del punzón en diferente grado. Fuente: AIDIMME.

11.3.- VENTAJAS

- Fácil detección de ataque por termita, ya que al incidir con el punzón en la cara exterior de la madera se aprecia el ataque interior que ha sufrido.
- Rápido, sencillo y fácil uso.
- Alcance a puntos no visibles.

11.4.- DESVENTAJAS

- Limitación al acceso de zonas no accesibles.
- No proporciona, directa o indirectamente, el módulo de elasticidad ni la resistencia a flexión. Por tanto, no permite clasificar la madera según el CTE.

12.- BIBLIOGRAFÍA ANEXO 1

12.1.- BIBLIOGRAFÍA CITADA

- ABIÁN PÉREZ, M.A. Y ZAPATA ZAPATA R. (2007). Evaluación no destructiva de madera en pie, en rollo y aserrada. AIDIMA Informa, nº 57.
- ACUÑA, L. Y CASADO, M. (2015). Los módulos dinámicos como predictores del MOE estático. Actas de la III Jornada Iberoamericana sobre madera estructural del género *Populus*. Palencia-Valladolid, 15 al 17 de junio de 2015.
- ACUÑA, L., BASTERRA L., CASADO, M., LÓPEZ, G., RAMÓN-CUETO, G., RELEA, E., MARTÍNEZ, C. Y GONZÁLEZ, A. (2011). Aplicación del resistógrafo a la obtención de la densidad y la diferenciación de especies de madera. *Materiales de Construcción* 61(303):451-464.
- ACUÑA, L., DÍEZ, R. Y CASADO, M. (2007). La transmisión de ultrasonidos aplicada a la madera estructural. III Congreso Iberoamericano de productos forestales (IBEROMADERA). Buenos Aires, Argentina.
- AGUILERA, C.A., RAMOS, M.A., AND SAPPA, A.D. (2012). Simulated Annealing: A Novel Application of Image Processing in the Wood Area. *Simulated Annealing - Advances, Applications and Hybridizations*. INTECH Open Access Publisher.
- AICHHOLZER, A., ARTHABER, H., SCHUBERTH, C., AND MAYER, H. (2013): Non-destructive evaluation of grain angle, moisture content and density of spruce with microwaves. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(6):779-786.
- AICHHOLZER, A., SCHUBERTH, C., MAYER, H., AND ARTHABER, H. (2017). Microwave testing of moist and oven-dry wood to evaluate grain angle, density, moisture content and the dielectric constant of spruce from 8 GHz to 12 GHz. *European Journal of Wood and Wood Products*, 92(3):1-15.
- ÁLVAREZ, L., BASTERRA, A., CASADO-SANZ, M. Y ACUÑA-RELLO, L. (2005). Aplicación del resistógrafo al diagnóstico de elementos singulares en estructura de madera. Actas de las I jornadas de investigación en construcción (2-4 de junio de 2005, Madrid). Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja - CSIC.
- ARRIAGA, F., GARCÍA, L., GEBTRMEDDHIN, K.G. Y PEREZA, F. (1992). Evaluación de la capacidad portante de forjados antiguos con vigas de madera. *AITIM*, nº 161, 51-62.

- ARRIAGA, F., PERAZA, F., ESTEBAN, M., BOBADILLA, I. Y GARCÍA, F. (2002). Intervención en estructuras de madera. Rivas, AITIM, España.
- BALAGEAS, D. (2007). Termografía infrarroja: una técnica multifacética para la Evaluación No Destructiva (END). IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires. Argentina.
- BASTERRA, L.A., ACUÑA, L., CASADO, M., RAMÓN-CUETO, G. Y LÓPEZ, G. (2009). Diagnóstico y análisis de estructuras de madera mediante técnicas no destructivas: aplicación a la Plaza Mayor de Chinchón (Madrid). *Informes de la Construcción* 61(516):21-36.
- BELL, E.R., PECK, E.C., AND KRUEGER, N.T. (1954). Modulus of elasticity of wood determined by dynamic methods. U.S. Department of Agriculture. Forest Products Laboratory, Report: 1977.
- BENEDETTO, A. Y PENSA, S. (2007). Indirect diagnosis of pavement structural damages using surface GPR reflection techniques. *Journal of Applied Geophysics*, 62(2):107-123.
- BETHGE, K. MATTHECK, C. Y HUNGER, E (1996). Equipment for detection and evaluation of incipient decay in trees. *Arboricultural Journal*, 20:13-37.
- BOBADILLA-MALDONADO, I., ESTEBAN-HERRERO, M., ÍÑIGUEZ-GONZÁLEZ, G., ARRIAGA-MARTITEGUI, F., BALLARÍN-MONTESINOS, D. Y PALACIOS-MONTEAGUDO, J. (2007). Estimación de la densidad de la madera aserrada de conífera mediante técnicas no destructivas de arranque de tornillos y penetrómetro y su aplicación en la estimación del módulo de elasticidad. *Informes de la Construcción*, 59(506):107-116.
- BONAMINI, G., CECCOTTI, A, Y MONTINI, E. (1990). Indagini non distruttive per la verifica strutturale di travi di legno antico. *Atti della sezione Strutture del Dipartimento di ingegneria civile. Universita di Firenze.*
- BRANCO, J.M., PIAZZA, M., AND CRUZ, P.J.S. (2010). Structural analysis of two King-post timber trusses: Non-destructive evaluation and load-carrying tests. *Construction and Building Materials*, 24(3):371-383.
- BRAY, DON E.; MCBRIDE, DON (1992). *Nondestructive testing techniques* John Wiley & Sons, Inc., 798 p.
- BUCUR, V. (1979). Le comportement a la rupture du bois massif estudie para la methode ultrasonique dimpulsion. *Communication présentée au 4e Congres Francais de Mecanique, Nancy, 4-7 sept. 1979.*

- BUCUR, V. (2003). Ionizing radiation computed tomography. In Nondestructive characterization and imaging of wood. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlín, Alemania.
- BUCUR, V. (2003). Techniques for high resolution imaging of wood structure: a review. *Measurement Science and Technology*, 14(12):91-98.
- BUCUR, V. (2006). *Acoustics of Wood*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Alemania.
- BUTNOR, J.R., DOOLITTLE, J.A., JOHNSEN, K.H., SAMUELSON, L., STOKES, T., AND KRESS L. (2003). Utility of ground-penetrating radar as a root biomass survey tool in forest systems. *Soil Science Society of America Journal*, 67(5):1607-1615.
- BUTNOR, J.R., DOOLITTLE, J.A., KRESS, L., COHEN, S., AND JOHNSEN K.H. (2001). Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. *Tree Physiology*, 21 (17): 1269-1278.
- CAI, Z., HUNT, M., ROSS, R.J., AND SOLTIS, L.A. (2002). Screw withdrawal—a means to evaluate densities of in-situ wood members. *Proceedings, 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. Madison, WI: Forest Products Society: 277-281.
- CAPUZ, R. (2003). *Métodos de ensayo no destructivos para la estimación de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- CASADO, M., ACUÑA, L., BASTERRA, L.A., RELEA, E., LÓPEZ, G. Y RAMÓN, G. (2008). Classification of structural timber of *Pinus pinaster* Ait. using vibrations methods. II Latin American Workshop on non destructive testing of wood products. San José, Costa Rica.
- CASADO, M., ACUÑA, L., VECILLA, D., BASTERRA, A., PANDO, V. Y RELEA, E. (2011). Determinación de la capacidad resistente estructural de madera de *Pinus sylvestris* mediante PLG. *Actas del 11º Congreso Español de Ensayos No Destructivos (END)*. Gijón, 4, 5, y 6 de julio de 2007.
- CASADO, M., PINAZO, O., BASTERRA, L.A. Y ACUÑA, L. (2005). Técnicas de ensayo no destructivas en madera estructural mediante extracción de tornillos. Aplicación en viguetas de forjado de un edificio singular. *Actas del IV Congreso Nacional de Protección de la Madera*.
- CIDEMCO (Ed). Donostia-San Sebastián.

- CAVALLIA, A. AND TOGNIA, M. (2013). How to improve the on-site MOE assessment of old timber beams combining NDT and visual strength grading. *Nondestructive Testing And Evaluation* 28(3):252-262.
- CHOFFEL, D. (1999). Automation of wood mechanical grading. Coupling of vision and microwave devices. *Proceedings SPIE 3836, Machine Vision Systems for Inspection and Metrology VIII*.
- DANKO, P. (1994). Microwave method for the measurement of wood moisture content. *Drevársky Výskum*, 39(4):35-43.
- DENZLER, J.K., AND WEIDENHILLER, A. (2015). Microwave scanning as an additional grading principle for sawn timber. *European Journal of Wood and Wood Products*, 73(4):423-431.
- DIEBOLD, R., SCHLEIFER, A., AND GLOS, P. (2000). Machine grading of structural sawn timber from various softwood and hardwood species. *Proceedings of the 12th Symposium on Nondestructive Testing of Wood (Sopron: University of Western Hungary)*.
- DIVÓS, F. AND TANAKA, T. (2005). Relation between static and dynamic modulus of elasticity of wood. *Acta Silvatica and Lingaria Hungarica*, 1:105-110.
- EMERSON, R., POLLOCK, D., MCLEAN, D., FRIDLEY, K., PELLERIN, R., AND ROSS, R. (2002). Ultrasonic inspection of large bridge timbers. *Forest Products Journal*, 52(9):88-95.
- FERNÁNDEZ-ORDIZ, A., MERLO-SÁNCHEZ, E, SANTACLARA-ESTÉVEZ, O. Y GUAITA-FERNÁNDEZ, M. (2009). Los métodos sónicos y la calidad estructural de madera aserrada. Aplicación a *Pseudotsuga menziesii*. V Congreso Forestal Español, Ávila.
- FRANKE, S., AND FRANKE, B. (2014). X-Ray technology for the assessment of timber structures. COST FP 1101, Suiza.
- FREYBURGER, C., LONGUETAUD, F., MOTHE, F., CONSTANT, T., AND LEBAN J-M (2009) Measuring wood density by means of X-ray computer tomography. *Annals of Forest Science*, 66(8):804-804.
- FU, G (ED.). (2005). *Inspection and Monitoring Techniques for Bridges and Civil Structures*. Woodhead Publishing. Boca Raton, Florida, USA.
- GRAFF, KF (1975). *Wave motion in elastic solids*. Dover Publications, Inc., New York, USA.

- GRÖNLUND, A., GRUNDBERG, S., GRÖNLUND, U. (1994). The Swedish stem bank - an unique database for different silvicultural and wood properties. IUFRO S5.01-04 Workshop Proc. Hook, Suecia, 71-77.
- HAGREY, S.A. (2007) Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity. *Journal of Experimental Botany*, 58(4):839-54
- HAGREY, S.A. AND MÜLLER, C. (2000). GPR study of pore water content and salinity in sand. *Geophysical Prospecting*, 48:63-85.
- HEARMON, R.F.S. 1961. *Applied anisotropic elasticity*. Oxford University Press, Oxford, Reino Unido.
- HOFFMEYER, P. (1978). The Pilodyn instrument as a non-destructive tester of the shock resistance of wood. 4th Non-destructive Testing of Wood. Symposium, pp. 47-66. Vancouver, WA, USA.
- HRUSKA, J., CERMAK, J., AND SUSTEK, S. (1999). Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. *Tree Physiology*, 19(2):125-130.
- IÑIGUEZ, G. (2007). Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural. Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. de Ingenieros de Montes. Tesis Doctoral.
- KAESTER, A.P., AND BAATH, L. (2000). Microwave polarimetry base wood scanning. *Proceedings of the 12th Symposium on Nondestructive Testing of Wood* (Sopron: University of Western Hungary).
- KAHL, T., WIRTH, C., MUND, M., BÖHNISCH, G., AND SCHULZE, E.D. (2009). Using drill resistance to quantify the density in coarse woody debris of Norway spruce. *European Journal of Forest Research* 128(5):467-473.
- KAPLAN, H. (1999). *Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment*. SPIE Optical Engineering Press, Bellingam, Washington. USA.
- KESSEL, M.H., PLINKE, B., AGUSTIN, R., AND HUSE, M. (1998). Strength grading of construction timber with large cross sections, *Proceedings of 5th World Conference on Timber Engineering*, Montreaux, Switzerland, Aug. 1998. Vol. I:557-562.
- KHARADLY, M. (1985). Microwave diagnostics for stress-rating of dimension lumber. *Proceedings of the 5th Nondestructive Testing of Wood Symposium*, Washington State University, Pullman, WA, 445-464.

- KHARKOVSKY, S., AND R. ZOUGHI, R. (2007). Microwave and Millimeter Wave Nondestructive Testing and Evaluation - Overview and Recent Advances. IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, 10(2):26-38.
- KING, R.J., AND YEN, Y.H. (1981). Probing Amplitude, Phase, and Polarization of Microwave Field Distributions in Real Time. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 29(11):1225-1231.
- KRUGLOWA, T., KLIGER, I.R., AND SANDIN Y. (2011). On-Site X-ray Assessment of Density in Timber Structures. In Proceedings of the International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures. Lisboa, Portugal.
- KUKLÍK, P., AND DOLEJS, J. (1998). Nondestructive evaluation of structural timber. Proceedings of 5th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Switzerland, Aug. 1998. Vol. I: 692-699.
- LECHNER, T., YLVA SANDIN, Y., AND KLIGER, R. (2013). Assessment of Density in Timber Using X-Ray Equipment. International Journal of Architectural Heritage Conservation, Analysis, and Restoration, 7(4):416-433.
- LIMA, J., CARDOSO, R., TRUGHILO, P., DA CRUZ, C., AND DA SILVA, R. (2007). Use of the resistograph for Eucalyptus wood basic density and perforation resistance estimative. Scientia Forestalis 75(1):85-93.
- LÓPEZ, A., GENES, P. Y LÓPEZ, J. (2010). Evaluación no destructiva de la densidad de la madera de árboles vivos en pie de *Eucalyptus grandis* utilizando Resistógrafo. XXIV Jornadas Forestales de Entre Ríos, Nov, 2010, Concordia, Argentina.
- LÓPEZ, G., BASTERRA, L.A., RAMÓN-CUETO, G. Y DE DIEGO, A. (2014). Detection of Singularities and Subsurface Defects in Wood by Infrared Thermography. International Journal of Architectural Heritage, 8(4):517-536.
- LÓPEZ, J. A. (1995). Ajuste preliminar del Pilodyn 6J Forest para estimar densidad de la madera de *Eucalyptus grandis*. 6º Reunión de comunicaciones científicas y técnicas. UNNE.
- MACHADO, J.S., SARDINHA, R. Y CRUZ, H. (1998). Evaluation of lengthwise variation of mechanical properties by ultrasounds. Proceedings of 5 th World Conference on Timber Engoneering, Montreaux, Switzerland, Aug. 1998. Vol. 2:304-311.
- MÄKIPÄÄ, R. AND LINKOSALO, T. (2011). A non-destructive field method for measuring wood density of decaying logs.

- MANTILLA-CARRASCO, E.V. Y ROCHA-TEIXEIRA, A. (2012). Methodology for inspection of wood pathologies using ultrasonic pulses. CERNE, 18(3).
- MARIÑO, R., FERNÁNDEZ, M. Y FERNÁNDEZ, C. (2002). Análisis comparativo de la densidad de *Pinus sylvestris* L. mediante la utilización de resistógrafo. Revista CIS-Madera 9:60-70.
- MARTIN, P., COLLET, R., BARTHELEMY, P., AND ROUSSY, G. (1987). Evaluation of wood Characteristics - Internal Scanning of the Material by Microwaves. Wood Science and Technology, 21(4): 361-371.
- MAZUREK, D.F., JORDAN, S.R., PALAZZETTI, D.J., AND ROBERTSON, G.S. (1992). Damage Detectability in Bridge Structures by Vibrational Analysis. Proceedings of the Conference on Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials, May 11-13, 1992, Boulder, CO; Atkinson-Noland & Associates, Inc., 181-193.
- MERLO-SÁNCHEZ, E., ZAS-ARREGUI, R.; PIÑEIRO-VEIGAS, G. Y PEDRAS-SAAVEDRA, F. (2008) Variabilidad de parámetros de calidad de madera entre y dentro de procedencias de *Pseudotsuga menziesii*. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, 24:75-80.
- MONTÓN, J. (2012). Clasificación estructural de la madera de "Pinus radiata" D. Don procedente de Cataluña mediante métodos no destructivos y su aplicabilidad en la diagnosis estructural. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Construccions Arquitectòniques I. Tesis Doctoral.
- NOTIVOL, E., GIL, L.A. Y PARDOS, J.A. (2008). Una metodología para la estimación de la densidad de la madera de árboles en pie y de su grado variabilidad en *Pinus pinaster* Ait. Forest Systems, 1(1):41-47.
- OLIVEIRA, J.T.S., WANG, X., AND BAPTISTA, G. (2015). Assessing specific gravity of young Eucalypt plantation trees using a resistance drilling technique. Proceedings of the 19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symp. Sept, 22-25, Sao Paulo, Brazil. 574-584.
- PALAIA L. (2014). Empleo del penetrómetro para madera para el diagnóstico de la madera en servicio en edificios antiguos. Informes de la Construcción, 66(533).
- PALAIA, L., TORMO, S., LÓPEZ, V., AND MONFORT, J. (2010). NDT assessment of timber structures; Case study: Villa Ivonne, Meliana. Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XII, WIT PRESS, pp. 529-540.

- PELLERIN, R.F., DE GROOT, R.C., AND ESEITHER, G.R. (1985). Nondestructive stress wave measurements of decay and termite attack in experimental wood units. Proceedings, 5th nondestructive testing of wood symposium; 1985 September 9-11; Pullman, WA. Pullman, WA: Washington State University:319-353.
- PITTS, D. AND SISSON L. (1998). Heat transfer (2nd ed.). Schaum's Oulines. McGraw-Hill, NY. USA.
- RAYLEIGH, J. AND LINDSAY, R. (1945) The Theory of Sound. Dover Publications, Inc., Dover.
- RAZAFINDRATSIMA, S., SBARTAÏ, Z.M., AND DEMONTOUX, F. (2017). Permittivity measurement of wood material over a wide range of moisture content. Wood Science and Technology, 51(6):1421-1431.
- RINN, F. (1994). Resistographic visualization of tree-ring density variations, In International conference on tree rings, environment and humanity relationships and processes. Arizona, United State.
- RINN, F. (2012). Basics of micro-resistance drilling for timber inspection. Holztechnologie 53(3):24-29.
- RINN, F., SCHWEINGRUBER, H., AND SCHAR, E. (1996). Resistograph and x-ray density charts of wood comparative evaluation on drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. Holzforschung 50(4):303-311.
- RODRÍGUEZ-ABAD, I. (2009). Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- RODRÍGUEZ-ABAD, I., MARTÍNEZ-SALA, R., CAPUZ-LLADRÓ, R., GARCÍA-GARCÍA, F. Y DÍEZ R. (2008b). Estudio de la variación del contenido de humedad en vigas de pino gallego por medio de la técnica no destructiva del georradar. Actas de las II Jornadas de Investigación en Construcción, Madrid, España.
- RODRÍGUEZ-ABAD, I., MARTÍNEZ-SALA, R., GARCÍA-GARCÍA, F., CAPUZ-LLADRÓ, R., DÍEZ, R. Y TORT-AUSINA, I. (2007a). Use of Ground Penetrating Radar Technique for Structural Timber Grading-Comparision analysis of grading methods. Actas del 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. Near Surface Geophysics, Estambul, Turquía.
- RODRÍGUEZ-ABAD, I., MARTÍNEZ-SALA, R., GARCÍA-GARCÍA, F., CAPUZ-LLADRÓ, R. Y DÍEZ, R. (2008a). A non-destructive method for the evaluation of density and moisture content in sawn timber structures by GPR. Actas del 12th

- International Conference on Ground-Penetrating Radar, Birmingham, Reino Unido.
- RODRÍGUEZ-ABAD, I., MARTÍNEZ-SALA, R., TORT, I., GARCÍA-GARCÍA, F., DÍEZ, R. Y CAPUZ-LLADRÓ, R. (2007b). Estudio del contenido de humedad de vigas de madera de distintas especies por medio de la técnica no destructiva de georradar. Actas del IV Congreso Nacional y I Congreso Ibérico de Agroingeniería, Albacete, España.
 - RODRÍGUEZ-LIÑÁN, C., MORALES-CONDE, M.J., RUBIO DE HITTA, P. Y PÉREZ-GÁLVEZ, F. (2011). Inspección mediante técnicas no destructivas de un edificio histórico: oratorio San Felipe Neri (Cádiz). Informes de la Construcción, 63(521):13-22.
 - ROSS, R.J. (Ed.). (2015). Nondestructive evaluation of Wood (2nd edition). General Technical Report FPL-GTR-238. Madison, WI: U.S. Department of agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
 - ROSS, R.J., BRADSHAW, B.K., AND PELLERIN, R.F. (1998). Nondestructive evaluation of wood. Forest Products Journal, 48(1):14-19.
 - ROSS, R.J., GESKE, E.A., LARSON G.R., AND MURPHY, J.F. (1991). Transverse vibration nondestructive testing using a personal computer, Research Paper - Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, 1991, No. FPL-RP-502.
 - ROSS, R.J., MCDONALD, K.A., GREEN, D.W., AND SCHAD K.C. (1997). Relationship between log and lumber modulus of elasticity. Forest Products Journal, 47(2):89-92.
 - ROZEMA, P. (2007). Timber Grader MTG - Brookhuis Micro-Eletronics BV the Netherlands. The Future of Quality Control for Wood & Wood Products. Conference of COST Action E53. 17 octubre 2007, Varsovia, Polonia.
 - SANDOZ, J.L. (1989). Grading of construction timber by ultrasound. Wood Science and Technology, 23:95-108.
 - SMITH, S.M. AND MORRELL, J.J. (1986). Correcting Pilodyn measurement of Douglas fir for different moisture levels. Forest Products Journal, 36(1):45-46.
 - SOTOMAYOR CASTELLANOS, R.J., Y VILLASEÑOR AGUILAR, R.J., (2006). Comportamiento viscoelástico de la madera de Prosopis sp Madera y Bosques, vol. 12, núm. 2, otoño, 2006, pp. 3-15, Instituto de Ecología, A.C. México.
 - TALBOT, J. (1982). Unpublished research. Pullman, WA: Wood Materials and Engineering Laboratory, Washington State University. USA

- TANAKA, T. AND DIVÓS, F. (2000). Wood inspection by thermography. In Proceedings of the 12th International Symposium on Non-Destructive Testing of Wood (Sopron: University of Western Hungary).
- TOMAZELLO, M., BRAZOLIN, S., CHAGAS, M.P., OLIVEIRA, J.T.S., BALLARIN, A.W., AND BENJAMIN, C.A. (2008). Application of x-ray technique in nondestructive evaluation of eucalypt wood. *Ciencia y tecnología* 10(2):139-149.
- ULABY, F.T., AND JEDLICKA, R.P. (1984). Microwave dielectric properties of plant materials. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-22(4):406-415.
- VILLENEUVE, M., MORGENSTERN, E.K., AND SEBASTIAN, L.P. (1987). Estimation of wood density in family tests of jack pine and black spruce using the Pilodyn tester. *Canadian Journal of Forest Research*, 17:1147-1149.
- WAGNER, F.G., TAYLOR, F.W., LADD, DOUGLAS S., MCMILLIN, C.W.; RODER, AND FREDRICK L. (1989). Ultrafast CT scanning of an oak log for internal defects. *Forest Products Journal* 39(11/12):62-64.
- WANG, X., DIVÓS, F., PILON, C., BRASHAW, B.K., ROSS, R.J, AND PELLERIN, R.F. (2004). Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools. U.S. Department of Agriculture. Forest Products Laboratory, Technical Report: 147.
- WATT, M.S., GARNETT, B.T., AND WALKER J.C. (1996). The use of the Pilodyn for assessing outerwood density in New Zealand radiata pine. *Forest Products Journal*, 46(11-12):101-106.
- WEI, Q., LEBLON, B., AND LA ROCQUE, A. (2011). On the use of X-ray computed tomography for determining wood properties: a review. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(11):2120-2140.
- WILSON, J.B. (1981). Pole inspection using the Pilodyn. In: Proceedings of the 7th Wood Pole Institute. Fort Collins, Colorado. USA.
- WINANDY, J.E., LEBOW, P.K., AND NELSON, W. (1998). Predicting bending strength of fire-retardant-treated plywood from screw withdrawal tests. Res. Pap. FPL-RP-568. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. USA
- WU, S.J. (2010). Use of the Pilodyn for assessing wood properties in standing trees of *Eucalyptus* clones. *Journal of Forestry Research*, 21(1):68-72.

- WYCKHUYSE, A. AND MALDAGUE, X. (2001). A study of Wood Inspection by Infrared Thermography, Part I: Wood Pole Inspection by Infrared Thermography. *Research in Nondestructive Evaluation*, 13(1):1-12.
- YANG, T.H., WANG, S.Y., LIN, C.J., AND TSAI, M.J. (2008). Evaluation of the mechanical properties of Douglas-fir and Japanese Cedar lumber and its structural glulam by non-destructive techniques. *Construction and Building Materials*, 22:487-493.

12.2.- BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA

- BENEDETTO, A., AND PAJEWSKI, L. (Eds.). (2015). *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*. Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering. Springer International Publishing, Suiza.
- DENZLER, J.K., LUX, C., AND ARTHABER, H. (2014). Contactless moisture content and density evaluation of sawn timber using microwave transmission. *International Wood Products Journal*, 5(4): 200-206.
- DIVÓS, L., NEMETH, L., AND BEJÓ, L. (1999). Evaluation of the wooden structure of a baroque palace in Papa, Hungary. *Proc. of 11th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, 1999, pp 153-160.
- GARCÍA, F. (1997). *Aplicaciones de la técnica geofísica de prospección por georradar en glaciología e ingeniería civil*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- GUNTEKIN, E., OZKAN, S., AND YILMA, T. (2014). Prediction of bending properties for beech lumber using stress wave method. *Maderas. Ciencia y tecnología* 16(1):93-98.
- JAMES, W.L., YEN, Y.-H., AND KING, R.J. (1985). A microwave method for measuring moisture content, density, and grain angle of wood. *Forest Products Laboratory (U.S.)*. Ed. U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- MAĪ, T.C., SBARTAĪ, Z.M., BOS, F., RAZAFINDRATSIMA, S., AND DEMONTOUX, F. (2014). Non destructive evaluation of timber structures using GPR technique. *Actas del 15th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, Bruselas, Bélgica.
- RODRÍGUEZ-ABAD, I., MARTÍNEZ-SALA, R., CAPUZ-LLADRÓ, R. Y GARCÍA-GARCÍA, F. (2009a). Analysis of dielectric anisotropy in *Pinus pinaster* Ait by

- the GPR technique. Actas del 5th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, Granada, España.
- RODRÍGUEZ-ABAD, I., MARTÍNEZ-SALA, R., CAPUZ-LLADRÓ, R., GARCÍA-GARCÍA, F. Y CABRELLES, L. (2009b). Application of the Non-Destructive Ground-Penetrating Radar (GPR) Technique to the Restoration Works of a Timber Structure. Actas del I Congreso Internacional de Investigación en Edificación, Madrid, España.
 - WANG, X., ROSS, R.J., MATTSON, J.A., ERICKSON, J.R., FORSMAN, J.W., GESKE, E.A., AND WEHR, M.A. (2001). Several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small- diameter logs. U.S. Department of Agriculture. Forest Products Laboratory, Research Paper: 600.
 - ZOUGHI, R. (2012). Microwave Non-destructive Testing and Evaluation Principles. Springer Science & Business Media, Vol. 4.

ANEXO 2. MATERIAL Y EQUIPOS

ÍNDICE GENERAL

1.- MATERIAL DE ENSAYO.....	139
1.1.- ESPECIES DE MADERA PARA ENSAYOS EN VIGAS	139
1.2.- ESPECIES DE MADERA PARA ENSAYOS COMPARATIVOS DE GRÁFICAS MEDIANTE INCISIONES RESISTOGRÁFICAS	140
2.- EQUIPOS UTILIZADOS	144
2.1.- EQUIPO DE EMISIÓN-RECEPCIÓN DE ULTRASONIDOS.....	144
2.1.1.- Sylvatest TRIO	144
2.2.- EQUIPO DE VIBRACIONES INDUCIDAS	146
2.2.1.- Timber grader MTG.....	146
2.3.- EQUIPO DE RESISTOGRAFÍA	146
2.3.1.- EQUIPO DE RESISTOGRAFÍA IML-RESI PD400	146
2.4.- EQUIPO DE MEDICIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD	150
2.4.1.- Higrómetro resistivo HYDROMETTE RTU 600	150
2.4.2.- Higrómetro capacitivo GANN JT 85T	151
2.5.- BANCO DE ENSAYO	151
2.6.- MÁQUINA DE ENSAYO A FLEXIÓN.....	153
3.- EQUIPOS AUXILIARES.....	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Lote de madera de pino laricio.....	139
Figura 2. Descarga lote vigas pino silvestre.....	140
Figura 3. Lote de vigas pino carrasco y pino resinero.	140
Figura 4. Vistas generales muestra número 1_N1.....	141
Figura 5. Vistas generales muestra número 3_N1.....	142
Figura 6. Vistas generales muestra número 1_N2.....	142
Figura 7. Vistas generales muestra número 8_N3.....	142
Figura 8. Vistas generales muestra número 1_N3.....	142
Figura 9. Vistas generales muestra número 1_N4.....	143
Figura 10. Vistas generales muestra número 1_N5.	143
Figura 11. Vistas generales muestra número 1_N6.	143
Figura 12. Vista general Sylvatest Trio.	144
Figura 13. Unidad central y unidad digital de Sylvatest TRIO. 1; puerto de serie, 2; pantalla, 3; encendido / ok, 4; más, 5; escapar, 6; suplemento externo de batería, 7; menos, 8; unidad digital. 2017.....	145
Figura 14. Equipo Sylvatest TRIO. 1; transductor emisor, 2; conector de transmisión ultrasónica, 3; transductor receptor, 4; conector de recepción ultrasónica. 2017. .	145
Figura 15. Equipo Timber grader MTG.	146
Figura 16. Instrumento de perforación. 1: asideros; 2: unidad digital de registro de datos; 3: aguja perforadora.	147
Figura 17. Instrumento de perforación. 1; asideros, 2; batería, 3; unidad digital, 4; aguja perforadora.	148
Figura 18. Unidad digital. 1; botón de activación del resistógrafo/navegación por el menú, 2; pantalla digital.....	148
Figura 19. Pantalla digital. 1; texto identificativo de la calle donde se encuentra el inmueble objeto de inspección, 2; velocidad de avance del resistógrafo, 3; grados de inclinación del resistógrafo, 4; velocidad de rotación del resistógrafo.	148
Figura 20. Botones de la unidad digital.....	149
Figura 21. Punta de seguridad por la que surge la aguja perforadora.....	149
Figura 22. Higrómetro resistivo Hydromette RTU 600.....	151
Figura 23. Higrómetro capacitivo GANN JT 85T.	151
Figura 24. Conjunto equipo banco de ensayo/resistógrafo/probeta.	152
Figura 25. Detalles soportes delantero y trasero.	152
Figura 26. Banco de ensayo con sus distintas fijaciones.	153

Figura 27. Máquina de ensayo flexión Lansmont 122-15.	153
Figura 28. Componentes máquina de ensayo Landsmont.	154
Figura 29. Balanza analítica Sartorius Extend. Modelo ED124S. 2017.	155
Figura 30. Balanza PCE-WS 30.	155
Figura 31. Balanza KERN DS.	155
Figura 32. Pie de Rey digital.	156
Figura 33. Motosierra STIHL MS 210.	156
Figura 34. Taladro red eléctrica.	156
Figura 35. Zancas madera/metal para apoyo de vigas en ensayo rotura a flexión. ...	157
Figura 36. Viga metálica IPN.	157
Figura 37. Soportes metálicos ensayo a flexión.	157
Figura 38. Lijadora TOLEDO PBS-702N.	158
Figura 39. Sierra de bandas.	158

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación ensayos comparativos de las gráficas resistográficas.141

Tabla 2. Velocidades de avance equipo resistografía en función del material y especie.
.....150

Tabla 3. Velocidades de avance de la microperforación del resistógrafo. 2016. AIDIMME.
.....150

1.- MATERIAL DE ENSAYO

1.1.- ESPECIES DE MADERA PARA ENSAYOS EN VIGAS

La compra de vigas se realizó en dos lotes con procedencias distintas. Un primer lote de las especies de pino silvestre y pino laricio proceden del aserradero Maderas Cuneca, situado en Mohorte (Cuenca), y se componen por 26 vigas de cada especie con unas dimensiones nominales de 180 x 4000 x 80mm, mientras que un segundo lote de pino carrasco y pino resinero se compone de 15 vigas de cada especie, y proceden del aserradero Requetal Aserradero, situado en Requena (Valencia), con unas dimensiones de 180 x 4000 x 80mm.

Las muestras para la realización de los ensayos con técnicas no destructivas y rotura en ensayo a flexión se componen por un total de 61 vigas, del género *Pinus*, concretamente 16 unidades de las especies *Pinus halepensis* Mill. (pino carrasco), 15 unidades de *Pinus nigra* Arnold subsp. *nigra*. (pino laricio), 15 unidades de *Pinus pinaster* Ait. Ssp. *Mesogeensis* Fieschi & Gaussen (pino resinero) y 15 unidades de *Pinus sylvestris* L. (pino silvestre), estableciéndose una muestra total de 61 vigas.

Los ensayos realizados para la justificación de las pruebas realizadas en la máquina de flexión se realizaron con dos vigas de pino silvestre y dos vigas de pino laricio, sobrantes del primer lote compuesto por 26 vigas de cada especie.



Figura 1. Lote de madera de pino laricio. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Descarga lote vigas pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Lote de vigas pino carrasco y pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

1.2.- ESPECIES DE MADERA PARA ENSAYOS COMPARATIVOS DE GRÁFICAS MEDIANTE INCISIONES RESISTOGRÁFICAS

Las muestras fueron extraídas de 6 vigas del laboratorio de AIDIMME que presentaban cada una diferentes anomalías o degradaciones. De cada viga se extrajeron 10 muestras, que se numeraron de la 1 a la 10. Posteriormente de cada uno de los lotes de 10 muestras se escogieron las que presentaban las anomalías o degradaciones requeridas para la realización de los diferentes tipos de ensayos, debido a esto los números de las muestras no son correlativos.

Estas muestras para la realización de la comparación entre los tipos de gráficas *feed force* y *drill resistance* se clasifican en diferentes grupos, en función de la tipología del defecto o degradación objeto de estudio. Las muestras seleccionadas varían de especies, tamaño, tipología y defectos.

Cada ensayo se realiza con una o dos muestras que se codifican con un número y siglas de cada ensayo al que pertenecen, aplicando a cada muestra una o dos incisiones con el equipo de resistografía.

Todas las muestras en el momento de la realización de los ensayos contienen un porcentaje de humedad entorno al 12%.

Las muestras se componen por las especies *Pinus sylvestris* L (pino silvestre), *Pinus nigra* J.F. Arnold. Subsp. *Salzmannii*, *Pinus halepensis* Mill. (pino carrasco), *Pinus radiata* D.Don. (pino radiata), *Picea abies* L. (abeto) y la especie conocida como Mobila, donde debe ese nombre a que se traía importada desde el puerto de la bahía de

Mobile, y proviene de 4 especies (*Pinus palustris* Mill., *Pinus tadea* L., *Pinus elliottii* Engelm., *Pinus echinata* Mill.).

En la tabla 1 se esquematizan los diferentes tipos de muestras.

Ensayo	Tipología	N.º de muestra	N.º de incisión	Dimensiones (mm)	Especie
Nº1	Albura/Médula/Duramen	1_N1	1	263x80x178	Pino silvestre
			2		
		3_N1	3	178x80x235	
Nº2	Carcoma fina	1_N2	4	254x225x94	Mobila
			5		
Nº3	Nudos	8_N3	6	233x170x85	Pino laricio
			7		
		1_N3	8	175x80x141	
Nº4	Fendas	1_N4	9	180x74x150	Abeto
Nº5	Anillos	1_N5	10	380x85x170	Pino radiata
Nº6	Carcoma gruesa	1_N6	11	15x15x78	Pino carrasco
			12		

Tabla 1. Clasificación ensayos comparativos de las gráficas resistográficas. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se representan las siguientes figuras de vistas generales de cada uno de los ensayos:

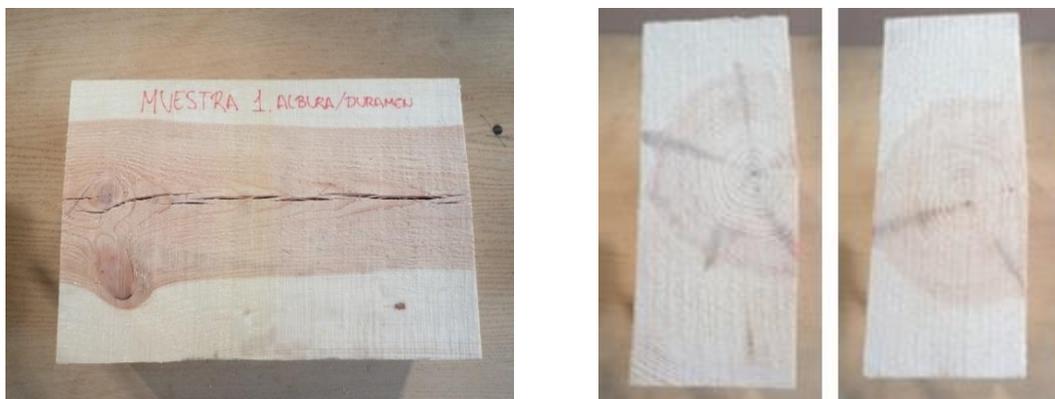


Figura 4. Vistas generales muestra número 1_N1. Fuente: Elaboración propia.

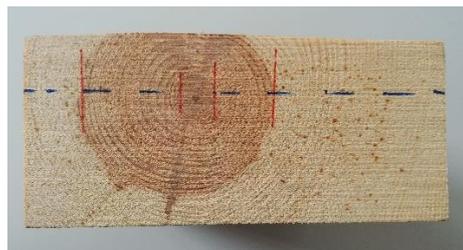


Figura 5. Vistas generales muestra número 3_N1. Fuente: Elaboración propia.

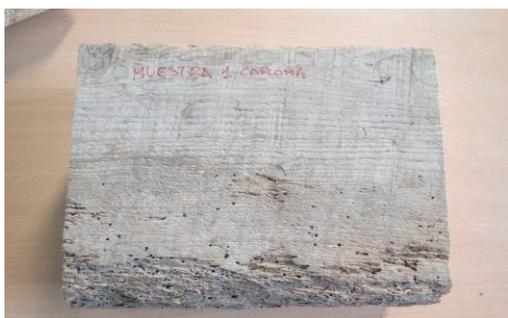


Figura 6. Vistas generales muestra número 1_N2. Fuente: Elaboración propia.



Figura 7. Vistas generales muestra número 8_N3. Fuente: Elaboración propia.



Figura 8. Vistas generales muestra número 1_N3. Fuente: Elaboración propia.



Figura 9. Vistas generales muestra número 1_N4. Fuente: Elaboración propia.

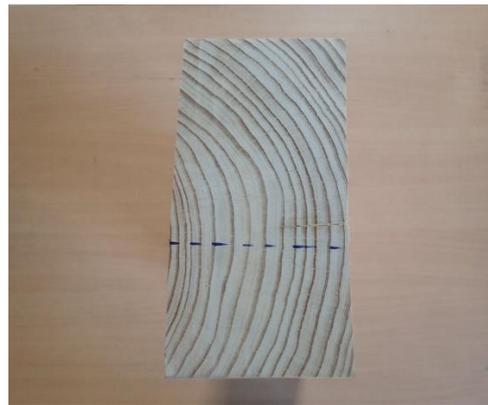


Figura 10. Vistas generales muestra número 1_N5. Fuente: Elaboración propia.



Figura 11. Vistas generales muestra número 1_N6. Fuente: Elaboración propia.

2.- EQUIPOS UTILIZADOS

2.1.- EQUIPO DE EMISIÓN-RECEPCIÓN DE ULTRASONIDOS

2.1.1.- SYLVATEST TRIO

El equipo se compone de dos transductores piezoeléctricos de punta cónica, uno emisor y otro receptor, conectados mediante cables a una unidad digital alimentada por cuatro pilas tipo AA. Desde esta unidad se seleccionan las diferentes opciones y se muestra los resultados, también alberga una unidad central.

Su principio de funcionamiento se fundamenta en ondas de ultrasonidos (ver ANEXO 1. FICHAS TND, apartado 5.2 *Fundamentos físicos*).

Sylvatest TRIO proporciona el módulo de elasticidad global dinámico y la resistencia a la flexión axial, así como su clase resistente en cuanto al CTE. Los datos recabados por la unidad digital son el tiempo de transmisión (μs) de 6 impulsos espaciados 1 segundo entre medidas, y la media del pico de energía de 5 impulsos (mV).



Figura 12. Vista general Sylvatest Trio. Fuente: Elaboración propia.

Con el equipo se pueden realizar todo tipo de medidas, tanto directas, indirectas como semidirectas, siempre y cuando los elementos sean accesibles.

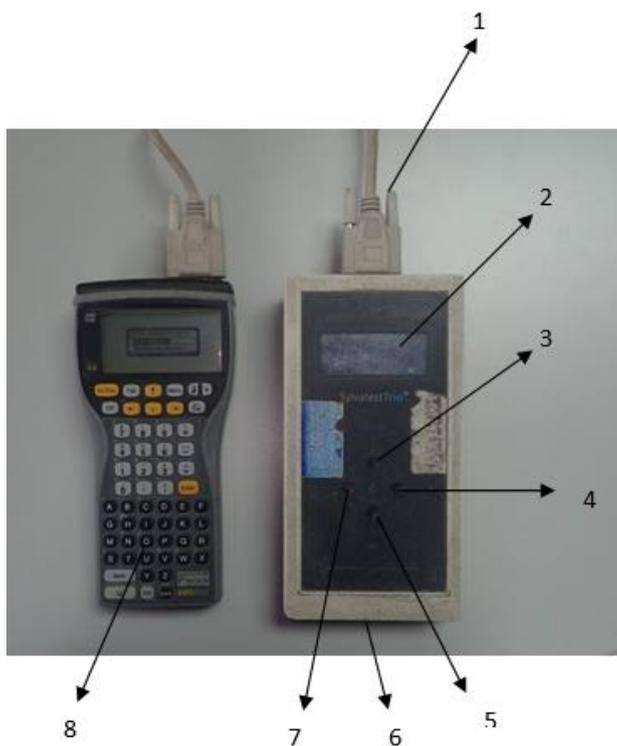


Figura 13. Unidad central y unidad digital de Sylvatest TRIO. 1; puerto de serie, 2; pantalla, 3; encendido / ok, 4; más, 5; escapar, 6; suplemento externo de batería, 7; menos, 8; unidad digital. 2017. Fuente: AIDIMME.



Figura 14. Equipo Sylvatest TRIO. 1; transductor emisor, 2; conector de transmisión ultrasónica, 3; transductor receptor, 4; conector de recepción ultrasónica. 2017. Fuente AIDIMME.

2.2.- EQUIPO DE VIBRACIONES INDUCIDAS

2.2.1.- TIMBER GRADER MTG

Este equipo golpea el elemento estructural generando ondas de impacto, posteriormente calcula el tiempo que tarda la onda de presión en recorrer cierta distancia, y determina la velocidad de propagación de la onda, a partir de ésta y de la densidad del medio, se deduce el módulo de elasticidad dinámico (MOE dinámico) y el módulo de rotura o de resistencia a flexión dinámico (MOR dinámico).

Su principio de funcionamiento se fundamenta en ondas de impacto (ver ANEXO 1. FICHAS TND, apartado 6.2 *Fundamentos físicos*).

El equipo se compone de una batería instalada en su parte posterior y un puerto USB para su conexión a un ordenador.



Figura 15. Equipo Timber grader MTG. Fuente: Elaboración propia.

2.3.- EQUIPO DE RESISTOGRAFÍA

2.3.1.- EQUIPO DE RESISTOGRAFÍA IML-RESI PD400

El equipo de resistografía IML-RESI modelo PD400 es un instrumento de uso fácil, rápido y preciso para determinar zonas en madera estructural que se conservan en buen estado o que presentan degradaciones, así como a su vez proporcionar datos fiables de densidad de la madera.

El resistógrafo evalúa la resistencia que la madera opone a la penetración de una aguja de acero de 1,5 mm de diámetro y de longitud máxima de hasta 2 metros que gira a velocidad constante mientras se introduce en la madera. El valor de la resistencia del taladro se mide mediante la potencia del motor del taladro, que es proporcional a la densidad de la madera penetrada. El resultado se expresa como un porcentaje de amplitud de la resistencia a la penetración. Las unidades de la amplitud no figuran en la documentación del aparato ni en ninguna fuente bibliográfica.

Como novedad, el resistógrafo modelo IML-RESI PD400 permite además de obtener gráficas de resistencia a penetración (“*drill resistance*”) obtener gráficas de fuerza de avance (“*feed force*”), que es la fuerza necesaria para empujar la aguja dentro de la madera.

El registro de datos se realiza gráficamente a través de una memoria y una pantalla digital que reproduce los perfiles topográficos mientras se realiza el ensayo.

Características de funcionamiento, cualidades, y más características se explican en el ANEXO 1 FICHAS TND, apartado 3 *técnica de resistografía*).

El resistógrafo consta de tres partes diferenciadas: un instrumento de perforación, una unidad digital y una batería. Estas dos últimas partes están integradas en el instrumento de perforación, por tanto, se dispone, en un mismo elemento, de todo lo necesario para perforar y evaluar al mismo tiempo la pieza en cuestión. El instrumento de perforación, diseñado de manera ergonómica para reducir el cansancio del operario, consta de dos asideros, que junto con los botones de la unidad digital permiten controlar el proceso de perforación.

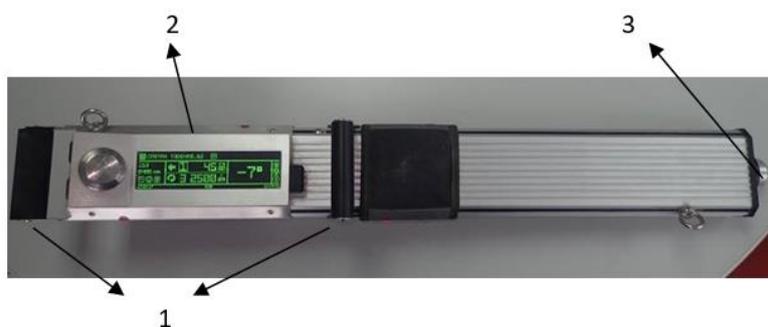


Figura 16. Instrumento de perforación. 1: asideros; 2: unidad digital de registro de datos; 3: aguja perforadora. Fuente: AIDIMME.

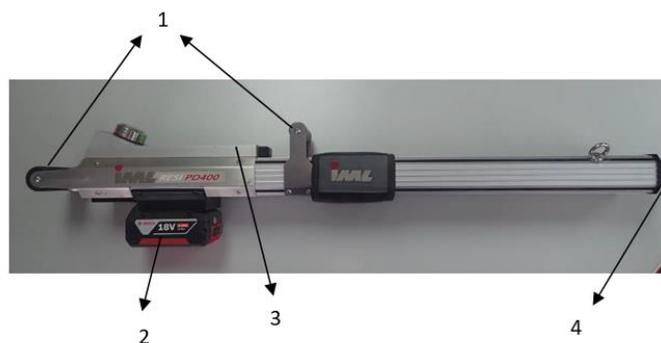


Figura 17. Instrumento de perforación. 1; asideros, 2; batería, 3; unidad digital, 4; aguja perforadora. Fuente: AIDIMME.

Los datos correspondientes a cada una de las perforaciones que se realizan se registran en una unidad digital.

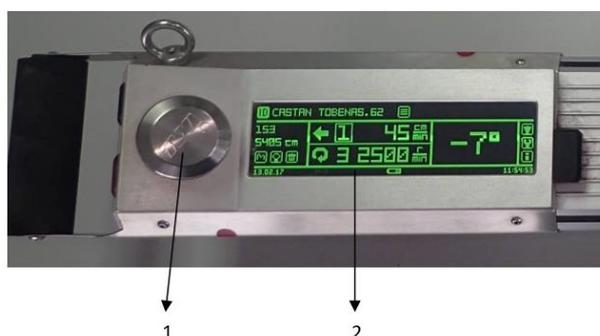


Figura 18. Unidad digital. 1; botón de activación del resistógrafo/navegación por el menú, 2; pantalla digital. Fuente: AIDIMME.

En el momento previo a la perforación se pueden visualizar los siguientes elementos en la pantalla digital.

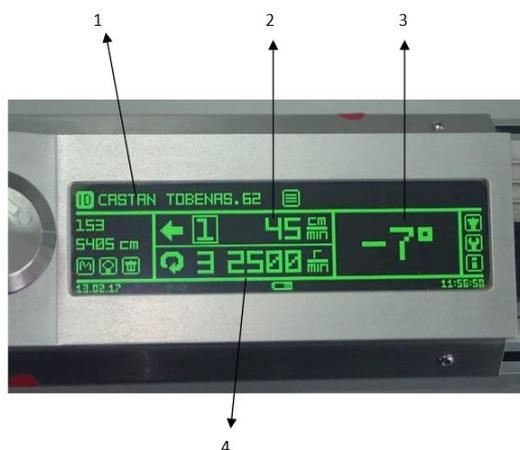


Figura 19. Pantalla digital. 1; texto identificativo de la calle donde se encuentra el inmueble objeto de inspección, 2; velocidad de avance del resistógrafo, 3; grados de inclinación del resistógrafo, 4; velocidad de rotación del resistógrafo. Fuente: AIDIMME.

Durante el proceso de perforación, se van generando los dos tipos de gráfica que se puede visualizar en la pantalla.

En uno de los laterales de la unidad digital hay dos botones. Con el botón negro se puede cambiar la velocidad de avance y rotación, así como cambiar entre diferentes resistografías. El botón rojo tiene la función de marcha y paro de la resistografía.



Figura 20. Botones de la unidad digital. Fuente: AIDIMME.

Con el objetivo de proteger el equipo este consta de una punta de perforación en la salida de la broca.



Figura 21. Punta de seguridad por la que surge la aguja perforadora. Fuente: AIDIMME.

El equipo permite establecer diferentes velocidades de avance de la broca, y es conveniente tener en cuenta la naturaleza de la madera e insertar la aguja del resistógrafo en zonas libres de nudos o fendas, ya que permite obtener una mayor fiabilidad en cuanto a la dirección de la aguja y en cuanto a la resistencia real de la madera. La tabla 2 muestra los diferentes estados de velocidad para los tipos de madera y especies.

Material	Especie	Estado
Madera dura	Carpinus sp., Quercus sp., Fagus sp., Acer sp., Platanus sp., Castanea sp.,...	1-4
Madera blanda	Abies sp., Pinus sp., Picea sp., Tilia sp., Betula sp., Aesculus sp., ...	3-6
Vigas estructurales	Quercus sp., Picea sp., Pinus sp., Abies sp., Larix sp., Thuja sp., ...	2-6

Tabla 2. Velocidades de avance equipo resistografía en función del material y especie. Fuente: Elaboración propia.

La siguiente tabla muestra las velocidades de avance correspondientes a cada estado.

Estado	Velocidad de avance (cm/min)
1	10
2	15
3	20
4	30
5	40
6	45

Tabla 3. Velocidades de avance de la microperforación del resistógrafo. 2016. AIDIMME. Fuente: Elaboración propia.

2.4.- EQUIPO DE MEDICIÓN CONTENIDO DE HUMEDAD

2.4.1.- HIGRÓMETRO RESISTIVO HYDROMETTE RTU 600

El equipo consta de dos consolas digitales, una maza o golpeador para la fijación de los electrodos, así como pinzas que comunican las consolas digitales con los electrodos mediante cables. Antes de realizar la medición se selecciona la temperatura ambiente (con un rango de -10 a 90°C) y el factor de especie.

Las mediciones se realizan conforma a la norma UNE-EN 13183:2002. El equipo mide la resistencia del paso de la corriente eléctrica por la madera que es proporcional al

contenido de humedad, recogiendo lecturas fiables hasta el punto de saturación de la fibra, realizando mediciones con escasa fiabilidad por encima de él.



Figura 22. Higrómetro resistivo Hydromette RTU 600. Fuente: Elaboración propia.

2.4.2.- HIGRÓMETRO CAPACITIVO GANN JT 85T

El equipo proporciona medidas superficiales de humedad de la madera, y se compone por una unidad digital con una zona metálica y plana en su cara inferior, que ha de estar en contacto con la madera, una pantalla digital y una ruleta para introducir el factor de especie.



Figura 23. Higrómetro capacitivo GANN JT 85T. Fuente: AIDIMME.

2.5.- BANCO DE ENSAYO

Para la realización de los ensayos en todo el conjunto de muestras utilizadas para la comparación entre los dos tipos de gráficas resistográficas se diseñó y montó un banco de ensayo acorde a las características de las muestras, así como del propio equipo de resistografía, con la finalidad de que las muestras y el resistógrafo se mantuvieran inmóviles en todo el periodo de duración del ensayo, corrigiendo posibles errores producidos por desviaciones de la broca al incidir en la madera por las diferentes singularidades y defectos.



Figura 24. Conjunto equipo banco de ensayo/resistógrafo/probeta. Fuente: Elaboración propia.

El banco está compuesto por un tablero de madera de dimensiones 45 x 3.5 x 118 centímetros y como elemento de anclaje de banco/probeta y banco/resistógrafo se utilizan varillas roscadas de 12mm de diámetro, con soportes metálicos planos y enganches tipo “L” (figura 24).

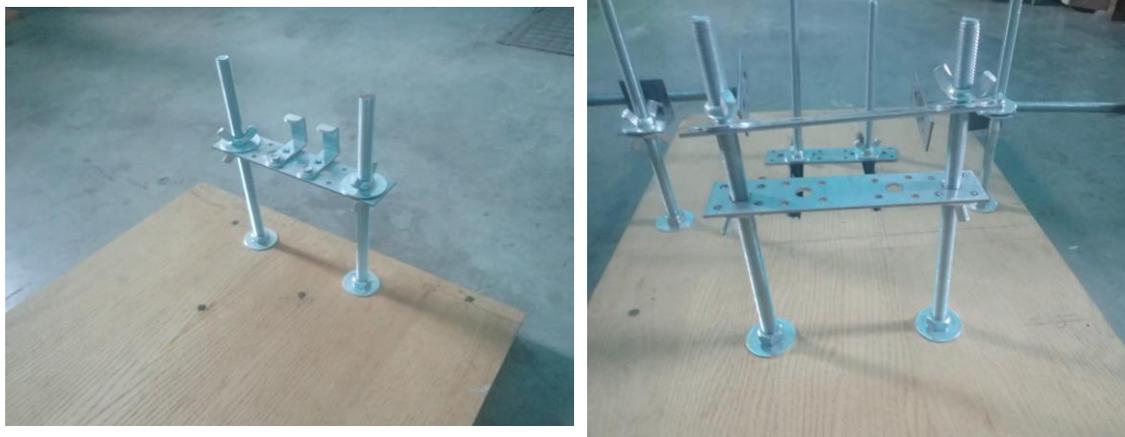


Figura 25. Detalles soportes delantero y trasero. Fuente: Elaboración propia.

Los elementos que componen el banco se pueden dividir en fijaciones para el equipo de resistografía y fijaciones para las muestras, denominando soporte delantero y soporte trasero para el soporte del equipo y manetas de apriete y fijador trasero con sus correspondientes guías como elementos de fijación de las muestras (figura 25).

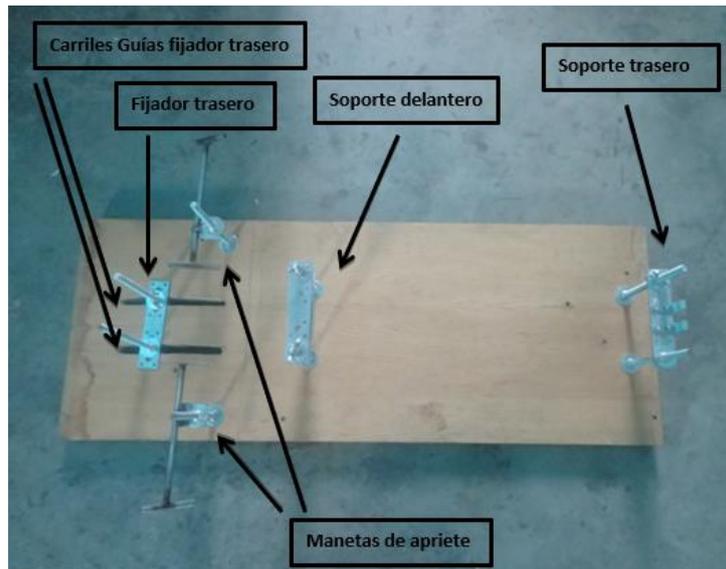


Figura 26. Banco de ensayo con sus distintas fijaciones. Fuente: Elaboración propia.

2.6.- MÁQUINA DE ENSAYO A FLEXIÓN

La máquina para el desarrollo de los ensayos de resistencia a flexión axial y módulo de elasticidad global sobre las vigas se realiza con la máquina de compresión Landsmont modelo 122-15.



Figura 27. Máquina de ensayo flexión Lansmont 122-15. Fuente: Elaboración propia.

El modelo 122-15 es una máquina de compresión servo-hidráulico diseñada para evaluar la resistencia a la compresión de contenedores de envío individuales, así como de palets, cargas unitarias y contenedores de gran volumen.

Para la realización de los ensayos se realizan unos ajustes mediante la colocación de una barra metálica y unos apoyos metálicos con el fin de repartir las cargas sobre las vigas (figura 27), de esta forma poder transmitir un esfuerzo de flexión en la viga.

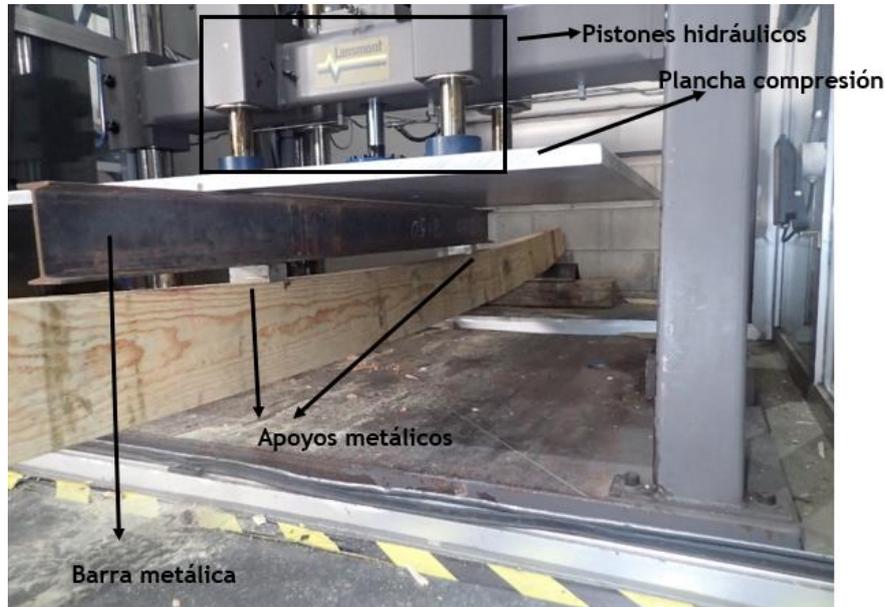


Figura 28. Componentes máquina de ensayo Landsmont. Fuente: Elaboración propia.

El modelo 122-15 utiliza el controlador TouchTest Compression 3 de Lansmont, que admite perfiles de carga y deflexión definidos por el usuario, y permite la exportación de datos en formato Excel.

Aspectos destacados de la especificación del producto son:

- Fuerza máxima: 66.7 kN
- Tamaño de la platina: 122 cm x 122 cm
- Apertura máxima: 198 cm

3.- EQUIPOS AUXILIARES

En el desarrollo de todos los ensayos se han utilizado los siguientes equipos auxiliares:

- Flexómetros.
- Balanza analítica Sartorius Extend. Modelo ED124S.



Figura 29. Balanza analítica Sartorius Extend. Modelo ED124S. 2017. Fuente: AIDIMME.

- Bascula de pesaje modelo PCE-WS 30.



Figura 30. Bascula PCE-WS 30. Fuente: Elaboración propia.

- Bascula de pesaje modelo KERN DS.



Figura 31. Bascula KERN DS. Fuente: Elaboración propia.

- Regla milimetrada metálica para la medición del diámetro de nudos.

- Pie de rey digital Alpha Tools.



Figura 32. Pie de Rey digital. Fuente: AIDIMME.

- Motosierra STIHL MS 210 para el aserrado de vigas una vez se han ensayado a flexión y extracción de rebanada según UNE-EN 408:2011+A1.



Figura 33. Motosierra STIHL MS 210. Fuente: Elaboración propia.

- Carro metálico para el transporte de vigas hasta máquina de ensayo.
- Transpaleta manual utilizada para el transporte y manipulación de vigas.
- Carretilla elevadora de dos horquillas utilizada para la descarga, transporte y manipulación de vigas.
- Taladro de alimentación a red eléctrica.



Figura 34. Taladro red eléctrica. Fuente: Elaboración propia.

- Fotocopiadora/scanner utilizado para el escaneado de muestras de madera y su posterior cálculo de % albura/duramen.
- Zancas madera/metal para apoyo de vigas en ensayo de rotura a flexión.



Figura 35. Zancas madera/metal para apoyo de vigas en ensayo rotura a flexión. Fuente: Elaboración propia.

- Viga metálica perfil metálico IPN 120mm utilizado para la transmisión de fuerzas en máquina de ensayo a flexión.



Figura 36. Viga metálica IPN. Fuente: Elaboración propia.

- Soportes metálicos utilizados como apoyos para la transmisión de fuerzas entre viga metálica y viga de madera.



Figura 37. Soportes metálicos ensayo a flexión. Fuente: Elaboración propia.

- Cámara fotográfica modelo Olympus TG5.
- Lápices de cera para marcaje de vigas.
- Brocas cónicas para la realización de incisiones donde colocar los sensores cónicos de ultrasonidos.
- Alargaderas eléctricas.

- Lijadora Toledo PBS-702N para el cepillado y eliminación de irregularidades en ambas caras de la rebanada extraída.



Figura 38. Lijadora TOLEDO PBS-702N. Fuente: Elaboración propia.

- Sierra de bandas para el ajuste de la sección de las rebanadas.



Figura 39. Sierra de bandas. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 3. METODOLOGÍA SOBRE MUESTRAS PARA ENSAYOS COMPARATIVOS DE GRÁFICAS RESISTOGRÁFICAS

ÍNDICE GENERAL

1.- PLANTEAMIENTO GENERAL.....	163
2.- ENSAYOS RESISTOGRÁFICOS	165
2.1.- ALBURA/MÉDULA/DURAMEN.....	165
2.1.1.- MUESTRA 1_N1	165
2.1.1.1.- Incisión número 1.....	165
2.1.1.2.- Incisión número 2.....	166
2.1.1.3.- Escaneado.....	166
2.1.2.- MUESTRA 3_N1	167
2.1.2.1.- Incisión número 3.....	167
2.1.2.2.- Escaneado.....	167
2.2.- CARCOMA FINA	168
2.2.1.- MUESTRA 1_N2	168
2.2.1.1.-Incisión número 4	168
2.2.1.2.- Incisión número 5.....	168
2.2.1.3.- Preparación y escaneado.....	169
2.3.- NUDOS	171
2.3.1.- MUESTRA 8_N3	171
2.3.1.2.- Incisión número 7.....	171
2.3.1.3.- Escaneado.....	172
2.3.2.- MUESTRA 1_N3	172
2.3.2.1.- Incisión número 8.....	172
2.3.2.2.- Escaneado.....	173
2.4.- FENDAS	174
2.4.1.- MUESTRA 1_N4	174
2.4.1.1.- Incisión número 9.....	174
2.4.1.2.- Escaneado.....	174
2.5.- ANILLOS.....	175

2.5.1.- MUESTRA 1_N5	175
2.5.1.1.- Incisión numero 10	175
2.5.1.2.- Escaneado.....	175
2.6.- CARCOMA GRUESA	176
2.6.1.- MUESTRA 1_N6	176
2.6.1.1.- Incisión numero 11	176
2.6.1.2.- Preparación y escaneado	176

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Broca resistográfica en el interior de la probeta.	164
Figura 2. Punto de incisión nº1 y recorrido de la broca.	165
Figura 3. Detalle salida broca incisión nº1 albura/médula/duramen.	166
Figura 4. Punto de incisión nº2 y recorrido de la broca.	166
Figura 5. Visualización digital muestra 1_N1 albura/médula/duramen.	167
Figura 6. Punto de incisión nº3 y recorrido de la broca.	167
Figura 7. Visualización digital muestra 3_N1 albura/médula/duramen.	168
Figura 8. Punto de incisión nº4 y recorrido de la broca.	168
Figura 9. Punto de incisión nº5 y recorrido de la broca.	169
Figura 10. Corte muestra 3_N2 incisión nº4 y recorrido de la broca.	169
Figura 11. Corte muestra 3_N2 incisión nº5 y recorrido de la broca.	170
Figura 12. Visualización digital muestra 1, incisión nº4 tipología carcoma fina.	170
Figura 13. Visualización digital muestra 1, incisión nº5 tipología carcoma fina.	170
Figura 14. Vista general incisión nº6.	171
Figura 15. Vista general incisión nº7 nudo dos.	171
Figura 16. Visualización digital muestra 8 incisión nº6 nudo 1.	172
Figura 17. Visualización digital muestra 8 incisión nº7 nudo 2.	172
Figura 18. Vista general incisión nº8.	173
Figura 19. Visualización digital muestra 1 nudos incisión nº8.	173
Figura 20. Punto de incisión nº9 y recorrido de la broca.	174
Figura 21. Visualización digital muestra 1_N4, tipología fendas.	174
Figura 22. Punto de incisión nº10 y recorrido de la broca.	175
Figura 23. Visualización digital muestra 1 anillos.	175
Figura 24. Vista general incisión nº11 carcoma gruesa.	176
Figura 25. Corte muestra 3_N2 incisión nº5 y recorrido de la broca.	177
Figura 26. Visualización digital muestra 1, incisión nº11 tipología carcoma gruesa.	177

1.- PLANTEAMIENTO GENERAL

La metodología a realizar para poder establecer una comparativa entre la gráfica resistográfica “*drill resistance*” y la gráfica “*feed force*” se aplica sobre las muestras de la tabla 1:

Ensayo	Tipología	N.º de muestra	N.º de incisión	Dimensiones (mm)	Especie
Nº1	Albura/Médula/Duramen	1_N1	1	263x80x178	Pino silvestre
			2		
		3_N1	3	178x80x235	
Nº2	Carcoma fina	1_N2	4	254x225x94	Mobila
			5		
Nº3	Nudos	8_N3	6	233x170x85	Pino laricio
			7		
		1_N3	8	175x80x141	
Nº4	Fendas	1_N4	9	180x74x150	Abeto
Nº5	Anillos	1_N5	10	380x85x170	Pino radiata
Nº6	Carcoma gruesa	1_N6	11	15x15x78	Pino carrasco
			12		

Tabla 1. Clasificación ensayos comparativos de las gráficas resistográficas. Fuente: Elaboración propia.

Las muestras son colocadas en el banco de ensayo para proceder a las resistografías sobre las singularidades y degradaciones establecidas. Estas son posicionadas junto con el resistógrafo de manera que todo el conjunto resistógrafo-muestra permanece inmóvil, consiguiendo así que la incisión se realice con la orientación prefijada y sin movimientos que puedan desviar la broca de dirección, de esta forma los datos proporcionados por el resistógrafo son fiables y se tiene certeza de que se atraviesan los defectos considerados.

El avance de la broca se detiene en el momento que la broca recorre toda la sección de la muestra, una vez esta sale por la parte de atrás de la muestra.

Todas las resistografías se realizan con una velocidad de rotación de 2500 revoluciones por minuto y una velocidad de avance de 45 cm/min.

Las particularidades que atraviesa la broca al incidir sobre la parte media de las muestras coinciden con las particularidades visibles en las testas de las probetas, salvo

para las muestras de carcoma fina y carcoma gruesa, ya que los ataques de estos insectos tienen características particulares y realizan galerías en el interior de las piezas sin seguir ninguna dirección establecida ni con un patrón prefijado. En el ANEXO 1.FICHAS TND, apartado 10.2 *resultados que proporciona*, se explican los daños producidos por carcomas.

Debido a esta particularidad, en las muestras de carcoma fina y gruesa se procede al escaneado y visualización digital con un procedimiento posterior de preparación de la muestra. Este consiste en extraer la broca del resistógrafo una vez se ha realizado la resistografía y dejarla en el interior de la pieza, tal como se observa en la figura 1. Posteriormente se realiza un corte en la muestra a la altura de la broca con la sierra de bandas, de manera que la broca hace de guía de la sierra.



Figura 1. Broca resistográfica en el interior de la probeta. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se observa el recorrido que la broca ha realizado en la muestra y las particularidades (en estos casos orificios de carcoma) que ha ido atravesando, de esta forma se puede establecer una comparativa exacta de las gráficas con las imágenes de las secciones escaneadas.

2.- ENSAYOS RESISTOGRÁFICOS

2.1.- ALBURA/MÉDULA/DURAMEN

Este ensayo se compone de la muestra uno y la muestra tres con el objetivo de obtener graficas resistográficas que atraviesen madera de albura, duramen y médula.

2.1.1.- MUESTRA 1_N1

En esta muestra se realizan dos incisiones o resistografías, una primera que alcanza zona de albura, duramen y médula y otra sin incidir en médula, solo albura y duramen.

2.1.1.1- Incisión número 1

La muestra se coloca en el soporte del banco de ensayo y se ajusta el resistógrafo para hacer incidir el punto de la broca en las marcas realizadas en la pieza, de esta forma la broca atraviesa primeramente la zona de albura seguidamente la zona de duramen hasta llegar a la médula y posteriormente seguir en zona de duramen, por último, de nuevo la zona de albura.



Figura 2. Punto de incisión nº1 y recorrido de la broca. Fuente: Elaboración propia.

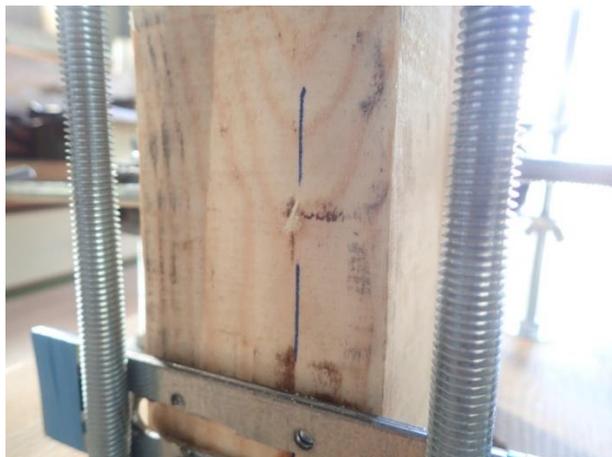


Figura 3. Detalle salida broca incisión n°1 albura/médula/duramen. Fuente: Elaboración propia.

2.1.1.2.- Incisión número 2

Se coloca la muestra en el banco de ensayo haciendo incidir la punta del resistógrafo en la zona lateral a la primera incisión de manera que la broca atravesase zona de albura, duramen y por último albura, de forma que esta incisión no atraviesa zona de medula ni madera juvenil.



Figura 4. Punto de incisión n°2 y recorrido de la broca. Fuente: Elaboración propia.

2.1.1.3.- Escaneado

La muestra 1_N1 se escanea para poder conseguir un análisis posterior y realizar una comparativa cualitativa de los perfiles resistográficos.

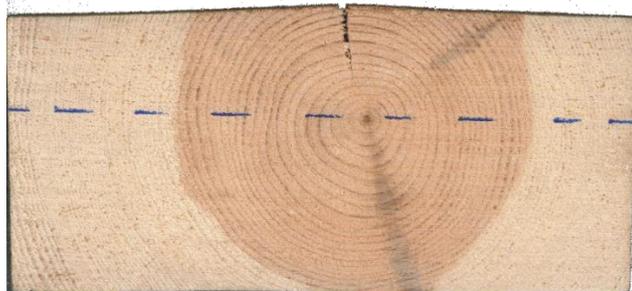


Figura 5. Visualización digital muestra 1_N1 albura/médula/duramen. Fuente: Elaboración propia.

2.1.2.- MUESTRA 3_N1

En esta muestra se realiza una única incisión.

2.1.2.1.- Incisión número 3

En esta muestra se incide de manera que la broca del resistógrafo atraviese primeramente la zona de albura seguido del duramen y médula, para posteriormente terminar atravesando nuevamente duramen y albura.

El equipo resistógrafo y probeta se fijan de manera que la broca atraviese la línea marcada en la probeta.



Figura 6. Punto de incisión nº3 y recorrido de la broca. Fuente: Elaboración propia.

2.1.2.2.- Escaneado

La muestra tres se escanea para poder conseguir un análisis posterior y realizar una comparativa cualitativa de los perfiles resistográficos.

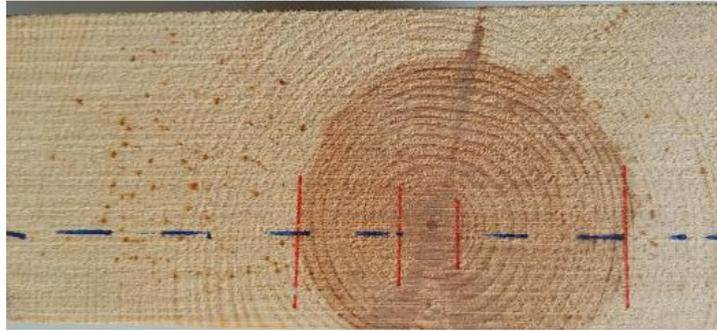


Figura 7. Visualización digital muestra 3_N1 albura/médula/duramen. Fuente: Elaboración propia.

2.2.- CARCOMA FINA

2.2.1.- MUESTRA 1_N2

En la muestra uno se realizan dos incisiones, la incisión número 4 y 5.

2.2.1.1.-Incisión número 4

Se realiza de manera transversal al lado de mayor longitud de la probeta.

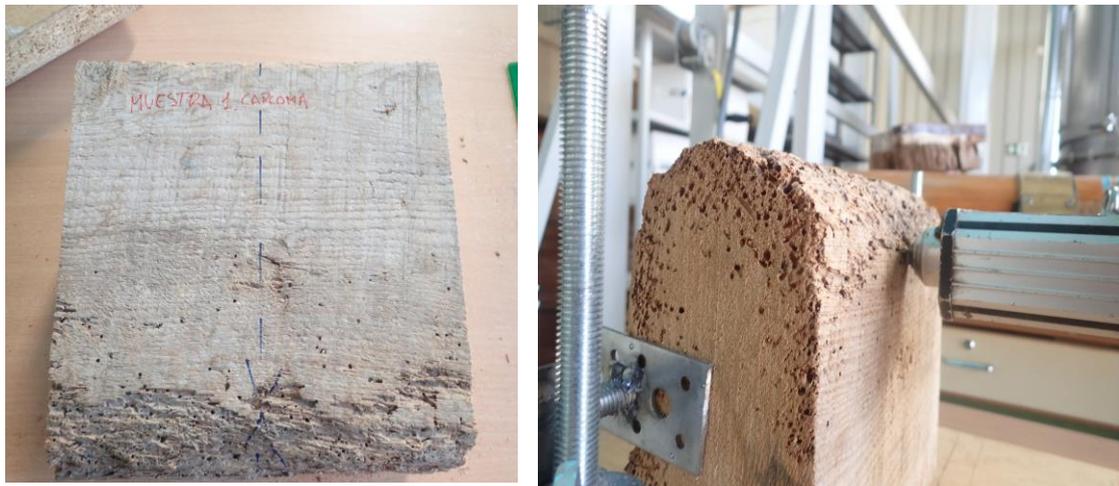


Figura 8. Punto de incisión nº4 y recorrido de la broca. Fuente: Elaboración propia.

2.2.1.2.- Incisión número 5

Se realiza en la zona degradada por carcoma fina de forma paralela al lado de mayor longitud de la probeta (figura 7).



Figura 9. Punto de incisión nº5 y recorrido de la broca. Fuente: Elaboración propia.

2.2.1.3.- Preparación y escaneado

Con el fin de poder determinar de una manera más eficaz una comparativa cualitativa (visual) entre los dos tipos de gráficas resistográficas se procede a realizar un corte de la muestra exactamente por el recorrido que ha realizado la broca.

Para ello se realiza la resistografía en la pieza y a la salida de la punta de la broca se extrae esta del equipo de resistografía quedando suelta en el interior de la pieza.

Una vez la broca se encuentra en el interior se procede al aserrado de la probeta, ejerciendo la broca que se encuentra en el interior de guía del corte de la sierra, tal como se muestra en la figura 8.



Figura 10. Corte muestra 3_N2 incisión nº4 y recorrido de la broca. Fuente: Elaboración propia.



Figura 11. Corte muestra 3_N2 incisión n°5 y recorrido de la broca. Fuente: Elaboración propia.

De esta forma se consigue que en el posterior escaneo de la muestra se aprecie el recorrido de la broca.

Finalmente son escaneadas para poder conseguir un análisis posterior y realizar una comparativa cualitativa de los perfiles resistográficos.



Figura 12. Visualización digital muestra 1, incisiónn°4 tipología carcoma fina. Fuente: Elaboración propia.



Figura 13. Visualización digital muestra 1, incisiónn°5 tipología carcoma fina. Fuente: Elaboración propia.

2.3.- NUDOS

2.3.1.- MUESTRA 8_N3

En esta muestra se realiza la incisión número 6 (en el nudo uno) y 7 (en el nudo dos).

2.3.1.1.- Incisión numero 6

En esta muestra se incide de manera que la broca del resistógrafo atraviese el nudo número uno. El equipo resistógrafo y probeta se fijan de manera que la broca atraviese la línea marcada en la probeta.

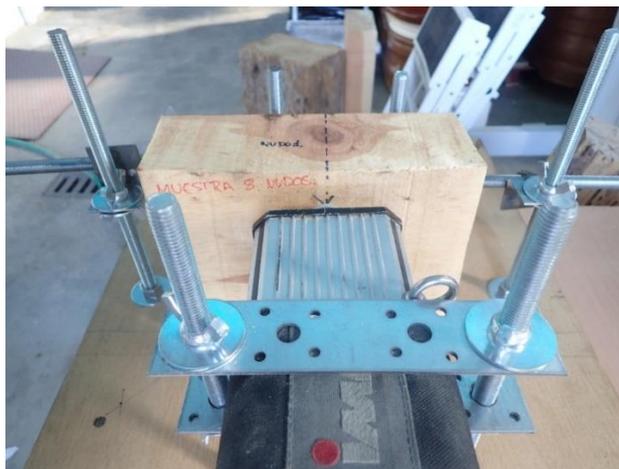


Figura 14. Vista general incisión n°6. Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.2.- Incisión número 7

En esta muestra se incide de manera que la broca del resistógrafo atraviese el nudo número dos. El equipo resistógrafo y probeta se fijan de manera que la broca atraviese la línea marcada en la probeta.



Figura 15. Vista general incisión n°7 nudo dos. Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.3.- Escaneado

La muestra ocho se escanea dos veces para poder conseguir un análisis posterior y realizar una comparativa cualitativa de los perfiles resistográficos del nudo uno y del nudo dos.



Figura 16. Visualización digital muestra 8 incisión n°6 nudo 1. Fuente: Elaboración propia.

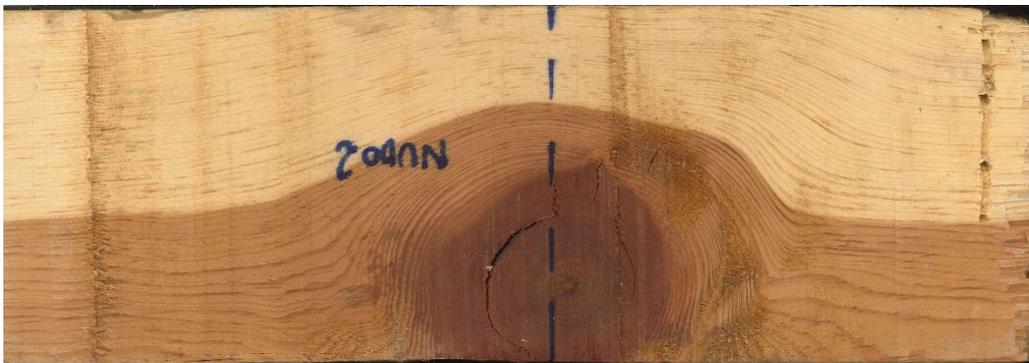


Figura 17. Visualización digital muestra 8 incisión n°7 nudo 2. Fuente: Elaboración propia.

2.3.2.- MUESTRA 1_N3

En esta muestra se realiza la incisión número ocho, atravesando un pequeño nudo que contiene en el interior.

2.3.2.1.- Incisión número 8

La probeta y el resistógrafo se fijan de forma que la broca incida en el pequeño nudo que presenta.

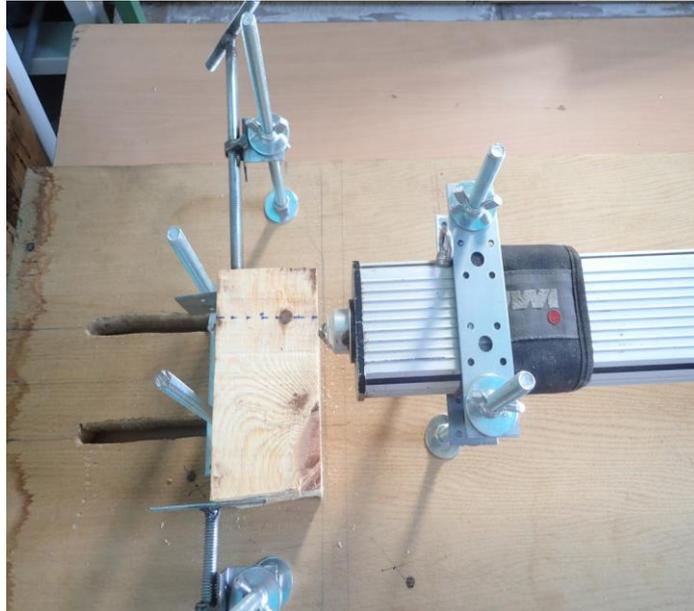


Figura 18. Vista general incisión n°8. Fuente: Elaboración propia.

2.3.2.2.- Escaneado

La muestra tres se escanea para poder conseguir un análisis posterior y realizar una comparativa cualitativa de los perfiles resistográficos.



Figura 19. Visualización digital muestra 1 nudos incisión n°8. Fuente: Elaboración propia.

2.4.- FENDAS

2.4.1.- MUESTRA 1_N4

Se realiza una única incisión en la muestra, atravesando la fenda que contiene la muestra en su parte superior.

2.4.1.1.- Incisión número 9

La muestra se fija mediante el banco y se posiciona de manera que la broca atraviese la fenda que presenta la muestra.



Figura 20. Punto de incisión nº9 y recorrido de la broca. Fuente: Elaboración propia.

2.4.1.2.- Escaneado

La muestra uno de la tipología fendas se escanea para poder conseguir un análisis posterior y realizar una comparativa cualitativa de los perfiles resistográficos.



Figura 21. Visualización digital muestra 1_N4, tipología fendas. Fuente: Elaboración propia.

2.5.- ANILLOS

2.5.1.- MUESTRA 1_N5

Se realiza una única incisión en la muestra.

2.5.1.1.- Incisión numero 10

La probeta y el resistógrafo se fijan de forma que la broca incida de manera transversal a los anillos de crecimiento.

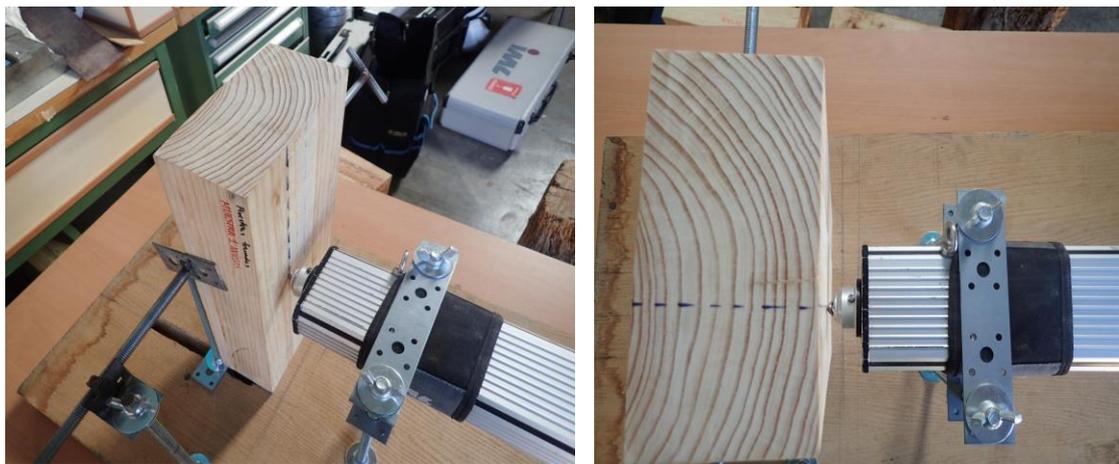


Figura 22. Punto de incisión nº10 y recorrido de la broca. Fuente: Elaboración propia.

2.5.1.2.- Escaneado

La muestra una se escanea para poder conseguir un análisis posterior y realizar una comparativa cualitativa de los perfiles resistográficos.



Figura 23. Visualización digital muestra 1 anillos. Fuente: Elaboración propia.

2.6.- CARCOMA GRUESA

2.6.1.- MUESTRA 1_N6

Se realiza una única incisión en la muestra.

2.6.1.1.- Incisión numero 11

Se realiza la incisión número once intentando atravesar los orificios producidos por la carcoma gruesa.



Figura 24. Vista general incisión nº11 carcoma gruesa. Fuente: Elaboración propia.

2.6.1.2.- Preparación y escaneado

Con el fin de poder determinar de una manera más eficaz una comparativa cualitativa (visual) entre los dos tipos de gráficas resistográficas se procede a realizar un corte de la muestra exactamente por el recorrido que ha realizado la broca.

Para ello se realiza la resistografía en la pieza y a la salida de la punta de la broca se extrae esta del equipo de resistografía quedando suelta en el interior de la pieza.

Una vez la broca se encuentra en el interior se procede al aserrado de la probeta, ejerciendo la broca que se encuentra en el interior de guía del corte de la sierra, tal como se muestra en la imagen 49.



Figura 25. Corte muestra 3_N2 incisión nº5 y recorrido de la broca. Fuente: Elaboración propia.

De esta forma se consigue que en el posterior escaneo de la muestra se aprecie el recorrido de la broca. Finalmente se escanea para poder conseguir un análisis posterior y realizar una comparativa cualitativa del perfil resistográfico.



Figura 26. Visualización digital muestra 1, incisión nº11 tipología carcoma gruesa. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 4. METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS SOBRE VIGAS

ÍNDICE GENERAL

1.- CLASIFICACIÓN VIGAS.....	181
2.- CONTENIDO DE HUMEDAD.....	182
3.- MEDICIÓN Y PESO.....	183
4.- CALCULO DE DENSIDAD vigas.....	184
5.- MARCAJE DE CARAS Y CANTOS.....	185
6.- CLASIFICACIÓN VISUAL.....	185
7.- MEDICION DE NUDOS.....	186
8.- CÁLCULO CKDR.....	186
9.- ENSAYOS ULTRASONIDOS.....	187
10.- ENSAYOS VIBRACIONES INDUCIDAS.....	190
11.- ENSAYOS DE RESISTOGRAFÍAS.....	191
12.- ENSAYOS DE ROTURA.....	193
12.1.- DETERMINACIÓN MÓDULO DE ELASTICIDAD GLOBAL EN FLEXIÓN.....	194
12.1.1.- DEFORMACIÓN “w”.....	195
12.1.2.- EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS.....	195
12.2.- DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN AXIAL.....	196
12.2.1.- DEFORMACIÓN “w”.....	196
12.2.2.- EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS.....	197
13.- DENSIDAD REBANADA.....	197
14.- CÁLCULO PORCENTAJE DURAMEN Y ALBURA.....	198

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Descarga de lote de madera de pino silvestre.	181
Figura 2. Vista en testa lote pino laricio.	181
Figura 3. Hongos cromógenos en viga de pino laricio.	182
Figura 4. Reagrupación de lote pino laricio para su secado en almacén.....	182
Figura 5. Secado de vigas en almacén.	183
Figura 6. Medición humedad en vigas.	183
Figura 7. Medición longitudinal y pesado de vigas.	183
Figura 8. Dimensiones cara y canto.	184
Figura 9. Marcaje de caras y cantos en vigas.	185
Figura 10. Clasificación visual.....	185
Figura 11. Medición de nudos.	186
Figura 12. Índice CKDR.	187
Figura 13. Marcaje incisión taladro para colocación de sensores de ultrasonidos....	187
Figura 14. Esquema acotado colocación de sensores.....	188
Figura 15. Realización de orificios para la posterior colocación de sensores.	188
Figura 16. Realización de ensayo de ultrasonidos en pino laricio.	189
Figura 17. Realización de ensayo de ultrasonidos en pino silvestre.	189
Figura 18. Calibración equipo Timber Grader.	190
Figura 19. Acomodación de viga para la realización de ensayo de vibraciones inducidas.	191
Figura 20. Realización ensayo vibraciones inducidas.....	191
Figura 21. Incisiones de resistografía horizontales.	192
Figura 22. Incisiones de resistografía horizontales.	192
Figura 23. Realización resistografía horizontal.....	193
Figura 24. Ensayo a flexión.	193
Figura 25. Vista general ensayo flexión y muestra de realización ensayo en ordenador.	194
Figura 26. Ejemplos zonas de rotura en vigas.	194
Figura 27. Dispositivo de ensayo para la medición del módulo de elasticidad global en flexión.....	195
Figura 28. Dispositivo de ensayo para la medición de la resistencia a flexión.....	196
Figura 29. Extracción y medida de rebanada.	198
Figura 30. Escaneado y cálculo % Albura/Duramen de rebanada.....	198
Figura 31. Lijado rebanada.	198

1.- CLASIFICACIÓN VIGAS

La compra de vigas se realizó en dos lotes con procedencias distintas. Un primer lote de las especies de pino silvestre y pino laricio proceden del aserradero Maderas Cuneca, situado en Mohorte (Cuenca), y se componen por 26 vigas de cada especie con unas dimensiones nominales de 180 x 4000 x 80mm, mientras que un segundo lote de pino carrasco y pino resinero se compone de 15 vigas de cada especie, y proceden del aserradero Requetal Aserradero, situado en Requena (Valencia), con unas dimensiones de 180 x 4000 x 80mm.

Las muestras para la realización de los ensayos con técnicas no destructivas y rotura en ensayo a flexión se componen por un total de 61 vigas, del género *Pinus*, concretamente 16 unidades de las especies *Pinus halepensis* Mill. (pino carrasco), 15 unidades de *Pinus nigra* Arnold subsp. *nigra*. (pino laricio), 15 unidades de *Pinus pinaster* Ait. Ssp. *Mesogeensis* Fieschi & Gaussen. (pino resinero) y 15 unidades de *Pinus sylvestris* L. (pino silvestre), estableciéndose una muestra total de 61 vigas.



Figura 1. Descarga de lote de madera de pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Vista en testa lote pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

De los lotes de madera de las especies laricio y silvestre se realiza una selección de las 15 vigas de madera del total de 25 de cada lote, dejando a un lado las vigas que contenían hongos cromógenos, así como diferentes particularidades, que hacían de la muestra vigas no aptas para los ensayos.



Figura 3. Hongos cromógenos en viga de pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

2.- CONTENIDO DE HUMEDAD

Todos los lotes de madera contenían un porcentaje de humedad por encima del punto de saturación de la fibra, por lo que se colocaron para su correcto secado hasta alcanzar un porcentaje de humedad en torno al 12%. Las mediciones de humedad se realizaron tanto con higrómetro resistivo y capacitivo.



Figura 4. Reagrupación de lote pino laricio para su secado en almacén. Fuente: Elaboración propia.



Figura 5. Secado de vigas en almacén. Fuente: Elaboración propia.

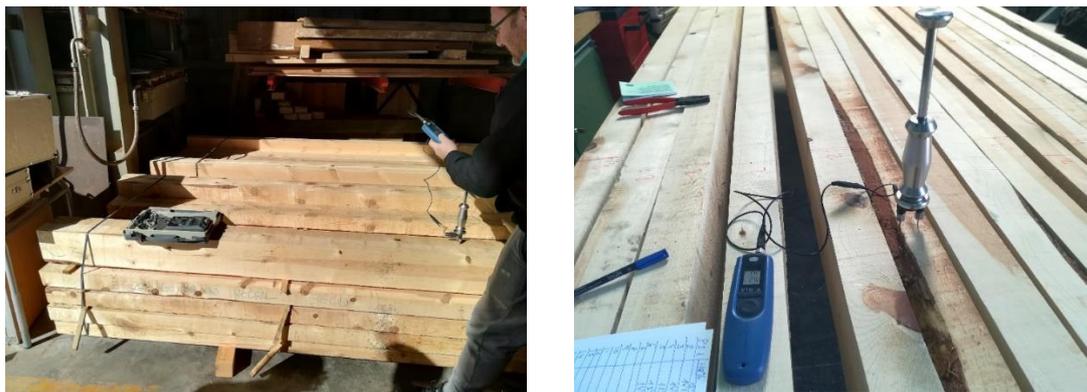


Figura 6. Medición humedad en vigas. Fuente: Elaboración propia.

3.- MEDICIÓN Y PESO

Antes de proceder a la realización de los ensayos sobre las vigas se comprueba que hayan alcanzado un porcentaje de humedad entorno al 12%, y se procede a anotar las dimensiones y el peso de todas las vigas (figura 7).



Figura 7. Medición longitudinal y pesado de vigas. Fuente: Elaboración propia.

Se definen las caras como las superficies de la viga correspondientes a la mayor dimensión de la sección transversal y los cantos como las superficies de las vigas correspondientes a la menor dimensión de la sección transversal. La anchura (h) y el espesor (b) de la pieza se definen como la dimensión mayor y menor, respectivamente, de la sección transversal, según figura 8.

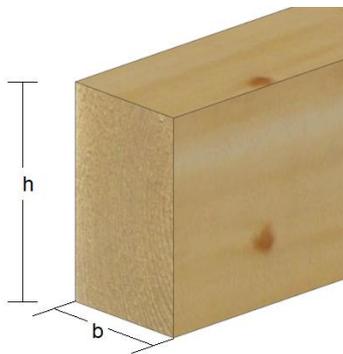


Figura 8. Dimensiones cara y canto. Fuente: Elaboración propia.

Para la medida del peso se utilizan dos básculas de pesaje calibradas, apoyando los extremos de las vigas en las basculas, y anotando las mediciones una vez se estabilizan.

Las anotaciones y resultados de los pesos se muestran en el ANEXO 8 TABLAS DE RESULTADOS, apartado 1 *resultados mediciones y pesos*.

4.- CALCULO DE DENSIDAD VIGAS

Las densidades son calculadas mediante dos métodos distintos.

Se realiza un primer calculo denominado *densidad viga*, para el cuál se utilizan las mediciones estándar de longitud realizadas con flexómetro y las medidas de cara y canto realizadas con flexómetro, todas las aproximaciones al milímetro.

Posteriormente a la medición de las rebanadas extraídas de cada viga, según norma UNE-EN 408:2011+A1, se realiza un nuevo calculo de la densidad de las vigas, denominado *densidad real*, utilizando las mediciones realizadas de canto y cara de las rebanadas extraídas de cada una de las vigas con posterioridad al ensayo de rotura, con precisión a las centésimas de milímetro, y la longitud utilizada para el cálculo de la densidad viga.

Los resultados de las densidades de las vigas se pueden ver en ANEXO 8 TABLAS DE RESULTADOS, apartado 2 *resultados densidades*.

5.- MARCAJE DE CARAS Y CANTOS

El conjunto de vigas se marca en todas sus caras y cantos de igual forma, de manera que se procede a unificar la igualdad del proceso en cada una de las vigas y facilitar el tratamiento de datos. Se denomina A al canto superior, B la cara lateral derecha, C el canto inferior, y D la cara lateral izquierda.

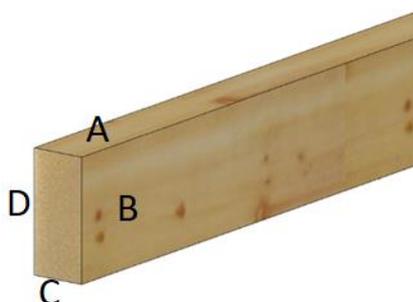


Figura 9. Marcaje de caras y cantos en vigas. Fuente: Elaboración propia.

6.- CLASIFICACIÓN VISUAL

La clasificación visual se realizó en seco, dicha clasificación para las maderas de coníferas se establece según la norma UNE 56544:2011. La norma es de aplicación en madera aserrada destinada a usos estructurales, de las especies de procedencia española de pino silvestre, pino laricio, pino resinero y pino insigne.

Se incluyen dos calidades en la norma, una para las piezas con grosor menor o igual a 70 mm, denominadas ME-1 y ME-2 y una segunda para piezas de escuadría, con espesor mayor que 70 mm, con calidad denominada MEG.

Las vigas se clasifican con calidad MEG ya que todas superan un espesor mayor de 70 mm. En la norma no aparece como especie el pino carrasco, pero se procede a clasificarla de igual manera que las demás.



Figura 10. Clasificación visual. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la clasificación visual se pueden ver en ANEXO 8 TABLAS DE RESULTADOS, apartado 8 *clasificación visual*.

7.- MEDICION DE NUDOS

La medición de los nudos se realiza en base a la norma UNE 56544:2011. Esta basa su método de medición de acuerdo al método alternativo definido en la norma UNE-EN 1310. Para la clasificación se dividen las vigas en tres tercios de igual longitud, quedando establecido de esta forma un primer tercio, segundo tercio o zona central y tercer tercio.

Se anota el número de nudos en cada tercio, para posteriormente establecer dos variables, una primera con el número de nudos totales en la pieza (*nº nudos total*) y una segunda con el número de nudos en la zona central de la viga (*nº nudos zona central*).

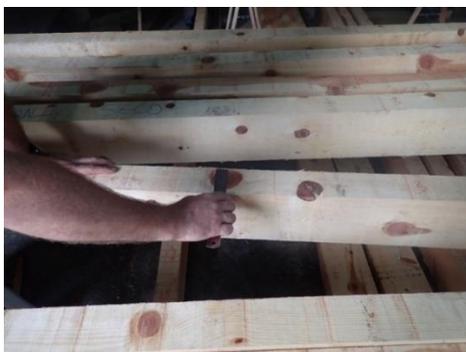


Figura 11. Medición de nudos. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las mediciones de nudos se pueden ver en ANEXO 8 TABLAS DE RESULTADOS, apartado 3 *medición de nudos*.

8.- CÁLCULO CKDR

Como índice para contabilizar la nudosidad se establece el parámetro CKDR (Concentrated Knot Diameter Ratio). Este se calcula con la suma de los diámetros de los nudos dividido por la dimensión de la cara o canto donde se encuentren.

Se establecen dos tipos de CKDR: *CKDR zona central*, siendo este la suma del diámetro de los nudos que se encuentran en la zona central de la viga, y *CKDR viga completa*, siendo este la suma de diámetros del conjunto de nudos de la viga completa.

Los resultados de las mediciones de nudos se pueden ver en ANEXO 8 TABLAS DE RESULTADOS, apartado 4 índices CKDR.

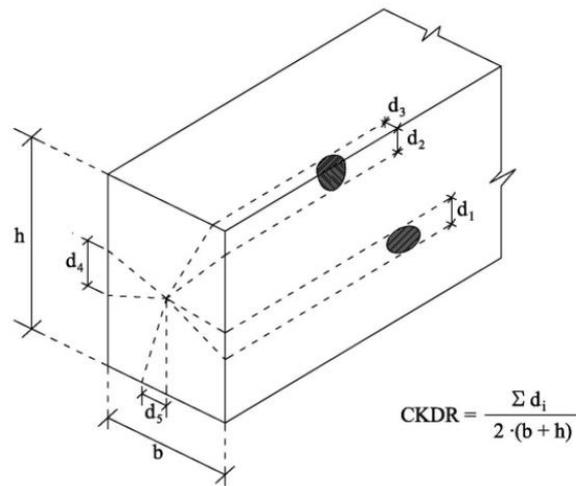


Figura 12. Índice CKDR. Fuente: Daniel Fernández Llana, 2016.

9.- ENSAYOS ULTRASONIDOS

Primeramente, se realiza un marcaje en testa de los puntos donde se realizan mediante brocas cónicas los orificios para la posterior colocación de los sensores de ultrasonidos.



Figura 13. Marcaje incisión taladro para colocación de sensores de ultrasonidos. Fuente: Elaboración propia.

Las lecturas realizadas con el equipo Sylvatest se llevaron a cabo mediante tres métodos diferentes: método directo testa a testa, en el cual se toman dos medidas colocando los sensores a 1/3 y otra a 2/3 de la testa, método indirecto, tomando medidas en las dos caras y dos cantos de la viga, método semidirecto, tomando mediciones en caras y cantos opuestos dos a dos. Las mediciones semidirectas e indirectas se realizan el medio de la longitud de la cara o bien el canto. En la figura 14 se detalla la posición de los sensores.

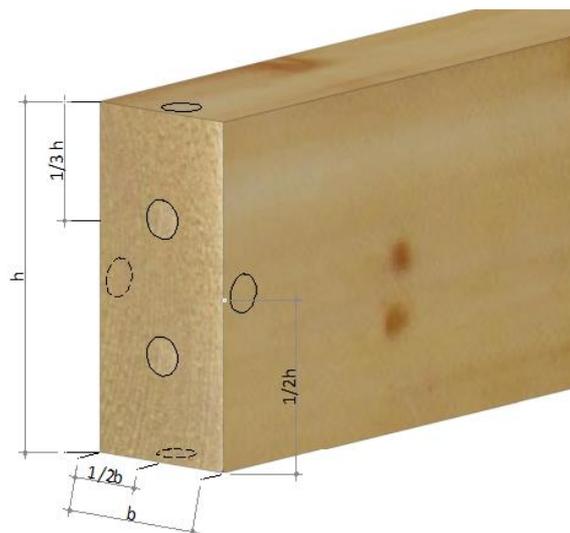


Figura 14. Esquema acotado colocación de sensores. Fuente: Elaboración propia.

El conjunto de medidas finalmente queda determinado por dos medidas directas, cuatro indirectas (canto A indirecto, canto B indirecto, canto C indirecto, canto D indirecto), y cuatro semidirectas (cara DB cruzado, cara BD cruzado, canto AC cruzado, canto CA cruzado).

Los datos de MOE y MOR que se recogen no son los proporcionados por el equipo Sylvatest, sino que se realiza un ajuste mediante Excel ajustando la densidad de las vigas. El ajuste se realiza corrigiendo con la densidad real de cada una de las vigas.



Figura 15. Realización de orificios para la posterior colocación de sensores. Fuente: Elaboración propia.



Figura 16. Realización de ensayo de ultrasonidos en pino laricio. Fuente: Elaboración propia.



Figura 17. Realización de ensayo de ultrasonidos en pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento operativo se basa en los siguientes pasos:

1. En “Main Menu” se selecciona la opción “Take Measurements”.
2. En “New Measure Number” se presiona “Enter”.
3. En “Direction of the Measure” se selecciona la opción “Longitudinal”.
4. En “Application Case” se selecciona la opción “Sawing”.
5. En “Measurent Type” se selecciona la opción “Indirect” o “Direct”, dependiendo del método de medición aplicado.
6. En “Select Species” se escoge la especie de madera correspondiente.
7. En “Batch Letter” se presiona “Enter”.
8. En “Measure” se selecciona la opción “Take the Measure”.

Posteriormente a la realización de todos los pasos el equipo tomaba la medida y se le introducía el contenido de humedad (prefijado en 12%) y la distancia entre transductores.

Como resultado se obtiene la variable *Sylvatest media MOE* y *Sylvatest media MOR*, así como la variable *Velocidad Sylvatest media*.

Los resultados de las mediciones de nudos se pueden ver en ANEXO 8 TABLAS DE RESULTADOS, apartado 5 *ultrasonidos*.

10.- ENSAYOS VIBRACIONES INDUCIDAS

La realización del ensayo de vibraciones inducidas se realiza con el equipo Timber Grader MTG. Las vigas se acomodan sobre una capa de material semiplástico en sus apoyos a modo de sistema de amortiguación, para posteriormente mediante el equipo golpear las vigas en los centros de las testas.

El equipo proporciona directamente el MOE dinámico, una vez se la introducido anteriormente las dimensiones y peso de cada una de las viguetas. Para el cálculo del valor de la resistencia a flexión se utiliza la ecuación que proporciona el cálculo del equipo Sylvatest TRIO. Como resultado se obtienen las variables *Timber grader MOE* y *Timber grader MOR*.



Figura 18. Calibración equipo Timber Grader. Fuente: Elaboración propia.



Figura 19. Acomodación de viga para la realización de ensayo de vibraciones inducidas. Fuente: Elaboración propia.



Figura 20. Realización ensayo vibraciones inducidas. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las mediciones de nudos se pueden ver en ANEXO 8 TABLAS DE RESULTADOS, apartado 6 *vibraciones inducidas*.

11.- ENSAYOS DE RESISTOGRAFÍAS

Se realizan 10 resistografías en cada viga, de las cuales 5 son en sentido vertical y 5 en sentido horizontal (figura 21 y 22). Cada resistografía se realiza aproximadamente a 1/6 de la longitud total de la viga, y se evita el incidir en particularidades como nudos, bolsas de resina, etc.

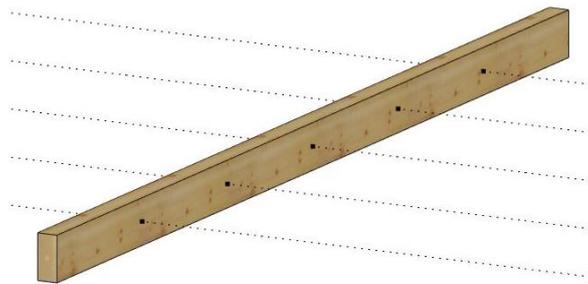


Figura 21. Incisiones de resistografía horizontales. Fuente: Elaboración propia.

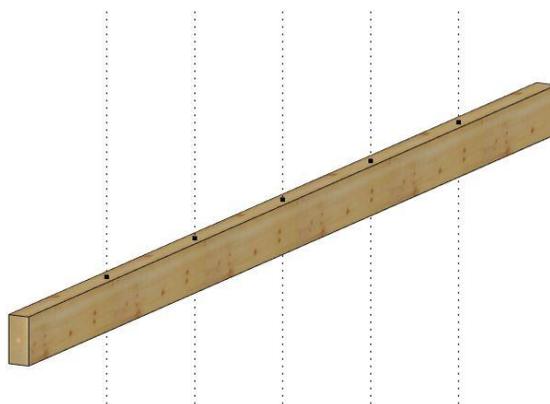


Figura 22. Incisiones de resistografía horizontales. Fuente: Elaboración propia.

Para el tratamiento de datos de los perfiles resistográficos se eliminan los primeros y últimos 5 mm de la resistografía, tanto para la gráfica *drill resistance* como para la gráfica *feed force*.

De esta forma el cálculo del valor medio de la amplitud de cada resistografía excluye los datos comprendidos entre los 5 mm iniciales y los 5 mm finales. El tratamiento de datos se lleva a cabo mediante el programa informático Excel.

Para las especies pino silvestre y pino laricio las resistografías verticales se realizan con una longitud programada de 18,5 cm, y para las horizontales de 8,5 cm.

Para las especies pino resinero y pino carrasco las resistografías verticales se realizan con una longitud programada de 18 cm, y para las horizontales de 8 cm.

Como resultado se obtienen las variables *Drill H 0.5*, *Drill V 0.5*, *Feed H 0.5* y *Feed V 0.5*.



Figura 23. Realización resistografía horizontal. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las mediciones de nudos se pueden ver en ANEXO 8 TABLAS DE RESULTADOS, apartado 7 *reistografías*.

12.- ENSAYOS DE ROTURA

Se procede a la realización de los ensayos de rotura de acuerdo a la norma UNE-EN 408:2011+A1. Únicamente se calculó el Módulo de elasticidad global en flexión y la resistencia a la flexión axial. Ambos ensayos se realizaron progresivamente.

La marca y modelo de la máquina corresponde a: Landsmont, modelo 122-15. Ésta proporciona en soporte informático los resultados de los desplazamientos de la máquina y la carga aplicada para un posterior tratamiento de datos.



Figura 24. Ensayo a flexión. Fuente: Elaboración propia.

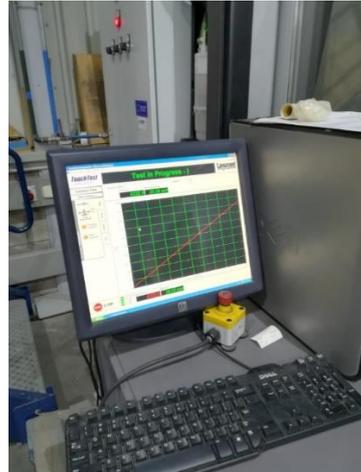


Figura 25. Vista general ensayo flexión y muestra de realización ensayo en ordenador. Fuente: Elaboración propia.



Figura 26. Ejemplos zonas de rotura en vigas. Fuente: Elaboración propia.

12.1.- DETERMINACIÓN MÓDULO DE ELASTICIDAD GLOBAL EN FLEXIÓN

El módulo de elasticidad a global en el ensayo a flexión se denomina *MOE Global flexión*. La velocidad de descenso de la maquina fue de 2.5 cm/min y a velocidad constante y se realizó de acuerdo a las especificaciones de la norma UNE-EN 408:2011+A1 apartado 10.

Se anotaron las zonas de rotura y los elementos que incluían dichas zonas como la presencia de nudos. En la figura 27 se muestra el tipo de ensayo realizado.

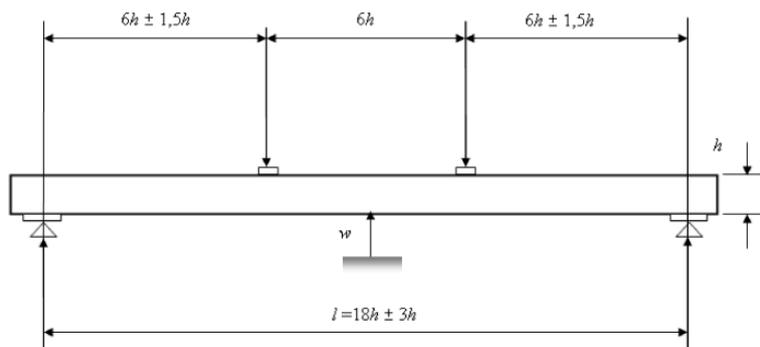


Figura 27. Dispositivo de ensayo para la medición del módulo de elasticidad global en flexión. Fuente: UNE-EN 408:2011+A1.

12.1.1.- DEFORMACIÓN “W”

La deformación “w” debe medirse en el centro de la luz y en el centro del borde traccionado o comprimido. Dado que en las instalaciones de AIDIMME no se precisaba de una maquina ensayo universal que pueda captar el desplazamiento o deformación “w” se utilizo como medición la bajada de la plancha, es decir la distancia de desplazamiento de los apoyos metálicos en la viga, siendo esta medición de valor inferior a “w”.

Para corroborar que la medición que realiza la máquina no dista mucho de la especificada en norma, ni influye en el posterior cálculo se procedió a realizar una serie de ensayos para ver la influencia. Los ensayos se muestran en el ANEXO 7. JUSTIFICACIÓN DE LA DEFORMACIÓN.

12.1.2.- EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

Para el análisis de regresión se utiliza el tramo de gráfico comprendido entre el 10 % de la fuerza máxima ($F_{m\acute{a}x}$) y el 40 % de la fuerza máxima. Para el valor 0.1 $F_{m\acute{a}x}$ corresponde el desplazamiento w_1 y para el valor 0.4 $F_{m\acute{a}x}$ corresponde el desplazamiento w_2 . Como módulo de elasticidad transversal medio de las especies de madera de coníferas puede tomarse como $G = 650 \text{ N/mm}^2$.

El cálculo de la variable *MOE Global flexión* se realiza mediante la siguiente expresión:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)}$$

Siendo:

a distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo, en milímetros.

- b anchura de la sección transversal en un ensayo a flexión, o la menor dimensión de la sección transversal en milímetros.
 - h altura de la sección en los ensayos de flexión, o dimensión mayor de la sección, en milímetros.
 - w deformación en milímetros.
 - l distancia entre apoyos
 - G módulo de elasticidad transversal, en newtons por milímetro cuadrado.
- $w_2 - w_1$ es el incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$, en milímetros.

Los resultados del módulo de elasticidad global se pueden ver en ANEXO 8 TABLAS DE RESULTADOS, apartado 10 *resultados ensayo de rotura*.

12.2.- DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN AXIAL

En este ensayo el procedimiento operatorio es similar a la determinación del módulo de elasticidad global en flexión y se efectúa seguidamente a este último.

La velocidad de descenso de la maquina fue de 2.5 cm/min y a velocidad constante.

La fuerza máxima en el ensayo se compone por una precarga que realiza la maquina de ensayo de 100 Newtons, el peso de la barra metálica de y de los apoyos metálicos que suman un total de 270 Newtons y la fuerza que aplica la propia máquina en la realización del ensayo. La fuerza correspondiente a la suma de todas ellas se denomina fuerza máxima aplicada ($F_{m\acute{a}x}$).

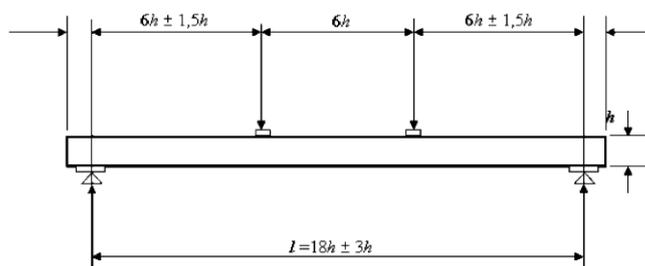


Figura 28. Dispositivo de ensayo para la medición de la resistencia a flexión. Fuente: UNE-EN 408:2011+A1.

12.2.1.- DEFORMACIÓN “W”

La deformación “w” debe medirse en el centro de la luz y en el centro del borde traccionado o comprimido. Dado que en las instalaciones de AIDIMME no se precisaba de una maquina ensayo universal que pueda captar el desplazamiento o deformación

“w” se utilizó como medición la bajada de la plancha, es decir la distancia de desplazamiento de los apoyos metálicos en la viga, siendo esta medición de valor inferior a “w”.

Para corroborar que la medición que realiza la máquina no dista mucho ni influye en el posterior cálculo se procedió a realizar una serie de ensayos para ver la influencia. Los ensayos se muestran en el ANEXO 7. JUSTIFICACIÓN DE LA DEFORMACIÓN.

12.2.2.- EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

El cálculo de la variable *MOR Resistencia flexión axial* se realiza mediante la siguiente expresión:

$$f_m = \frac{3F_{m\acute{a}x}a}{bh^2}$$

Siendo,

$F_{m\acute{a}x}$ carga máxima en newtons.

a distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo, en milímetros.

b anchura de la sección transversal en un ensayo a flexión, o la menor dimensión de la sección transversal en milímetros.

h altura de la sección en los ensayos de flexión, o dimensión mayor de la sección, en milímetros.

Los resultados del módulo de elasticidad global se pueden ver en ANEXO 8 TABLAS DE RESULTADOS, apartado 10 *resultados ensayo de rotura*.

13.- DENSIDAD REBANADA

Posterior a la rotura se extrajo una rebanado según lo especificado en el apartado 7 de la norma UNE-EN 408:2011+A1. Las rebanadas extraídas según la norma se miden con el pie de rey y se calcula su densidad en función de la masa de cada rebanada. Las mediciones de largo x ancho x alto se ajustan a centésimas de milímetro.

Como resultado se obtiene la variable *Densidad rebanada*.

Los resultados del módulo de elasticidad global se pueden ver en ANEXO 8 TABLAS DE RESULTADOS, apartado 2.1 *densidades rebanadas*.



Figura 29. Extracción y medida de rebanada. Fuente: Elaboración propia.

14.- CÁLCULO PORCENTAJE DURAMEN Y ALBURA

A partir de las rebanadas extraídas del ensayo a flexión según norma UNE-EN 408:2011+A1 se calcula el porcentaje de albura y duramen, escaneando dichas rebanadas. La imagen digitalizada se trata con el programa informático Adobe Reader Pro de manera que se calcula el área en mm^2 de albura y duramen.

Para realizar un correcto escaneado se lijan las caras de las rebanadas mediante lijadora. Como resultado se obtienen las variables % *Albura* y % *Duramen*.

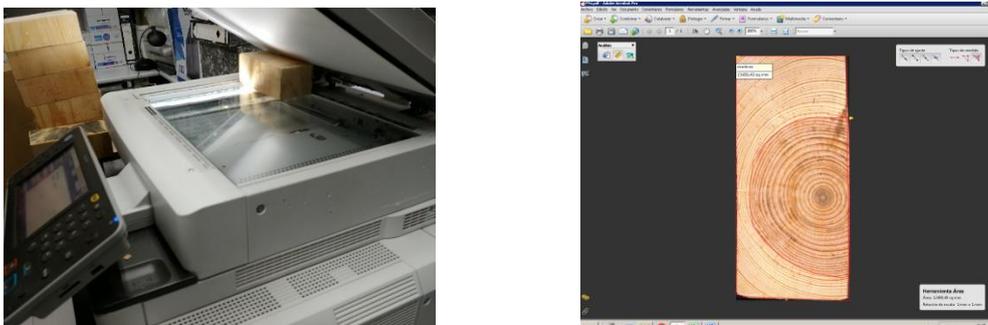


Figura 30. Escaneado y cálculo % *Albura*/*Duramen* de rebanada. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del módulo de elasticidad global se pueden ver en ANEXO 8 TABLAS DE RESULTADOS, apartado 9 % *albura*/*duramen*.



Figura 31. Lijado rebanada. Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS
RESULTADOS DE ENSAYOS COMPARATIVOS DE LAS
GRÁFICAS “DRILL RESISTANCE” Y “FEED FORCE”
MEDIANTE INCISIONES RESISTOGRÁFICAS**

ÍNDICE GENERAL

1.- PLANTEAMIENTO GENERAL.....	203
2.- ENSAYOS RESISTOGRÁFICOS	204
2.1.- Albura/Médula/Duramen	204
2.1.1.- Muestra 1_N1	204
2.1.1.1.- Análisis incisión número 1.....	204
2.1.1.2.- Análisis incisión número 2.....	205
2.1.2.- Muestra 3_N1	206
2.1.2.1.- Análisis Incisión número 3.....	206
2.2.- CARCOMA FINA	208
2.2.1- Muestra 1_N2	208
2.2.1.1.- Análisis incisión número 4.....	208
2.2.1.2.- Análisis incisión número 5.....	209
2.3.- NUDOS	211
2.3.1.- Muestra 8_N3	211
2.3.1.1.- Incisión número 6.....	211
2.3.1.2.- Incisión número 7.....	212
2.3.2.- Muestra 1_N3	213
2.3.2.1.- Incisión número 8.....	214
2.4.- FENDAS	215
2.4.1.- Muestra 1_N4	215
2.4.1.1.- Incisión número 9.....	215
2.5.- ANILLOS	216
2.5.1.- Muestra 1_N5	216
2.5.1.1.- Incisión número 10	216
2.6.- CARCOMA GRUESA	218
2.6.1.- Muestra 1_N6	218
2.6.1.1.- Incisión número 11	218

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráficas feed force y drill resistance incisión nº1.....	204
Figura 2. Gráfica drill resistance y feed force incisión nº1.....	204
Figura 3. Análisis gráfico incisión nº1.	205
Figura 4. Gráficas feed force y drill resistance incisión nº2.....	205
Figura 5. Gráfica drill resistance y feed force incisión nº2.....	206
Figura 6. Análisis gráfico incisión nº2.	206
Figura 7. Gráficas feed force y drill resistance incisión nº3.....	207
Figura 8. Gráfica drill resistance y feed force incisión nº2.....	207
Figura 9. Análisis gráfico incisión nº3.	207
Figura 10. Gráficas feed force y drill resistance incisión nº4.	208
Figura 11. Gráfica drill resistance y feed force incisión nº4.	208
Figura 12. Análisis gráfico incisión nº4.....	209
Figura 13. Análisis gráfico drill resistance y feed force incisión nº4.....	209
Figura 14. Gráficas feed force y drill resistance incisión nº5.	210
Figura 15. Gráfica drill resistance y feed force incisión nº4.	210
Figura 16. Análisis gráfico incisión nº5.....	210
Figura 17. Análisis gráfico drill resistance y feed force incisión nº4.....	211
Figura 18. Gráficas feed force y drill resistance incisión nº6.	211
Figura 19. Gráfica drill resistance y feed force incisión nº6.	211
Figura 20. Análisis gráfico incisión nº6.....	212
Figura 21. Gráficas feed force y drill resistance incisión nº7.	212
Figura 22. Gráfica drill resistance y feed force incisión nº7.	213
Figura 23. Análisis gráfico incisión nº7.....	213
Figura 24. Gráficas feed force y drill resistance incisión nº8.	214
Figura 25. Gráfica drill resistance y feed force incisión nº8.	214
Figura 26. Análisis gráfico incisión nº8.....	214
Figura 27. Gráficas feed force y drill resistance incisión nº9.	215
Figura 28. Gráfica drill resistance y feed force incisión nº9.	215
Figura 29. Análisis gráfico incisión nº9.....	216
Figura 30. Gráfica drill resistance y feed force incisión nº10.....	216
Figura 31. Análisis gráfico drill resistance y feed force incisión nº10.	217
Figura 32. Gráficas feed force y drill resistance incisión nº11.....	218
Figura 33. Gráfica drill resistance y feed force incisión nº11.....	218
Figura 34. Análisis gráfico incisión nº11.	218

Figura 35. Análisis gráfico drill resistance y feed force incisión nº11.219

1.- PLANTEAMIENTO GENERAL

En base a la metodología aplicada en la realización de los ensayos mediante incisiones resistográficas para la comparación entre la gráfica *drill resistance* y *feed force* se obtienen los resultados mostrados en el siguiente anexo.

Cada incisión resistográfica realizada en las muestras se recoge en la memoria interna del resistógrafo mediante valores de amplitud y valores de distancia recorrida por la broca. Estos datos son recogidos por el programa que aporta la serie de resistógrafos IML PD RESI denominado PD-Tools Pro, el cual vuelca los datos de la resistografía, y estos se pueden exportar en formato de hoja de cálculo Excel.

De este modo, los resultados obtenidos de cada una de las incisiones resistográficas se analizan cualitativamente mediante dos métodos.

Un primer análisis cualitativo se realiza mostrando las gráficas obtenidas con el programa PD-Tools Pro, donde se visualizan todos los perfiles resistográficos y se marcan mediante diferentes colores en la parte inferior y superior de los perfiles las distancias que pertenecen a las anomalías o degradaciones de las muestras para cada una de las incisiones realizadas.

Por otro lado, se superponen las imágenes de las secciones escaneadas de cada una de las muestras sobre las gráficas en formato Excel, pudiendo así realizar un buen análisis visual, al poder establecer una clara relación entre la variación de amplitud resistográfica al paso de la broca por cada una de las anomalías o degradaciones de las secciones.

Para todos los análisis se establece el color azul para mostrar la gráfica *feed force* y el color verde para la gráfica *drill resistance*.

2.- ENSAYOS RESISTOGRÁFICOS

2.1.- ALBURA/MÉDULA/DURAMEN

2.1.1.- MUESTRA 1_N1

Se representa gráficamente mediante diferentes colores los tres tipos de zonas que atraviesa la broca. Se establece el color rojo para la zona de albura, color amarillo para la zona de médula y color verde para la zona de madera de duramen.

La línea discontinua de color azul definida sobre la testa de las muestras marca el recorrido realizado por la broca.

2.1.1.1.- Análisis incisión número 1

El recorrido de la broca transcurre atravesando primeramente la albura, de 0 a 3 cm, seguidamente duramen, del tercer centímetro al séptimo, seguidamente la médula, correspondiente a la distancia de 8 centímetros a 9 centímetros, vuelve a travesar duramen del centímetro 9 al 12, y finalmente transcurre por la albura del centímetro 12.5 al 17.5.

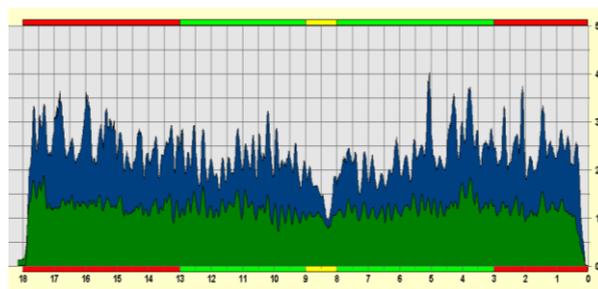


Figura 1. Gráficas feed force y drill resistance incisión n°1. Fuente: Elaboración propia.

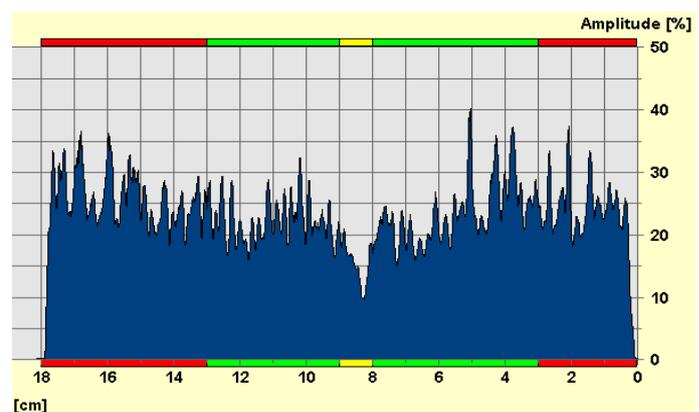
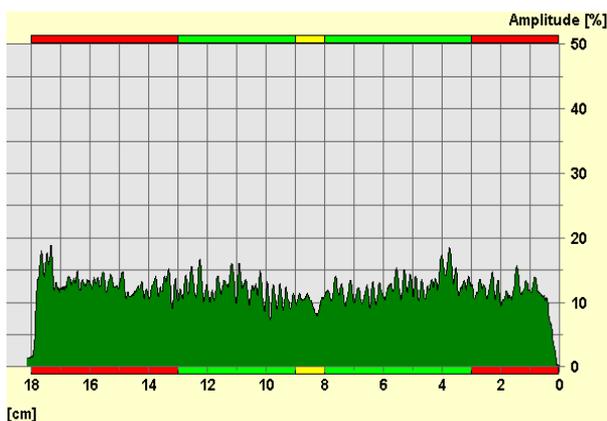


Figura 2. Gráfica drill resistance y feed force incisión n°1. Fuente: Elaboración propia.

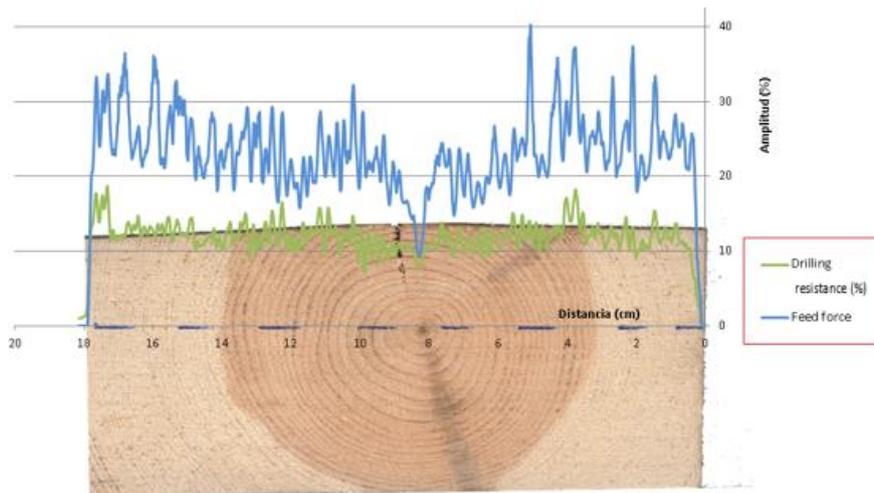


Figura 3. Análisis gráfico incisión n°1. Fuente: Elaboración propia.

Observando los perfiles resistográficos y la imagen de la sección de la muestra se aprecia al atravesar la broca la médula una disminución de amplitud más brusca en la gráfica *feed force* que en la gráfica *drill resistance*.

No se aprecian diferencias de amplitud significativas entre la madera de albura y la madera de duramen.

2.1.1.2.- Análisis incisión número 2

El recorrido de la broca transcurre atravesando primeramente la albura, de 0 a 3 cm, seguidamente duramen del tercer centímetro al treceavo, y finalmente transcurre por la albura del centímetro 13 al 18.

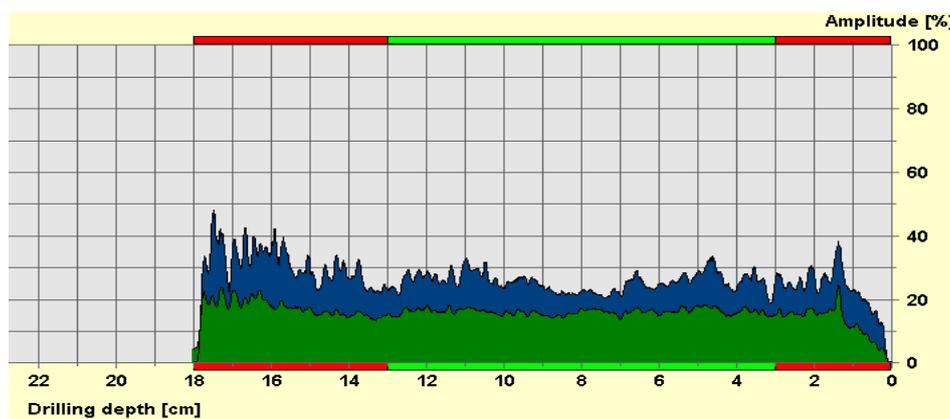


Figura 4. Gráficas *feed force* y *drill resistance* incisión n°2. Fuente: Elaboración propia.

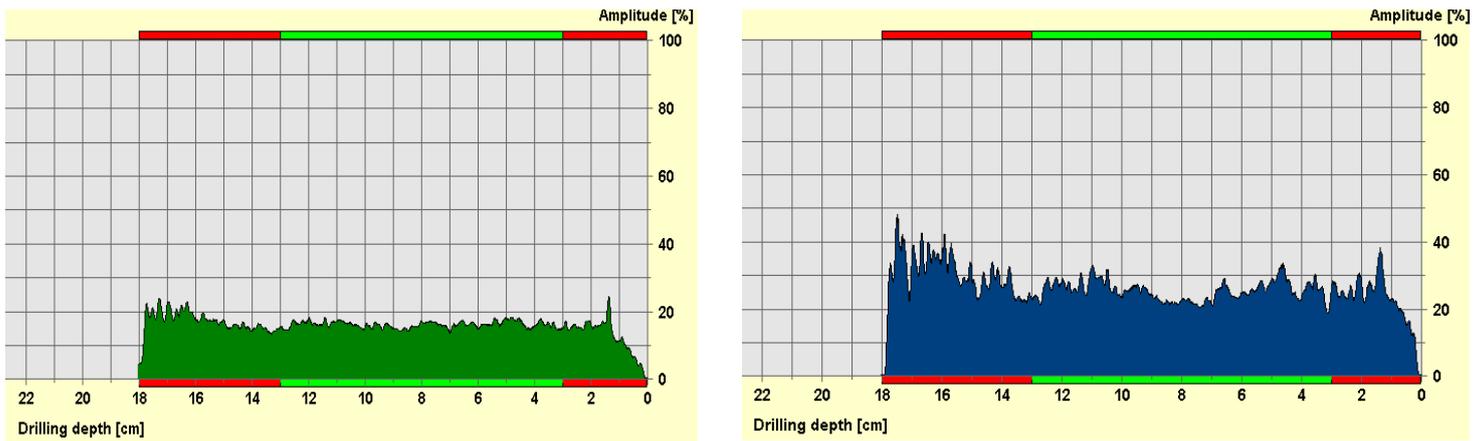


Figura 5. Gráfica drill resistance y feed force incisión n°2. Fuente: Elaboración propia.

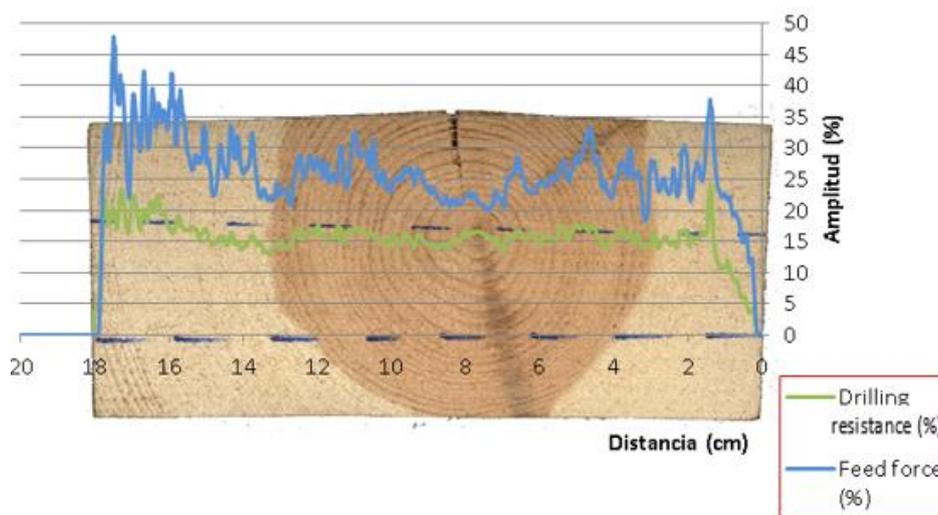


Figura 6. Análisis gráfico incisión n°2. Fuente: Elaboración propia.

Observando los perfiles resistográficos y la imagen de la sección de la muestra no hay diferencia en la variación de amplitud de los perfiles resistográficos entre madera de albura y madera de duramen.

2.1.2.- MUESTRA 3_N1

Se representa gráficamente mediante diferentes colores los tres tipos de zonas que atraviesa la broca, estableciendo el color rojo para la zona de albura, color amarillo para la zona de médula y color verde para la zona de madera de duramen.

2.1.2.1.- Análisis Incisión número 3

El recorrido de la broca transcurre atravesando primeramente la albura, de 0 a 7.5 cm, seguidamente duramen del centímetro 7.5 al centímetro 10, seguidamente la médula correspondiente a la distancia de 10 centímetros a 11.5 centímetros, vuelve a travesar

duramen del centímetro 11.5 al 15, y finalmente transcurre por la albura del centímetro 15 al 18.

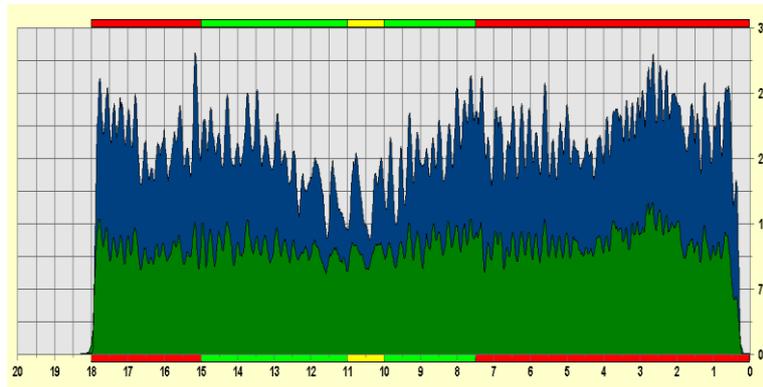


Figura 7. Gráficas feed force y drill resistance incisión n°3. Fuente: Elaboración propia.

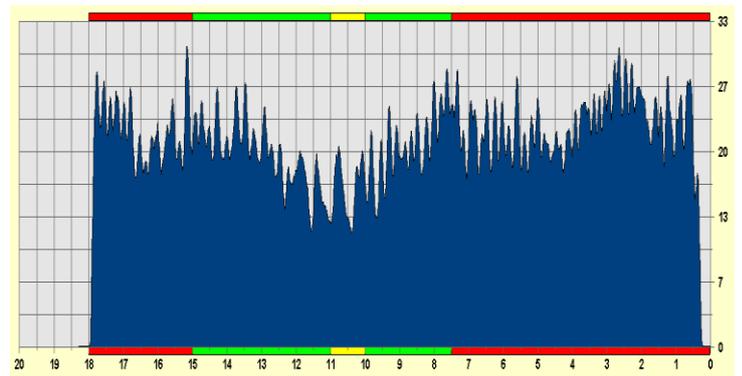
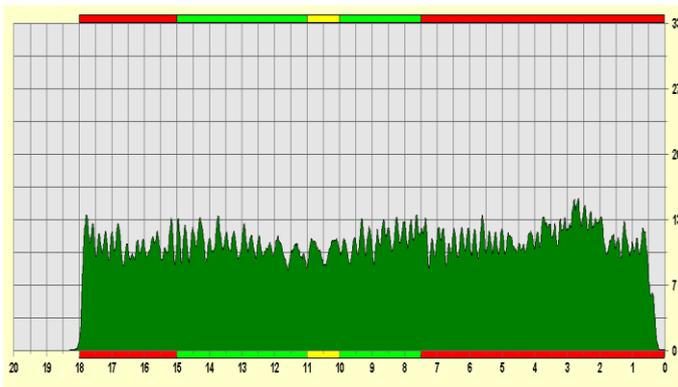


Figura 8. Gráfica drill resistance y feed force incisión n°2. Fuente: Elaboración propia.

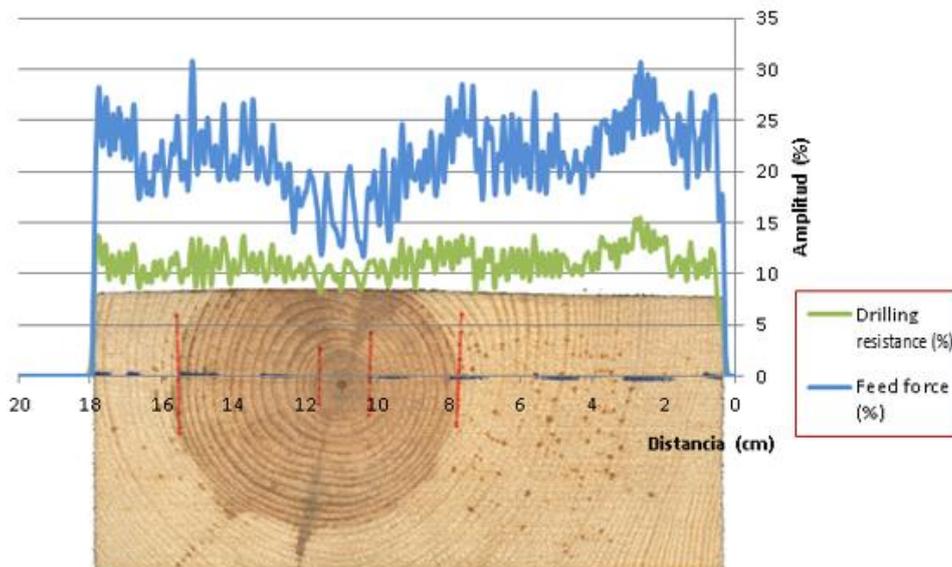


Figura 9. Análisis gráfico incisión n°3. Fuente: Elaboración propia.

Observando los perfiles resistográficos y la imagen de la sección de la muestra se aprecia disminución de amplitud más brusca en la gráfica *feed force* que en *drill resistance* al atravesar la médula, incluso en la gráfica *drill resistance* es inapreciable el paso por la médula.

No hay diferencia apreciable entre las gráficas al paso por la madera de albura y la madera de duramen.

2.2.- CARCOMA FINA

2.2.1- MUESTRA 1_N2

Se representa en el gráfico del programa PD-Tools Pro mediante color verde los orificios ocasionados por la carcoma fina.

2.2.1.1.- Análisis incisión número 4

La presencia de orificios se detecta aproximadamente en los centímetros seis, ocho y diez.

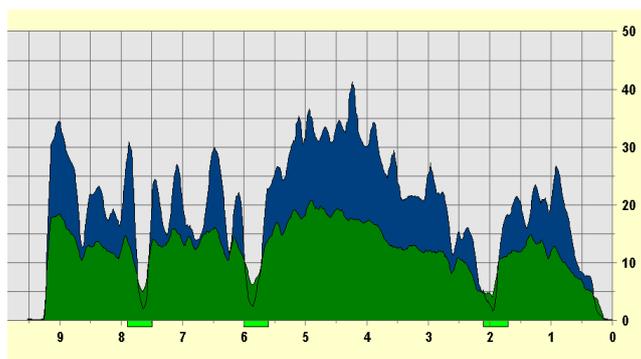


Figura 10. Gráficas *feed force* y *drill resistance* incisión n°4. Fuente: Elaboración propia.

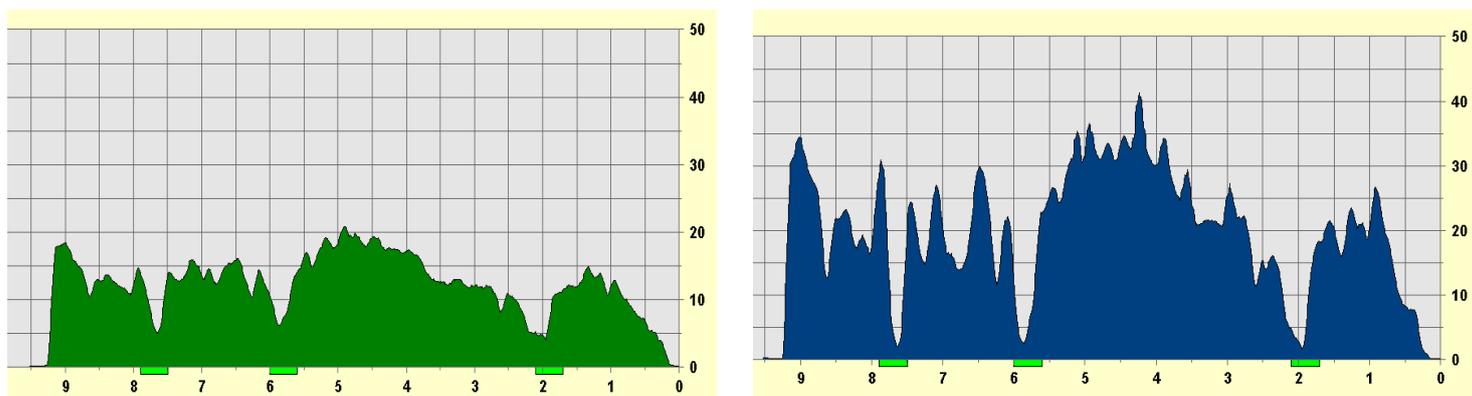


Figura 11. Gráfica *drill resistance* y *feed force* incisión n°4. Fuente: Elaboración propia.

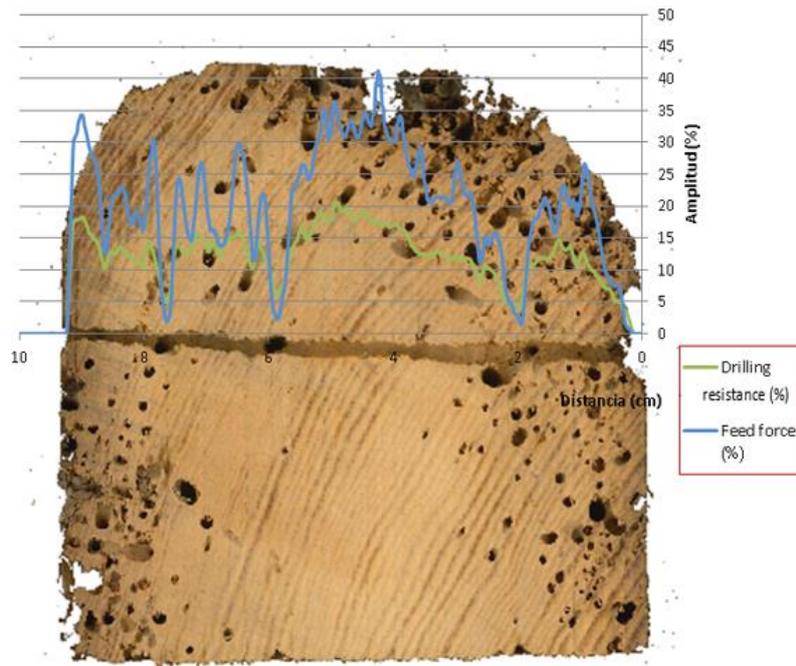


Figura 12. Análisis gráfico incisión n°4. Fuente: Elaboración propia.

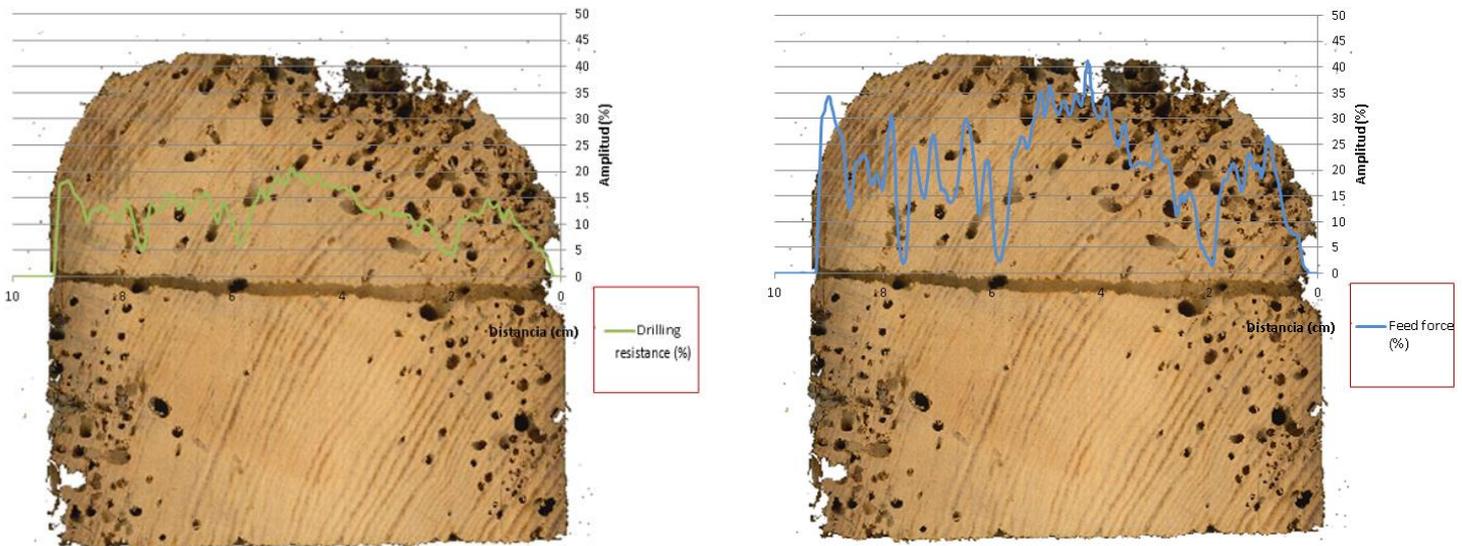


Figura 13. Análisis gráfico drill resistance y feed force incisión n°4. Fuente: Elaboración propia.

Observando los perfiles resistográficos y la imagen de la sección de la muestra se aprecia disminución de amplitud más brusca en la gráfica *feed force* que en la gráfica *drill resistance* al atravesar los diferentes orificios de carcoma fina.

2.2.1.2.- Análisis incisión número 5

La presencia de orificios de carcoma se detecta aproximadamente en las zonas de 0 a 4 centímetros, centímetro séptimo, decimo, onceavo, y zonas del decimoquinto al décimo octavo centímetro y del centímetro 21 al 22.

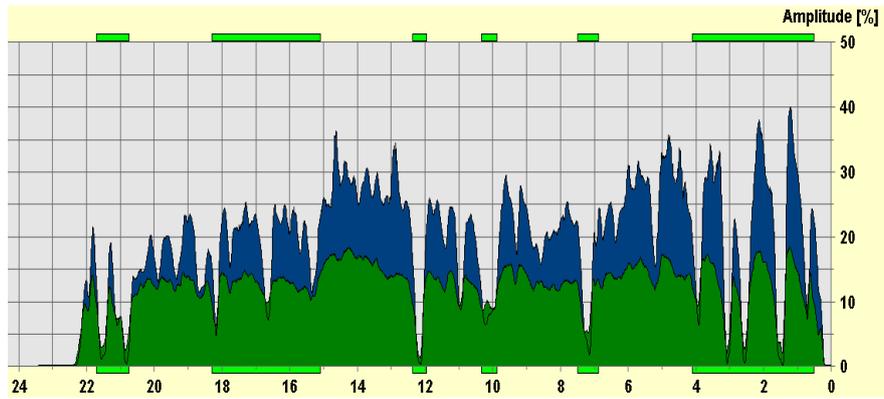


Figura 14. Gráficas feed force y drill resistance incisión n°5. Fuente: Elaboración propia.

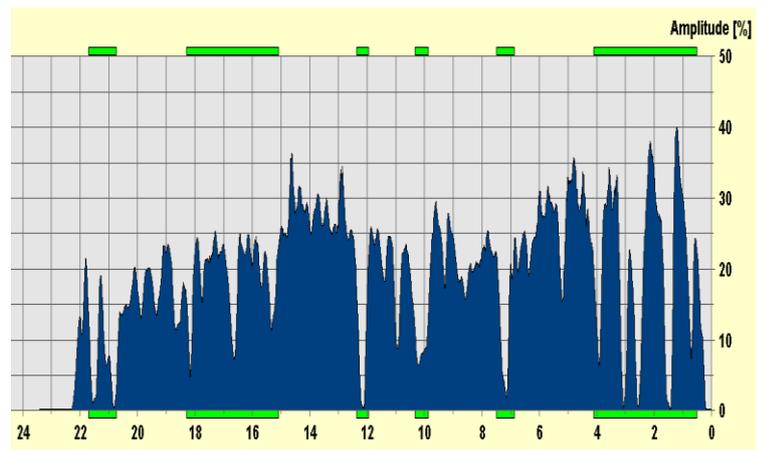
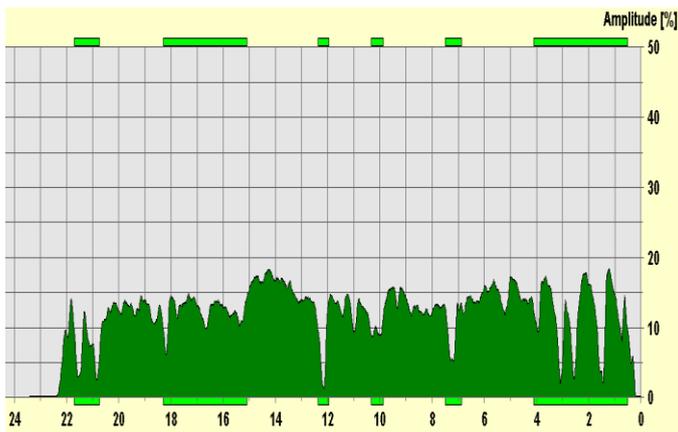


Figura 15. Gráfica drill resistance y feed force incisión n°4. Fuente: Elaboración propia.

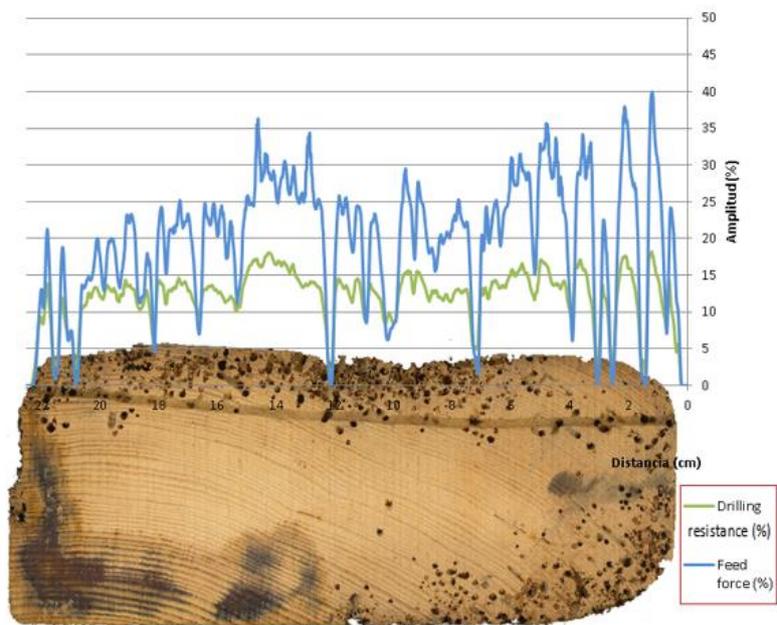


Figura 16. Análisis gráfico incisión n°5. Fuente: Elaboración propia.

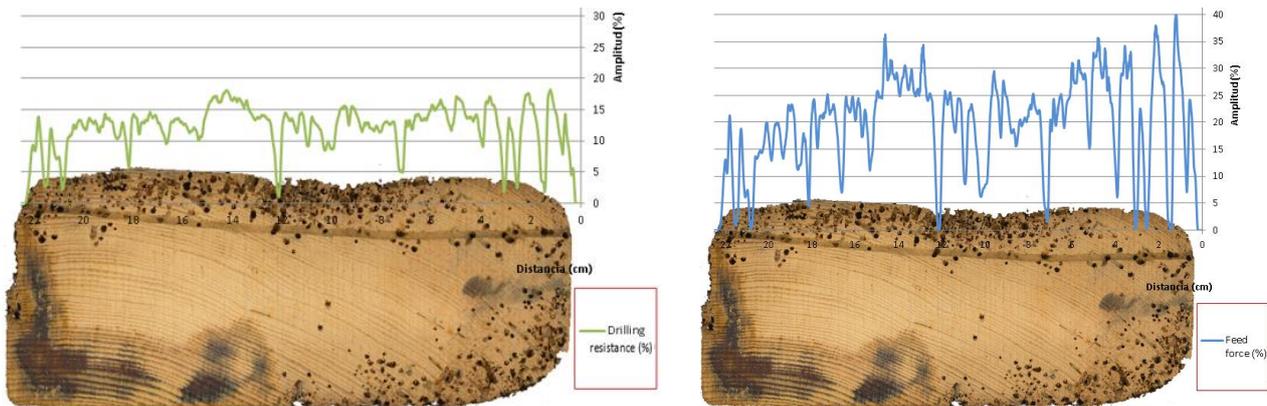


Figura 17. Análisis gráfico drill resistance y feed force incisión n°4. Fuente: Elaboración propia.

Observando los perfiles resistográficos y la imagen de la sección de la muestra se aprecia disminución de amplitud más brusca en la gráfica *feed force* que en la gráfica *drill resistance* al atravesar los diferentes orificios de carcoma fina.

2.3.- NUDOS

2.3.1.- MUESTRA 8_N3

Se representa en el gráfico del programa PD-Tools Pro mediante color morado el espacio que comprende el nudo, del centímetro 4,5 a 8.

2.3.1.1.- Incisión número 6

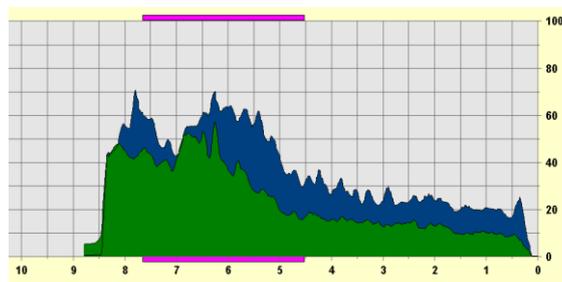


Figura 18. Gráficas feed force y drill resistance incisión n°6. Fuente: Elaboración propia.

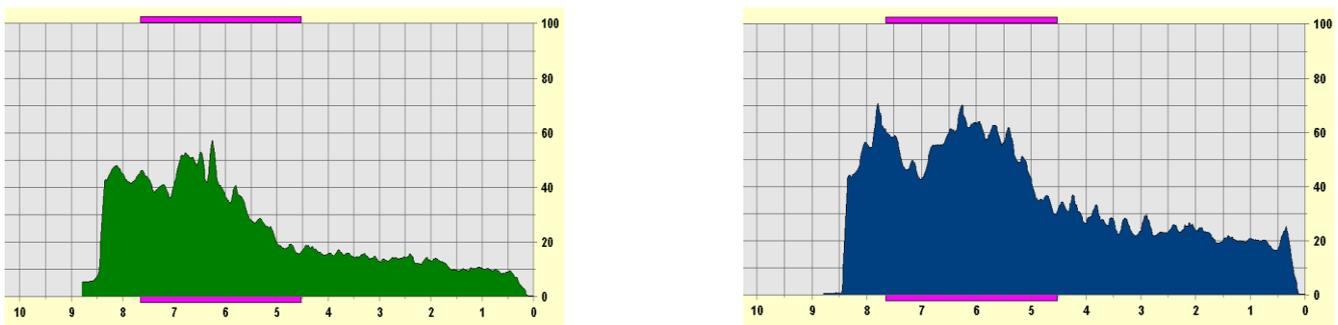


Figura 19. Gráfica drill resistance y feed force incisión n°6. Fuente: Elaboración propia.

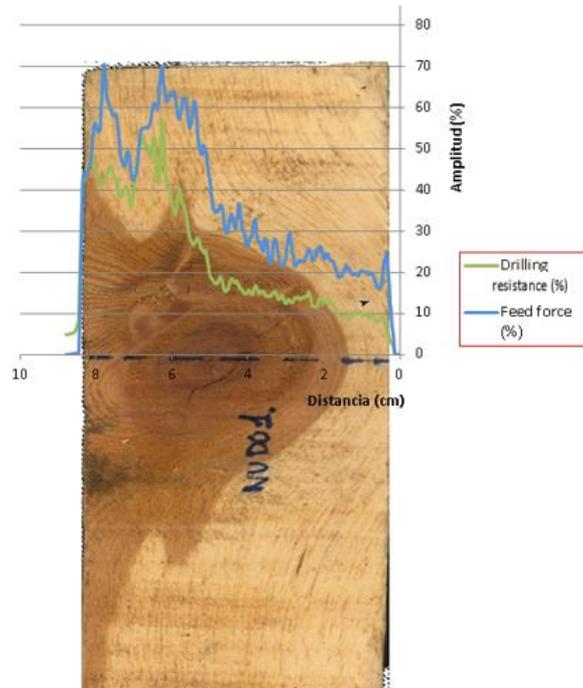


Figura 20. Análisis gráfico incisión n°6. Fuente: Elaboración propia.

Observando los perfiles resistográficos y la imagen de la sección de la muestra se aprecia un aumento de la amplitud resistográfica al atravesar la zona del nudo, en ambas gráficas. Al salir la broca se aprecia el efecto *soft-friction* en la gráfica *drill resistance*, sin embargo, caída brusca de la gráfica *feed force* a la salida de la muestra en el octavo centímetro.

2.3.1.2.- Incisión número 7

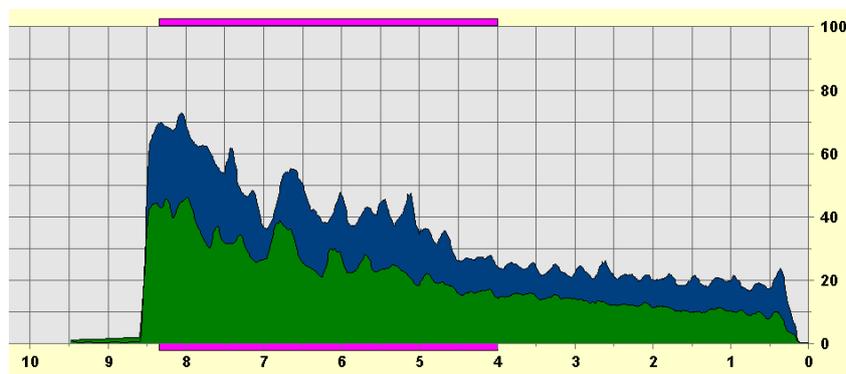


Figura 21. Gráficas *feed force* y *drill resistance* incisión n°7. Fuente: Elaboración propia.

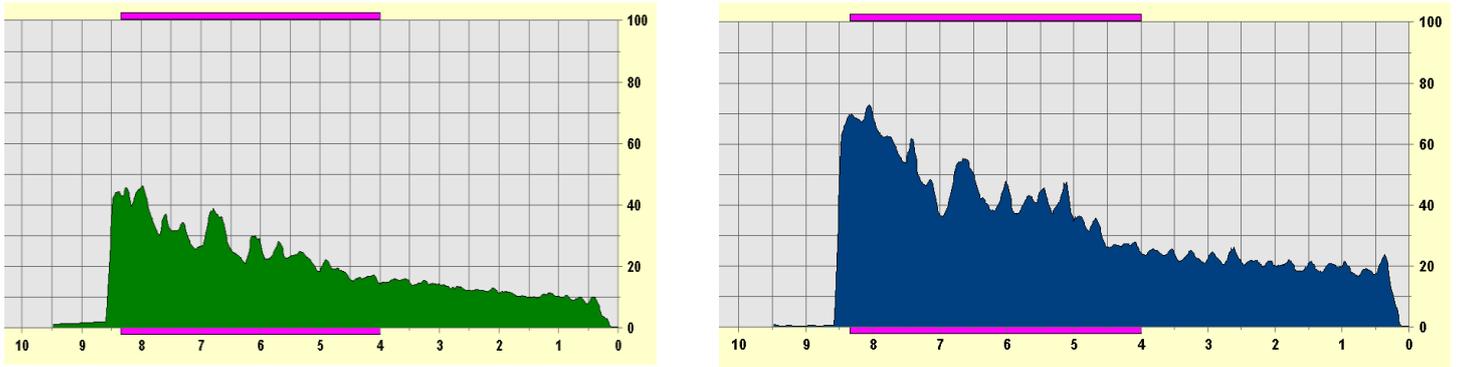


Figura 22. Gráfica drill resistance y feed force incisión n°7. Fuente: Elaboración propia.

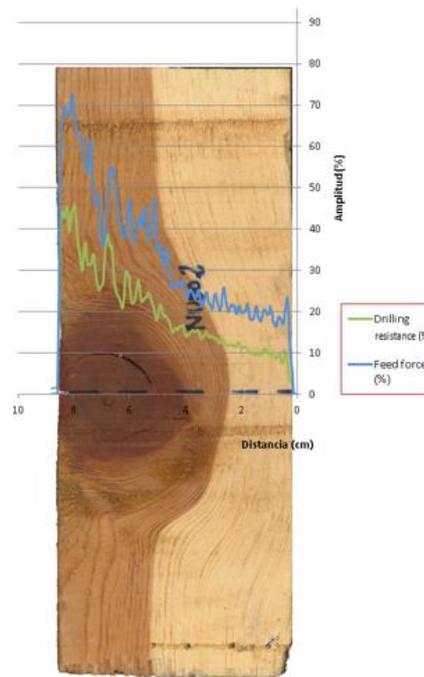


Figura 23. Análisis gráfico incisión n°7. Fuente: Elaboración propia.

Observando los perfiles resistográficos y la imagen de la sección de la muestra se aprecia un aumento de la amplitud resistográfica al atravesar la zona del nudo, en ambas gráficas. Al salir la broca se aprecia el efecto *soft-friction* en la gráfica *drill resistance*, sin embargo, caída brusca de la gráfica *feed force* a la salida de la muestra en el octavo centímetro.

2.3.2.- MUESTRA 1_N3

Se representa en el gráfico del programa PD-Tools Pro mediante color morado el espacio que comprende la zona del nudo, del centímetro 2,5 a 3,5.

2.3.2.1.- Incisión número 8

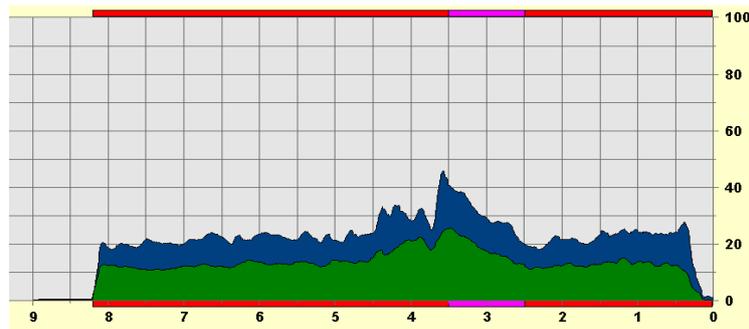


Figura 24. Gráficas feed force y drill resistance incisión nº8. Fuente: Elaboración propia.

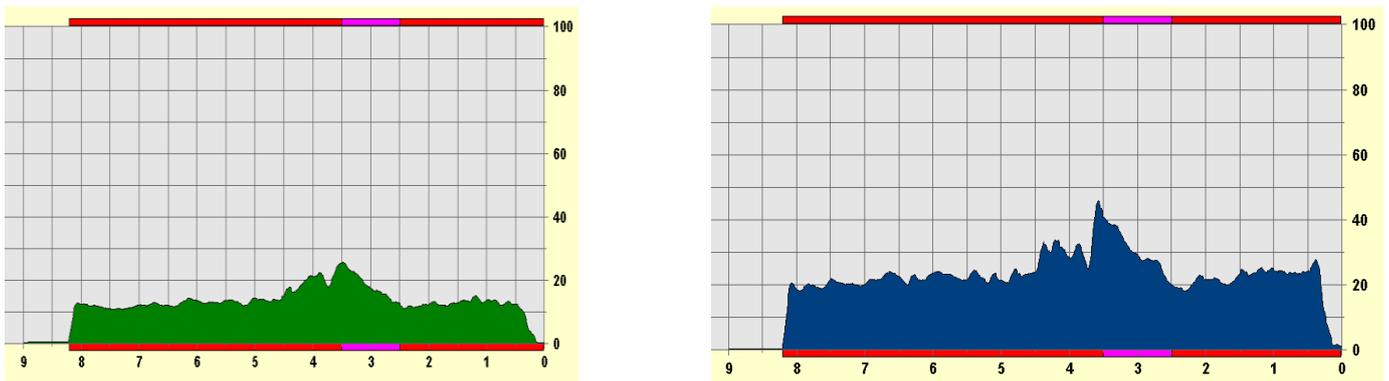


Figura 25. Gráfica drill resistance y feed force incisión nº8. Fuente: Elaboración propia.

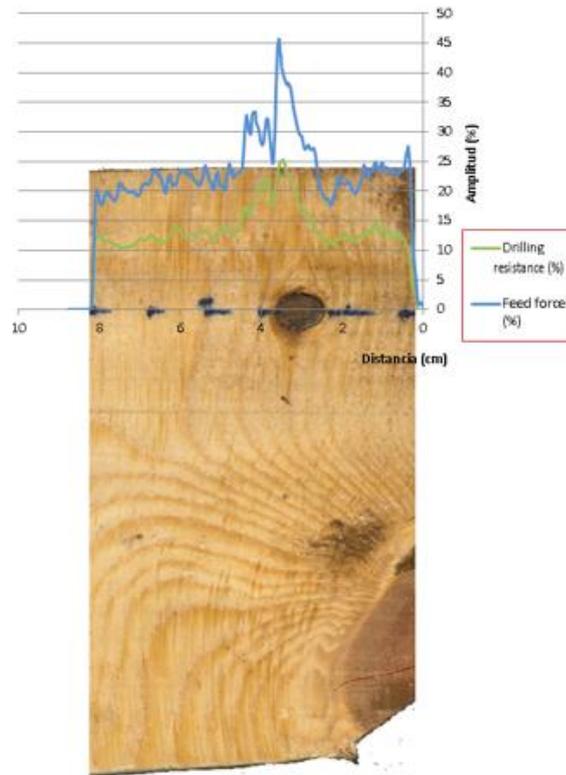


Figura 26. Análisis gráfico incisión nº8. Fuente: Elaboración propia.

Observando los perfiles resistográficos y la imagen de la sección de la muestra se aprecia un aumento de la amplitud resistográfica al atravesar la zona del nudo, en ambas gráficas. Al salir la broca se aprecia el efecto *soft-friction* en la gráfica *drill resistance*, sin embargo, caída brusca de la gráfica *feed force* a la salida de la muestra en el octavo centímetro.

2.4.- FENDAS

2.4.1.- MUESTRA 1_N4

Se representa en el gráfico del programa PD-Tools Pro mediante color amarillo el espacio que comprende la fenda, del centímetro 3,5 a 3,8.

2.4.1.1.- Incisión número 9

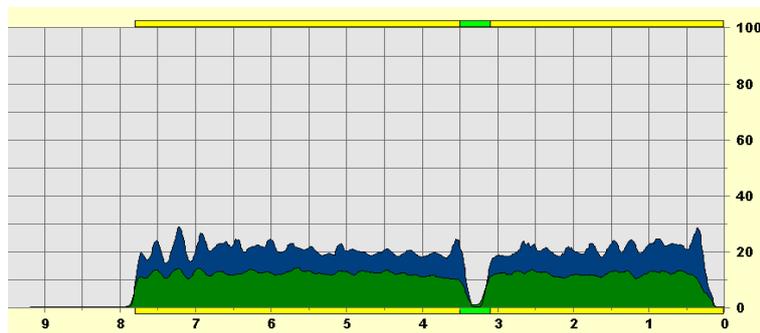


Figura 27. Gráficas feed force y drill resistance incisión nº9. Fuente: Elaboración propia.

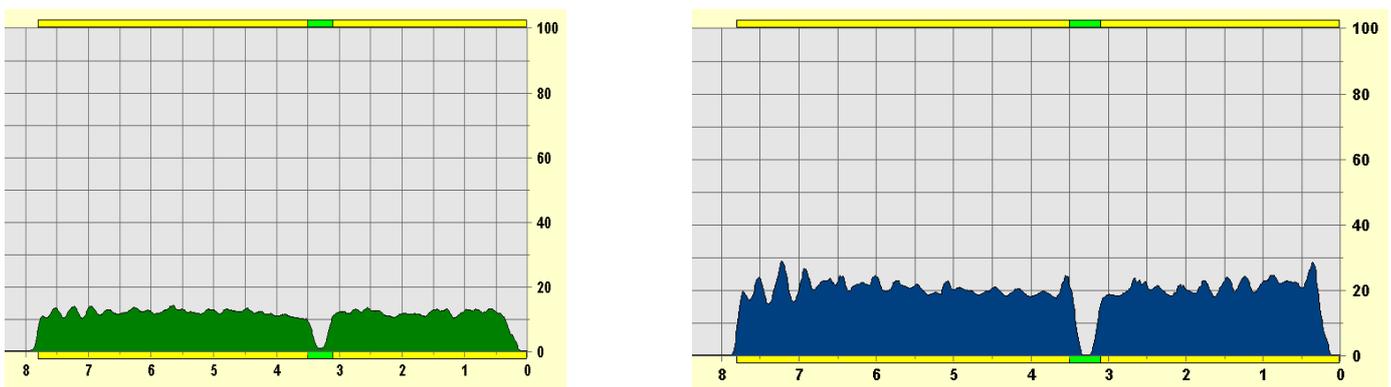


Figura 28. Gráfica drill resistance y feed force incisión nº9. Fuente: Elaboración propia.

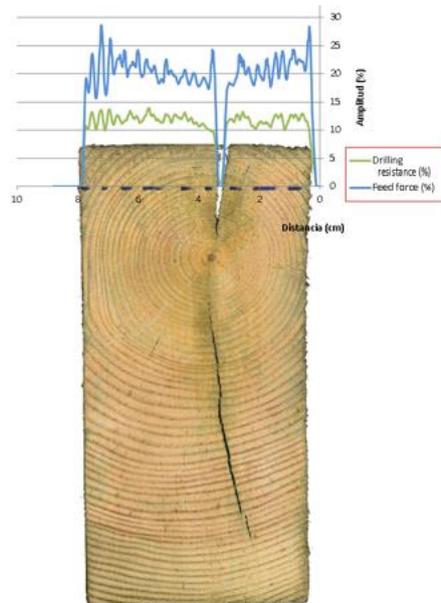


Figura 29. Análisis gráfico incisión nº9. Fuente: Elaboración propia.

Observando los perfiles resistográficos y la imagen de la sección de la muestra se aprecia el efecto *soft-friction*, ya que la amplitud de la gráfica *drill resistance* no disminuye del todo a su paso por la fenda, mientras que la gráfica *feed force* sí que llega a valores de amplitud igual a cero.

2.5.- ANILLOS

2.5.1.- MUESTRA 1_N5

2.5.1.1.- Incisión número 10

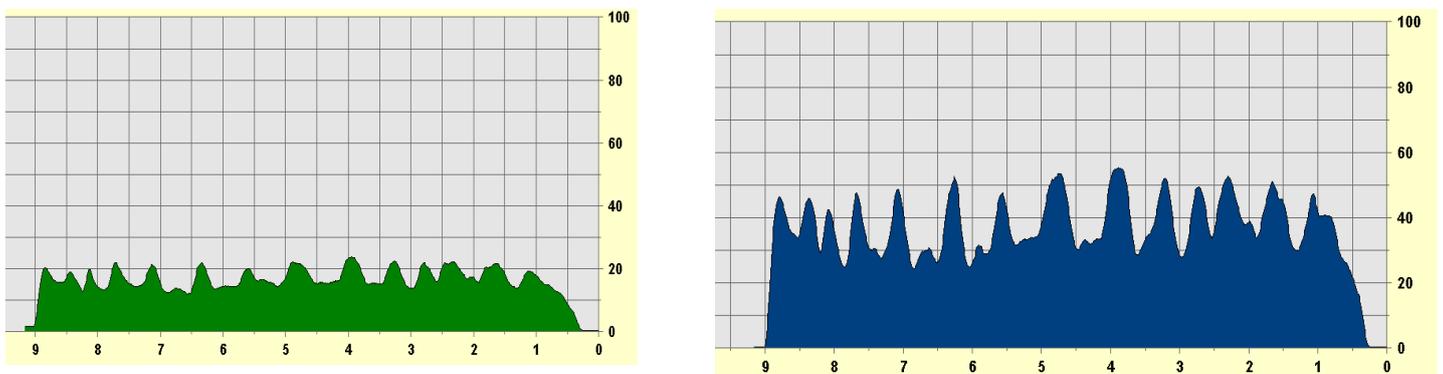


Figura 30. Gráfica *drill resistance* y *feed force* incisión nº10. Fuente: Elaboración propia.

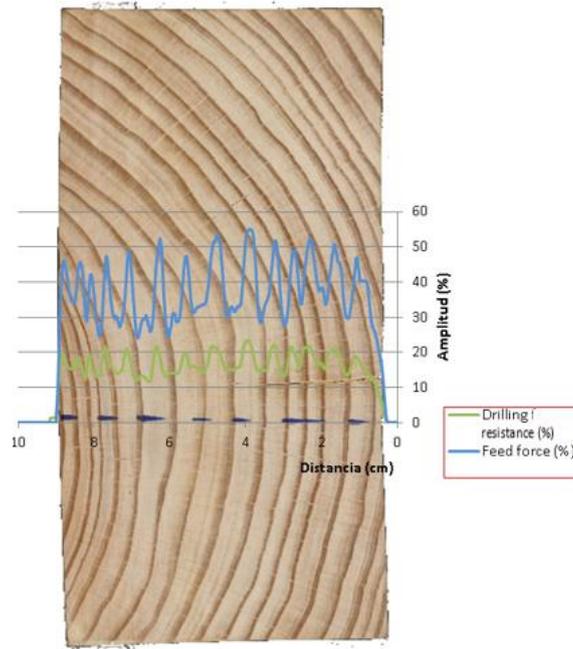


Imagen 1. Análisis gráfico incisión n°10. Fuente: Elaboración propia.

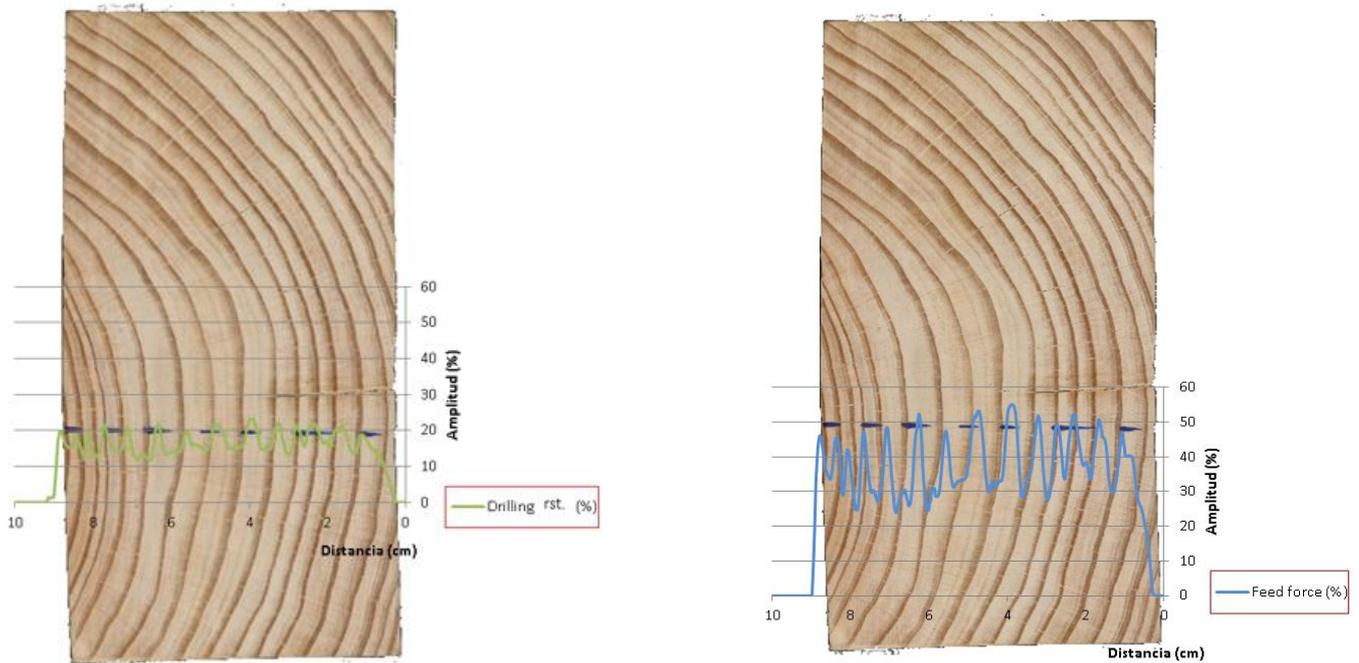


Figura 31. Análisis gráfico drill resistance y feed force incisión n°10. Fuente: Elaboración propia.

Observando los perfiles resistográficos y la imagen de la sección de la muestra se aprecia una caída de amplitud más brusca en la gráfica *feed force* que en la gráfica *drill resistance*, diferenciándose mejor los anillos de crecimiento de la muestra.

2.6.- CARCOMA GRUESA

2.6.1.- MUESTRA 1_N6

Se representa en el gráfico del programa PD-Tools Pro mediante color amarillo los orificios ocasionados por la carcoma gruesa.

2.6.1.1.- Incisión número 11

La presencia de orificios de carcoma se detecta aproximadamente en las zonas de 1 a 2 centímetros, centímetro cuarto, quinto y séptimo, y zonas del octavo al noveno centímetro y del centímetro 11.5 al 12.5.

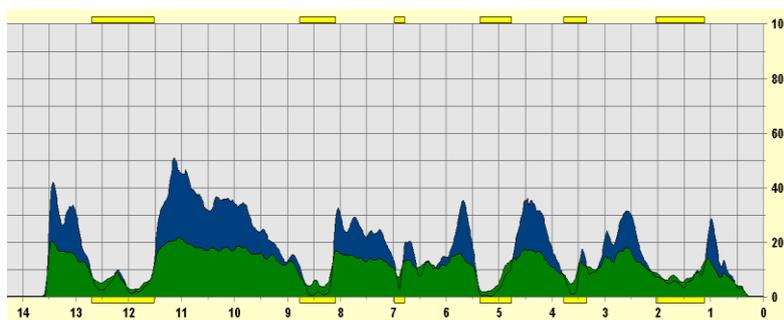


Figura 32. Gráficas feed force y drill resistance incisión nº11. Fuente: Elaboración propia.

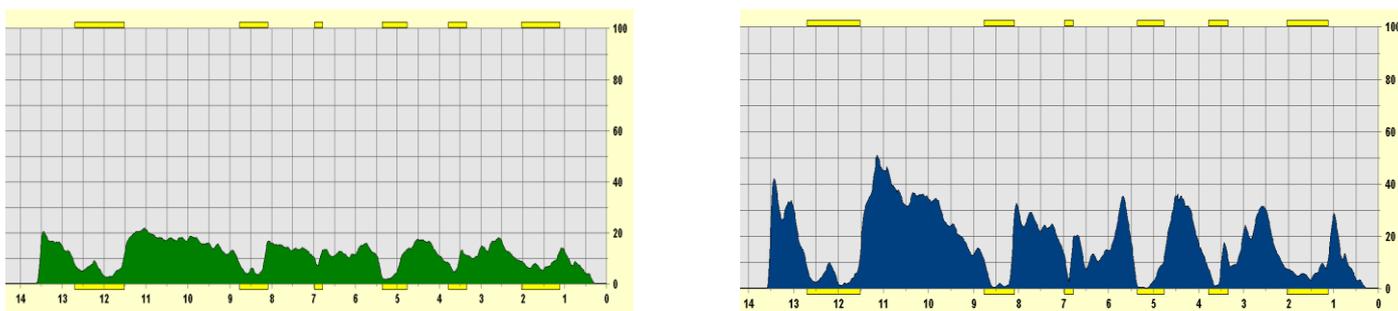


Figura 33. Gráfica drill resistance y feed force incisión nº11. Fuente: Elaboración propia.

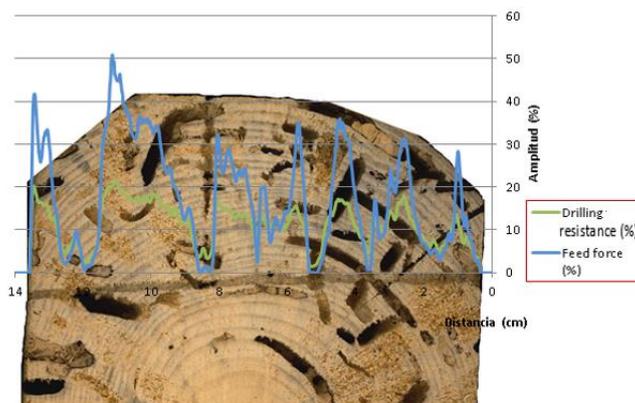


Figura 34. Análisis gráfico incisión nº11. Fuente: Elaboración propia.

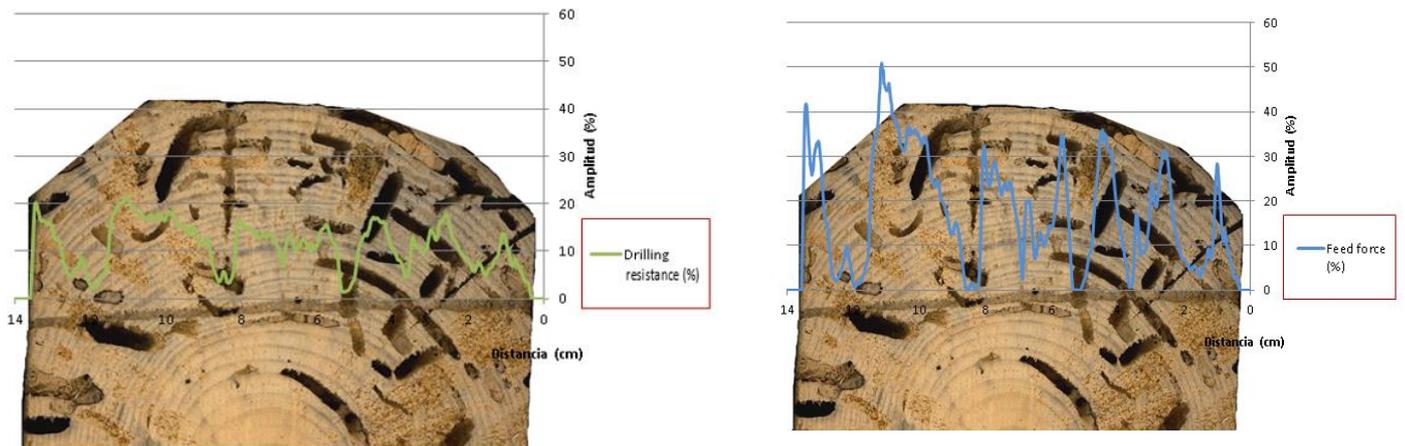


Figura 35. Análisis gráfico drill resistance y feed force incisión n°11. Fuente: Elaboración propia.

Observando los perfiles resistográficos y la imagen de la sección de la muestra se aprecia una disminución de amplitud más brusca en la gráfica *feed force* que en la gráfica *drill resistance* al atravesar los diferentes orificios de carcoma gruesa.

ANEXO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS SOBRE VIGAS.

ÍNDICE GENERAL

1.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MOE ESTÁTICO Y EL MOR ESTÁTICO EN FUNCIÓN DE VARIABLES Y PARÁMETROS DE LA MADERA	229
1.1.- ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD	230
1.1.1.- ANÁLISIS DEL MOE PARA LAS CUATRO ESPECIES	230
1.1.2.- ANÁLISIS DEL MOE PARA LA ESPECIE PINUS SYLVESTRIS	233
1.1.3.- ANÁLISIS DEL MOE PARA LA ESPECIE PINUS PINASTER.....	235
1.1.4.- ANÁLISIS DEL MOE PARA LA ESPECIE PINUS NIGRA.....	239
1.1.5.- ANÁLISIS DEL MOE PARA LA ESPECIE PINUS HALEPENSIS.....	241
1.2.- ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ROTURA/RESISTENCIA A FLEXIÓN	244
1.2.1.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LAS CUATRO ESPECIES	244
1.2.2.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LA ESPECIE PINUS SYLVESTRIS	246
1.2.3.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LA ESPECIE PINUS PINASTER	248
1.2.4.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LA ESPECIE PINUS NIGRA	251
1.2.5.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LA ESPECIE PINUS HALEPENSIS.....	253
2.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MOE-MOR ESTÁTICO (ENSAYO DESTRUCTIVO) EN FUNCIÓN DEL MOE Y MOR OBTENIDO MEDIANTE TND Y VARIABLES Y PARÁMETROS DE LA MADERA	256
2.1.- ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD	257
2.1.1.- ANÁLISIS DEL MOE PARA LAS CUATRO ESPECIES	257
2.1.2.- ANÁLISIS DEL MOE PARA LA ESPECIE PINUS SYLVESTRIS	260
2.1.3.- ANÁLISIS DEL MOE PARA LA ESPECIE PINUS PINASTER.....	262
2.1.4.- ANÁLISIS DEL MOE PARA LA ESPECIE PINUS NIGRA.....	264
2.1.5.- ANÁLISIS DEL MOE PARA LA ESPECIE PINUS HALEPENSIS.....	266
2.2.- ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ROTURA/RESISTENCIA A FLEXIÓN	269
2.2.1.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LAS CUATRO ESPECIES	269
2.2.2.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LA ESPECIE PINUS SYLVESTRIS	273
2.2.3.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LA ESPECIE PINUS PINASTER	275
2.2.4.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LA ESPECIE PINUS NIGRA	278

2.2.5.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LA ESPECIE PINUS HALEPENSIS.....280

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Muestras a analizar.....	229
Tabla 2. Modelos SPSS MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.....	230
Tabla 3. Resumen del modelo MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.	231
Tabla 4. ANOVA MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.	231
Tabla 5. Tabla coeficientes MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.	232
Tabla 6. Variables excluidas MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.	233
Tabla 7. Modelos SPSS MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.	233
Tabla 8. Resumen del modelo MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.	234
Tabla 9. ANOVA MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.....	234
Tabla 10. Coeficientes MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.	234
Tabla 11. Variables excluidas MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.	235
Tabla 12. Modelos SPSS MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.....	236
Tabla 13. Resumen del modelo MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.	236
Tabla 14. ANOVA MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.	237
Tabla 15. Coeficientes MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.....	237
Tabla 16. Variables excluidas MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.....	239
Tabla 17. Modelos SPSS MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio.	239

Tabla 18. Resumen del modelo MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio.	239
Tabla 19. ANOVA MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio.	240
Tabla 20. Coeficientes MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio.	240
Tabla 21. Variables excluidas MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio.	241
Tabla 22. Modelos SPSS MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.	241
Tabla 23. Resumen del modelo MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.	242
Tabla 24. ANOVA MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.	242
Tabla 25. Coeficientes MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.	243
Tabla 26. Variables excluidas MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.	243
Tabla 27. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.	244
Tabla 28. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.	244
Tabla 29. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.	245
Tabla 30. Tabla coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.	245
Tabla 31. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.	246
Tabla 32. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.	247
Tabla 33. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.	247
Tabla 34. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.	247
Tabla 35. Coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.	247

Tabla 36. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.248

Tabla 37. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.....249

Tabla 38. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.249

Tabla 39. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.249

Tabla 40. Coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.250

Tabla 41. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.....251

Tabla 42. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio.251

Tabla 43. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio.....252

Tabla 44. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio.252

Tabla 45. Coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio.252

Tabla 46. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio.....253

Tabla 47. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.253

Tabla 48. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.254

Tabla 49. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.....254

Tabla 50. Coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.255

Tabla 51. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.256

Tabla 52. Modelos SPSS MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.....257

Tabla 53. Resumen del modelo MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.....258

Tabla 54. ANOVA MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.....258

Tabla 55. Tabla coeficientes MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.259

Tabla 56. Variables excluidas MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.260

Tabla 57. Modelos SPSS MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.261

Tabla 58. Resumen del modelo MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.261

Tabla 59. ANOVA MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.261

Tabla 60. Tabla coeficientes MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.261

Tabla 61. Variables excluidas MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.262

Tabla 62. Modelos SPSS MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.263

Tabla 63. Resumen del modelo MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.....263

Tabla 64. ANOVA MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.....263

Tabla 65. Tabla coeficientes MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.264

Tabla 66. Variables excluidas MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.264

Tabla 67. Modelos SPSS MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.265

Tabla 68. Resumen del modelo MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.....265

Tabla 69. ANOVA MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.....265

Tabla 70. Tabla coeficientes MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.266

Tabla 71. Variables excluidas MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.266

Tabla 72. Modelos SPSS MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.	267
Tabla 73. Resumen del modelo MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.	267
Tabla 74. ANOVA MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.	268
Tabla 75. Tabla coeficientes MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.	268
Tabla 76. Variables excluidas MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.	269
Tabla 77. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.....	270
Tabla 78. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.	270
Tabla 79. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.	271
Tabla 80. Tabla coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.	271
Tabla 81. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies.	273
Tabla 82. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.	274
Tabla 83. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.	274
Tabla 84-. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.	274
Tabla 85. Coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.	275
Tabla 86. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre.	275
Tabla 87. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.....	276
Tabla 88. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.	276
Tabla 89. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.	277

Tabla 90. Coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.....	277
Tabla 91. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero.....	278
Tabla 92. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio.	279
Tabla 93. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio.....	279
Tabla 94. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio.	279
Tabla 95. Coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio.	279
Tabla 96. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio.	280
Tabla 97. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.	281
Tabla 98. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.	281
Tabla 99. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.....	282
Tabla 100. Coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.	282
Tabla 101. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco.	283

1.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MOE ESTÁTICO Y EL MOR ESTÁTICO EN FUNCIÓN DE VARIABLES Y PARÁMETROS DE LA MADERA

Se procede a realizar análisis multivariantes con el programa informático SPSS y las variables dependientes *MOE Global flexión* y *MOR Resistencia flexión* y las variables independientes *especie*, *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *Feed V 0.5*, *Feed H 0.5*, *Drill V 0.5*, *Drill H 0.5*, *velocidad ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR viga completa*, *CKDR zona central*.

Las vigas estudiadas y sus dimensiones se resumen en la tabla 1:

Especie	Dimensiones nominales (mm)	Nº muestras
Pinus sylvestris	180 x 80 x 4000	15
Pinus nigra	180 x 80 x 4000	15
Pinus pinaster	180 x 80 x 4000	15
Pinus halepensis	180 x 80 x 4000	16
TOTAL		61

Tabla 1. Muestras a analizar. Fuente: Elaboración propia.

El análisis estadístico se compone de un total de 61 muestras que incluye las cuatro especies del género *Pinus*. Las variables son todas continuas, exceptuando la variable *Especie* que es discreta.

Para el análisis estadístico la variable especie se registra como:

Pino silvestre= 1

Pino resinero = 2

Pino laricio = 3

Pino carrasco = 4

1.1.- ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

1.1.1- ANÁLISIS DEL MOE PARA LAS CUATRO ESPECIES

Se analizaron para las muestras de las cuatro especies, mediante regresión lineal, la variable dependiente *MOE global flexión* en función de las variables independientes *especie, densidad real, % albura, % duramen, feed H 0.5, feed V 0.5, drill H 0.5, drill V 0.5, velocidad Ultrasonidos media, n° nudos total, n° nudos zona central, CKDR zona central, CKDR viga completa.*

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recogen como variables significativas *Velocidad Ultrasonidos media, % duramen y feed H 0.5.*

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método
1	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
2	Feed H 0,5		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
3	% Duramen		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

Tabla 2. Modelos SPSS MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo así ajustado explica el 72,8% de la variabilidad en MOE global flexión (N/mm²).

Resumen del modelo ^d					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,662 ^a	,438	,429	1830,67442553 3710000	
2	,836 ^b	,698	,688	1353,52034474 1908300	
3	,853 ^c	,728	,714	1295,91003815 7972000	1,758

a. Predictores: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s)

b. Predictores: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s), Feed H 0,5
c. Predictores: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s), Feed H 0,5, % Duramen
d. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)

Tabla 3. Resumen del modelo MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo 3 puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	154313909,264	1	154313909,264	46,045	,000 ^b
	Residuo	197730762,286	59	3351368,852		
	Total	352044671,550	60			
2	Regresión	245787666,780	2	122893833,390	67,081	,000 ^c
	Residuo	106257004,771	58	1832017,324		
	Total	352044671,550	60			
3	Regresión	256319850,411	3	85439950,137	50,876	,000 ^d
	Residuo	95724821,139	57	1679382,827		
	Total	352044671,550	60			
a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)						
b. Predictores: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s)						
c. Predictores: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s), Feed H 0,5						
d. Predictores: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s), Feed H 0,5, % Duramen						

Tabla 4. ANOVA MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente *MOE global flexión* (N/mm²) = -17900,217 + 17,221*% Duramen + 257,436*Feed H 0,5 + 4,839*Velocidad Ultrasonidos media (m/s)

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	-10670,646	3383,944		-3,153	,003
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	4,854	,715	,662	6,786	,000
2	(Constante)	-15889,362	2608,670		-6,091	,000
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	4,880	,529	,666	9,225	,000
	Feed H 0,5	197,543	27,956	,510	7,066	,000
3	(Constante)	-17900,217	2623,535		-6,823	,000

	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	4,839	,507	,660	9,550	,000
	Feed H 0,5	257,436	35,895	,664	7,172	,000
	% Duramen	17,221	6,876	,232	2,504	,015

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

Tabla 5. Tabla coeficientes MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo		En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad
						Tolerancia
1	Densidad real (Kg/m ³)	,462 ^b	5,647	,000	,596	,932
	% Albura	,211 ^b	2,231	,030	,281	,999
	% Duramen	-,211 ^b	-2,231	,030	-,281	,999
	Feed V 0,5	,498 ^b	6,703	,000	,661	,987
	Feed H 0,5	,510 ^b	7,066	,000	,680	1,000
	Drill V 0,5	,466 ^b	6,037	,000	,621	,998
	Drill H 0,5	,507 ^b	6,994	,000	,676	1,000
	Nº nudos total	-,110 ^b	-1,008	,318	-,131	,796
	Nº nudos zona central	,002 ^b	,022	,982	,003	,803
	CKDR viga completa	-,098 ^b	-,827	,411	-,108	,678
	CKDR zona central	-,047 ^b	-,390	,698	-,051	,675
	Especie	,333 ^b	3,459	,001	,414	,867
2	Densidad real (Kg/m ³)	,156 ^c	1,408	,164	,183	,417
	% Albura	-,232 ^c	-2,504	,015	-,315	,556
	% Duramen	,232 ^c	2,504	,015	,315	,556
	Feed V 0,5	,138 ^c	,646	,521	,085	,115
	Drill V 0,5	-,139 ^c	-,636	,527	-,084	,110
	Drill H 0,5	,227 ^c	,917	,363	,121	,085
	Nº nudos total	,021 ^c	,255	,799	,034	,755
	Nº nudos zona central	,088 ^c	1,079	,285	,141	,785
	CKDR viga completa	-,086 ^c	-,977	,333	-,128	,678
	CKDR zona central	-,076 ^c	-,859	,394	-,113	,674
	Especie	-,134 ^c	-1,193	,238	-,156	,412
	3	Densidad real (Kg/m ³)	,119 ^d	1,103	,275	,146
% Albura		. ^d	.	.	.	,000
Feed V 0,5		,324 ^d	1,532	,131	,201	,104
Drill V 0,5		-,093 ^d	-,443	,659	-,059	,109
Drill H 0,5		,160 ^d	,666	,508	,089	,084

	Nº nudos total	-,003 ^d	-,037	,971	-,005	,744
	Nº nudos zona central	,066 ^d	,844	,402	,112	,775
	CKDR viga completa	-,062 ^d	-,736	,465	-,098	,669
	CKDR zona central	-,056 ^d	-,661	,512	-,088	,668
	Especie	-,003 ^d	-,026	,979	-,004	,315
a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)						
b. Predictores en el modelo: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s)						
c. Predictores en el modelo: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s), Feed H 0,5						
d. Predictores en el modelo: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s), Feed H 0,5, % Duramen						

Tabla 6. Variables excluidas MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos para los análisis con todo el conjunto de muestras de las cuatro especies se puede concluir que la variable *Velocidad Sylvatest media* es buena predictora del *MOE global flexión* y los valores de resistografía y porcentaje de albura también proporcionan buena relación con el *MOE global flexión*.

1.1.2.- ANÁLISIS DEL MOE PARA LA ESPECIE PINUS SYLVESTRIS

Se analizaron para las muestras de la especie pino silvestre, mediante regresión lineal, la variable dependiente *MOE global flexión* en función de las variables independientes *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *feed H 0.5*, *feed V 0.5*, *drill H 0.5*, *drill V 0.5*, *velocidad Ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR zona central*, *CKDR viga completa*.

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recogen como variables significativas solo la *Velocidad Ultrasonidos media*.

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método
1	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)			

Tabla 7. Modelos SPSS MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo así ajustado explica el 52.2 % de la variabilidad en MOE global flexión (N/mm²).

Resumen del modelo ^a				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación

1	,723 ^a	,522	,485	1303,38947535 6074900
---	-------------------	------	------	--------------------------

a. Predictores: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s)

Tabla 8. Resumen del modelo MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo 1 puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	24118263,417	1	24118263,417	14,197	,002 ^b
	Residuo	22084713,618	13	1698824,124		
	Total	46202977,035	14			

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

b. Predictores: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s)

Tabla 9. ANOVA MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente MOE global flexión (N/mm²) = -15927,5 + 5,797*Velocidad Ultrasonidos media (m/s)

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	-15927,479	7569,547		-2,104	,055
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	5,797	1,539	,723	3,768	,002

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

Tabla 10. Coeficientes MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo		En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad
						Tolerancia
1	Densidad real (Kg/m ³)	,174 ^b	,887	,393	,248	,972
	% Albura	-,053 ^b	-,264	,796	-,076	,973
	% Duramen	,053 ^b	,264	,796	,076	,973

Feed V 0,5	,284 ^b	1,448	,173	,386	,880
Feed H 0,5	,264 ^b	1,389	,190	,372	,948
Drill V 0,5	,216 ^b	1,030	,323	,285	,831
Drill H 0,5	,161 ^b	,788	,446	,222	,909
Nº nudos total	-,115 ^b	-,576	,575	-,164	,974
Nº nudos zona central	-,076 ^b	-,385	,707	-,110	,998
CKDR viga completa	-,096 ^b	-,473	,645	-,135	,954
CKDR zona central	-,071 ^b	-,354	,729	-,102	,989

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

b. Predictores en el modelo: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s)

Tabla 11. Variables excluidas MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos para los análisis con todo el conjunto de muestras de la especie pino silvestre se puede concluir que la variable *Velocidad Sylvatest media* es la única predictora del *MOE global flexión*.

1.1.3.- ANÁLISIS DEL MOE PARA LA ESPECIE PINUS PINASTER

Se analizaron para las muestras de las especies de pino pinaster, mediante regresión lineal, la variable dependiente *MOE global flexión* en función de las variables independientes *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *feed H 0.5*, *feed V 0.5*, *drill H 0.5*, *drill V 0.5*, *velocidad Ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR zona central*, *CKDR viga completa*.

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recogen como variables significativas *Velocidad Ultrasonidos media*, *densidad real*, *feed V 0.5* y *nº nudos total*.

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método
1	Densidad real (Kg/m ³)		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
2	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
3	Feed V 0,5		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
4	Nº nudos total		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

Tabla 12. Modelos SPSS MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación R² indica que el modelo así ajustado explica 95.1 % de la variabilidad en MOE global flexión (N/mm²).

Resumen del modelo				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,724 ^a	,524	,488	1312,839476731847000
2	,903 ^b	,815	,784	852,114178643920200
3	,943 ^c	,890	,859	687,721709199197200
4	,975 ^d	,951	,931	482,582104464262800
a. Predictores: (Constante), Densidad real (Kg/m ³)				
b. Predictores: (Constante), Densidad real (Kg/m ³), Velocidad Ultrasonidos media (m/s)				
c. Predictores: (Constante), Densidad real (Kg/m ³), Velocidad Ultrasonidos media (m/s), Feed V 0,5				
d. Predictores: (Constante), Densidad real (Kg/m ³), Velocidad Ultrasonidos media (m/s), Feed V 0,5, N° nudos total				

Tabla 13. Resumen del modelo MOE estático en función de variables y parámetros de la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo 4 puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	24680011,094	1	24680011,094	14,319	,002 ^b
	Residuo	22406117,392	13	1723547,492		
	Total	47086128,485	14			
2	Regresión	38372945,604	2	19186472,802	26,424	,000 ^c
	Residuo	8713182,881	12	726098,573		
	Total	47086128,485	14			
3	Regresión	41883555,843	3	13961185,281	29,519	,000 ^d
	Residuo	5202572,642	11	472961,149		
	Total	47086128,485	14			
4	Regresión	44757273,610	4	11189318,402	48,046	,000 ^e
	Residuo	2328854,875	10	232885,488		
	Total	47086128,485	14			
a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)						
b. Predictores: (Constante), Densidad real (Kg/m ³)						
c. Predictores: (Constante), Densidad real (Kg/m ³), Velocidad Ultrasonidos media (m/s)						

d. Predictores: (Constante), Densidad real (Kg/m ³), Velocidad Ultrasonidos media (m/s), Feed V 0,5
e. Predictores: (Constante), Densidad real (Kg/m ³), Velocidad Ultrasonidos media (m/s), Feed V 0,5, N° nudos total

Tabla 14. ANOVA MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente MOE global flexión (N/mm²) = -28407,4 + 49,2512*Densidad real (Kg/m³) - 392,502*Feed V 0,5 - 59,6842*N° nudos total + 5,66412*Velocidad Ultrasonidos media (m/s)

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	1079,860	3024,831		,357	,727
	Densidad real (Kg/m ³)	21,158	5,591	,724	3,784	,002
2	(Constante)	-24030,938	6106,636		-3,935	,002
	Densidad real (Kg/m ³)	22,327	3,639	,764	6,135	,000
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	5,114	1,178	,541	4,343	,001
3	(Constante)	-27765,156	5115,564		-5,428	,000
	Densidad real (Kg/m ³)	41,227	7,533	1,411	5,473	,000
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	5,328	,954	,563	5,587	,000
	Feed V 0,5	-246,001	90,294	-,701	-2,724	,020
4	(Constante)	-28407,383	3594,302		-7,903	,000
	Densidad real (Kg/m ³)	49,251	5,759	1,685	8,553	,000
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	5,664	,676	,599	8,379	,000
	Feed V 0,5	-392,502	75,854	-1,118	-5,174	,000
	N° nudos total	-59,684	16,991	-,317	-3,513	,006

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

Tabla 15. Coeficientes MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo		En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad
						Tolerancia
1	% Albura	-,177 ^b	-,915	,378	-,256	,987

	% Duramen	,177 ^b	,915	,378	,256	,987
	Feed V 0,5	-,582 ^b	-1,210	,249	-,330	,153
	Feed H 0,5	,095 ^b	,256	,803	,074	,287
	Drill V 0,5	,012 ^b	,023	,982	,007	,153
	Drill H 0,5	-,536 ^b	-1,234	,241	-,336	,186
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	,541 ^b	4,343	,001	,782	,995
	Nº nudos total	-,017 ^b	-,082	,936	-,024	,875
	Nº nudos zona central	-,014 ^b	-,068	,947	-,020	,982
	CKDR viga completa	-,091 ^b	-,393	,701	-,113	,735
	CKDR zona central	-,128 ^b	-,596	,562	-,170	,830
2	% Albura	-,076 ^c	-,578	,575	-,172	,950
	% Duramen	,076 ^c	,578	,575	,172	,950
	Feed V 0,5	-,701 ^c	-2,724	,020	-,635	,152
	Feed H 0,5	-,028 ^c	-,117	,909	-,035	,283
	Drill V 0,5	-,421 ^c	-1,306	,218	-,366	,140
	Drill H 0,5	-,296 ^c	-1,007	,335	-,291	,179
	Nº nudos total	-,060 ^c	-,437	,670	-,131	,870
	Nº nudos zona central	-,014 ^c	-,106	,918	-,032	,982
	CKDR viga completa	-,075 ^c	-,499	,628	-,149	,734
	CKDR zona central	-,082 ^c	-,586	,570	-,174	,825
3	% Albura	,262 ^d	1,990	,075	,533	,457
	% Duramen	-,262 ^d	-1,990	,075	-,533	,457
	Feed H 0,5	,595 ^d	3,092	,011	,699	,152
	Drill V 0,5	,819 ^d	1,661	,128	,465	,036
	Drill H 0,5	,332 ^d	,983	,349	,297	,088
	Nº nudos total	-,317 ^d	-3,513	,006	-,743	,607
	Nº nudos zona central	-,203 ^d	-1,947	,080	-,524	,734
	CKDR viga completa	-,296 ^d	-2,842	,017	-,668	,565
	CKDR zona central	-,293 ^d	-3,123	,011	-,703	,637
4	% Albura	-,094 ^e	-,515	,619	-,169	,160
	% Duramen	,094 ^e	,515	,619	,169	,160
	Feed H 0,5	,350 ^e	1,766	,111	,507	,104
	Drill V 0,5	,552 ^e	1,540	,158	,457	,034
	Drill H 0,5	,135 ^e	,532	,607	,175	,083
	Nº nudos zona central	,121 ^e	,801	,444	,258	,224
	CKDR viga completa	,172 ^e	,553	,594	,181	,055
	CKDR zona central	-,075 ^e	-,358	,729	-,118	,122
a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)						
b. Predictores en el modelo: (Constante), Densidad real (Kg/m ³)						
c. Predictores en el modelo: (Constante), Densidad real (Kg/m ³), Velocidad Ultrasonidos media (m/s)						

d. Predictores en el modelo: (Constante), Densidad real (Kg/m ³), Velocidad Ultrasonidos media (m/s), Feed V 0,5
e. Predictores en el modelo: (Constante), Densidad real (Kg/m ³), Velocidad Ultrasonidos media (m/s), Feed V 0,5, N° nudos total

Tabla 16. Variables excluidas MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos para los análisis con todo el conjunto de muestras de la especie pino resinero se puede concluir que la variable *Velocidad Sylvatest media*, *Feed V 0.5*, *Densidad Real* y *n° nudos total* son variables predictoras del *MOE global flexión*.

1.1.4.- ANÁLISIS DEL MOE PARA LA ESPECIE PINUS NIGRA

Se analizaron para las muestras de las especies de pino laricio, mediante regresión lineal, la variable dependiente *MOE global flexión* en función de las variables independientes *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *feed H 0.5*, *feed V 0.5*, *drill H 0.5*, *drill V 0.5*, *velocidad Ultrasonidos media*, *n° nudos total*, *n° nudos zona central*, *CKDR zona central*, *CKDR viga completa*.

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recogen como variables significativas solo la *velocidad Ultrasonidos media*.

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método
1	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)			

Tabla 17. Modelos SPSS MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación R² indica que el modelo así ajustado explica 72.9 % de la variabilidad en MOE global flexión (N/mm²).

Resumen del modelo				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,854 ^a	,729	,708	1137,45128139 5026600
a. Predictores: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s)				

Tabla 18. Resumen del modelo MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo 1 puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	45222071,141	1	45222071,141	34,953	,000 ^b
	Residuo	16819340,428	13	1293795,418		
	Total	62041411,569	14			
a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)						
b. Predictores: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s)						

Tabla 19. ANOVA MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente MOE global flexión (N/mm²) = -10011,7 + 4,47387*Velocidad Ultrasonidos media (m/s)

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	-10011,684	3447,228		-2,904	,012
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	4,474	,757	,854	5,912	,000
a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)						

Tabla 20. Coeficientes MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo		En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad
						Tolerancia
1	Densidad real (Kg/m ³)	,193 ^b	1,317	,212	,355	,923
	% Albura	,026 ^b	,126	,902	,036	,512
	% Duramen	-,026 ^b	-,126	,902	-,036	,512
	Feed V 0,5	,182 ^b	1,191	,257	,325	,866
	Feed H 0,5	,121 ^b	,811	,433	,228	,957
	Drill V 0,5	,102 ^b	,681	,509	,193	,968

Drill H 0,5	,120 ^b	,820	,428	,230	1,000
Nº nudos total	,094 ^b	,522	,611	,149	,678
Nº nudos zona central	,106 ^b	,653	,526	,185	,822
CKDR viga completa	-,070 ^b	-,387	,706	-,111	,682
CKDR zona central	-,176 ^b	-1,005	,335	-,279	,678
a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)					
b. Predictores en el modelo: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s)					

Tabla 21. Variables excluidas MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos para los análisis con todo el conjunto de muestras de la especie pino laricio se puede concluir que la variable *Velocidad Sylvatest media* es la única predictora del *MOE global flexión*.

1.1.5.- ANÁLISIS DEL MOE PARA LA ESPECIE PINUS HALEPENSIS

Se analizaron para las muestras de las especies de pino carrasco, mediante regresión lineal, la variable dependiente *MOE global flexión* en función de las variables independientes *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *feed H 0.5*, *feed V 0.5*, *drill H 0.5*, *drill V 0.5*, *velocidad Ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR zona central*, *CKDR viga completa*.

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recogen como variables significativas la *velocidad Ultrasonidos media* y *% albura*.

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método
1	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	.	Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
2	% Albura	.	Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)			

Tabla 22. Modelos SPSS MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo así ajustado explica 70.9 % de la variabilidad en MOE global flexión (N/mm²).

Resumen del modelo ^c					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson

1	,732 ^a	,536	,503	1913,72235713 4969600	
2	,842 ^b	,709	,665	1571,36110026 0446000	1,982
a. Predictores: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s)					
b. Predictores: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s), % Albura					
c. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)					

Tabla 23. Resumen del modelo MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo 2 puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	59171008,280	1	59171008,280	16,157	,001 ^b
	Residuo	51272665,643	14	3662333,260		
	Total	110443673,923	15			
2	Regresión	78344389,727	2	39172194,863	15,864	,000 ^c
	Residuo	32099284,196	13	2469175,707		
	Total	110443673,923	15			
a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)						
b. Predictores: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s)						
c. Predictores: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s), % Albura						

Tabla 24. ANOVA MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente MOE global flexión (N/mm²) = -7578,032 + 9,511*Velocidad Ultrasonidos media (m/s) - 242,150*% Albura

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	-12992,016	6619,195		-1,963	,070
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	5,720	1,423	,732	4,020	,001
2	(Constante)	-7578,032	5771,857		-1,313	,212
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	9,511	1,793	1,217	5,304	,000

	% Albura	-242,150	86,898	-,639	-2,787	,015
--	----------	----------	--------	-------	--------	------

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

Tabla 25. Coeficientes MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo		En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad
						Tolerancia
1	Densidad real (Kg/m ³)	,177 ^b	,968	,351	,259	,999
	% Albura	-,639 ^b	-2,787	,015	-,612	,425
	% Duramen	,639 ^b	2,787	,015	,612	,425
	Feed V 0,5	,251 ^b	1,400	,185	,362	,967
	Feed H 0,5	,158 ^b	,640	,533	,175	,570
	Drill V 0,5	-,135 ^b	-,648	,528	-,177	,795
	Drill H 0,5	,229 ^b	1,106	,289	,293	,763
	Nº nudos total	,140 ^b	,454	,657	,125	,371
	Nº nudos zona central	,301 ^b	1,090	,295	,289	,429
	CKDR viga completa	-,314 ^b	-1,083	,298	-,288	,391
	CKDR zona central	-,107 ^b	-,395	,699	-,109	,478
2	Densidad real (Kg/m ³)	,129 ^c	,844	,415	,237	,985
	% Duramen	. ^c	.	.	.	,000
	Feed V 0,5	,133 ^c	,821	,428	,231	,875
	Feed H 0,5	,112 ^c	,547	,595	,156	,566
	Drill V 0,5	-,048 ^c	-,269	,792	-,078	,766
	Drill H 0,5	,155 ^c	,888	,392	,248	,743
	Nº nudos total	-,336 ^c	-1,161	,268	-,318	,260
	Nº nudos zona central	,154 ^c	,641	,533	,182	,404
	CKDR viga completa	-,394 ^c	-1,767	,103	-,454	,386
	CKDR zona central	,023 ^c	,100	,922	,029	,456

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

b. Predictores en el modelo: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s)

c. Predictores en el modelo: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s), % Albura

Tabla 26. Variables excluidas MOE estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

1.2.- ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ROTURA/RESISTENCIA A FLEXIÓN

1.2.1.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LAS CUATRO ESPECIES

Se analizaron para las muestras de las cuatro especies, mediante regresión lineal, la variable dependiente *MOR resistencia flexión axial* en función de las variables independientes *especie, densidad real, % albura, % duramen, feed H 0.5, feed V 0.5, drill H 0.5, drill V 0.5, velocidad Ultrasonidos media, nº nudos total, nº nudos zona central, CKDR zona central, CKDR viga completa*.

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recogen como variables significativas *CKDR viga completa* y *nº nudos total*.

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método
1	CKDR viga completa	.	Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
2	Nº nudos total	.	Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

Tabla 27. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo así ajustado explica 60.4 % de la variabilidad en MOR resistencia a flexión (N/mm²).

Resumen del modelo ^c					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,755 ^a	,570	,563	7,98381690761 5989	
2	,777 ^b	,604	,590	7,72602800906 3282	2,097

a. Predictores: (Constante), CKDR viga completa
 b. Predictores: (Constante), CKDR viga completa, Nº nudos total
 c. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

Tabla 28. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo 2 puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	4981,216	1	4981,216	78,147	,000 ^b
	Residuo	3760,739	59	63,741		
	Total	8741,954	60			
2	Regresión	5279,847	2	2639,923	44,226	,000 ^c
	Residuo	3462,108	58	59,692		
	Total	8741,954	60			

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

b. Predictores: (Constante), CKDR viga completa

c. Predictores: (Constante), CKDR viga completa, N° nudos total

Tabla 29. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente MOR Resistencia flexión axial = 53,5025 + 0,468815*N° nudos total - 1157,01*CKDR viga completa

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	55,505	1,926		28,812	,000
	CKDR viga completa	-780,399	88,279	-,755	-8,840	,000
2	(Constante)	53,503	2,068		25,870	,000
	CKDR viga completa	-1157,011	188,809	-1,119	-6,128	,000
	N° nudos total	,469	,210	,408	2,237	,029

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

Tabla 30. Tabla coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo		En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad
						Tolerancia
1	Especie	-,109 ^b	-1,105	,274	-,144	,750
	Densidad real (Kg/m ³)	,055 ^b	,618	,539	,081	,939
	% Albura	-,101 ^b	-1,186	,240	-,154	,994
	% Duramen	,101 ^b	1,186	,240	,154	,994
	Feed V 0,5	-,038 ^b	-,437	,664	-,057	,985
	Feed H 0,5	-,023 ^b	-,262	,795	-,034	1,000

2	Drill V 0,5	-,040 ^b	-,468	,641	-,061	,995
	Drill H 0,5	,003 ^b	,035	,972	,005	,997
	Velocidad Sylvatest media (m/s)	,137 ^b	1,327	,190	,172	,678
	Nº nudos total	,408 ^b	2,237	,029	,282	,205
	Nº nudos zona central	,256 ^b	1,821	,074	,233	,355
	CKDR zona central	-,155 ^b	-,658	,513	-,086	,133
	Especie	,001 ^c	,007	,994	,001	,553
	Densidad real (Kg/m ³)	,141 ^c	1,565	,123	,203	,818
	% Albura	,014 ^c	,137	,892	,018	,641
	% Duramen	-,014 ^c	-,137	,892	-,018	,641
	Feed V 0,5	,050 ^c	,540	,591	,071	,808
	Feed H 0,5	,066 ^c	,725	,471	,096	,825
	Drill V 0,5	,060 ^c	,638	,526	,084	,774
	Drill H 0,5	,072 ^c	,819	,416	,108	,889
Velocidad Sylvatest media (m/s)	,106 ^c	1,045	,301	,137	,663	
Nº nudos zona central	,113 ^c	,658	,513	,087	,233	
CKDR zona central	-,060 ^c	-,256	,799	-,034	,128	
a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)						
b. Predictores en el modelo: (Constante), CKDR viga completa						
c. Predictores en el modelo: (Constante), CKDR viga completa, Nº nudos total						

Tabla 31. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos para los análisis con todo el conjunto de muestras de las cuatro especies se puede concluir que las variables *nº nudos total* y *CKDR viga completa* son predictores del *MOR resistencia flexión axial*.

1.2.2.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LA ESPECIE PINUS SYLVESTRIS

Se analizaron para todas las muestras de la especie pino silvestre, mediante regresión lineal, la variable dependiente *MOR resistencia flexión axial* en función de las variables independientes *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *feed H 0.5*, *feed V 0.5*, *drill H 0.5*, *drill V 0.5*, *velocidad Ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR zona central*, *CKDR viga completa*.

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recogen como variables significativas *CKDR viga completa*.

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método

1	CKDR viga completa		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)			

Tabla 32. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo así ajustado explica 56.8 % de la variabilidad en MOR resistencia a flexión (N/mm²).

Resumen del modelo ^b					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,754 ^a	,568	,535	5,36384512481 5986	1,590
a. Predictores: (Constante), CKDR viga completa					
b. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)					

Tabla 33. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo 1 puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	491,883	1	491,883	17,097	,001 ^b
	Residuo	374,021	13	28,771		
	Total	865,904	14			
a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)						
b. Predictores: (Constante), CKDR viga completa						

Tabla 34. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente MOR Resistencia flexión axial = 54,4322 - 555,408*CKDR viga completa

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	54,432	2,153		25,288	,000
	CKDR viga completa	-555,408	134,325	-,754	-4,135	,001
a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)						

Tabla 35. Coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo		En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad
						Tolerancia
1	Densidad real (Kg/m ³)	,149 ^b	,771	,456	,217	,921
	% Albura	,111 ^b	,576	,575	,164	,948
	% Duramen	-,111 ^b	-,576	,575	-,164	,948
	Feed V 0,5	,409 ^b	1,886	,084	,478	,591
	Feed H 0,5	,150 ^b	,695	,500	,197	,744
	Drill V 0,5	,339 ^b	1,480	,165	,393	,581
	Drill H 0,5	,409 ^b	2,126	,055	,523	,708
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	,108 ^b	,565	,582	,161	,954
	Nº nudos total	1,008 ^b	1,367	,197	,367	,057
	Nº nudos zona central	,367 ^b	,966	,353	,269	,232
	CKDR zona central	,360 ^b	,647	,530	,183	,112
a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)						
b. Predictores en el modelo: (Constante), CKDR viga completa						

Tabla 36. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos para los análisis con todo el conjunto de muestras de la especie pino silvestre se puede concluir que la variable *CKDR Viga completa* es la única predictora del *MOR Resistencia flexión*.

1.2.3.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LA ESPECIE PINUS PINASTER

Se analizaron para todas las muestras de las especies de pino resinero, mediante regresión lineal, la variable dependiente *MOR resistencia flexión axial* en función de las variables independientes *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *feed H 0.5*, *feed V 0.5*, *drill H 0.5*, *drill V 0.5*, *velocidad Ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR zona central*, *CKDR viga completa*.

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recogen como variables significativas *CKDR zona central*, *% albura*.

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método

1	CKDR zona central		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
2	% Albura		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

Tabla 37. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación R² indica que el modelo así ajustado explica 72.1 % de la variabilidad en MOR resistencia a flexión (N/mm²).

Resumen del modelo ^c					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,744 ^a	,553	,518	6,02045290287 7872	
2	,849 ^b	,721	,674	4,95293816179 4418	2,606

a. Predictores: (Constante), CKDR zona central

b. Predictores: (Constante), CKDR zona central, % Albura

c. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

Tabla 38. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo 2 puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	582,634	1	582,634	16,074	,001 ^b
	Residuo	471,196	13	36,246		
	Total	1053,830	14			
2	Regresión	759,451	2	379,725	15,479	,000 ^c
	Residuo	294,379	12	24,532		
	Total	1053,830	14			

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

b. Predictores: (Constante), CKDR zona central

c. Predictores: (Constante), CKDR zona central, % Albura

Tabla 39. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente MOR Resistencia flexión axial = 68,113 - 0,148*% Albura - 2857,16*CKDR zona central

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	55,223	2,598		21,252	,000
	CKDR zona central	-1955,645	487,777	-,744	-4,009	,001
2	(Constante)	68,113	5,256		12,960	,000
	CKDR zona central	-2857,157	523,248	-1,086	-5,460	,000
	% Albura	-,148	,055	-,534	-2,685	,020

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

Tabla 40. Coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo		En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad
						Tolerancia
1	Densidad real (Kg/m ³)	,257 ^b	1,293	,220	,350	,830
	% Albura	-,534 ^b	-2,685	,020	-,613	,588
	% Duramen	,534 ^b	2,685	,020	,613	,588
	Feed V 0,5	,104 ^b	,453	,659	,130	,696
	Feed H 0,5	,287 ^b	1,127	,282	,309	,520
	Drill V 0,5	,209 ^b	,933	,369	,260	,692
	Drill H 0,5	,172 ^b	,726	,482	,205	,635
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	,069 ^b	,360	,725	,103	,998
	Nº nudos total	,348 ^b	,713	,490	,202	,150
	Nº nudos zona central	,607 ^b	2,157	,052	,529	,339
	CKDR viga completa	-,046 ^b	-,077	,940	-,022	,105
2	Densidad real (Kg/m ³)	,017 ^c	,084	,935	,025	,585
	% Duramen	. ^c	.	.	.	,000
	Feed V 0,5	-,047 ^c	-,238	,817	-,071	,634
	Feed H 0,5	,136 ^c	,598	,562	,177	,478
	Drill V 0,5	,038 ^c	,187	,855	,056	,604
	Drill H 0,5	,016 ^c	,078	,939	,024	,575
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	-,046 ^c	-,276	,788	-,083	,925
	Nº nudos total	-,355 ^c	-,732	,480	-,215	,103
Nº nudos zona central	,303 ^c	,943	,366	,273	,227	

	CKDR viga completa	,185 ^c	,373	,716	,112	,101
a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)						
b. Predictores en el modelo: (Constante), CKDR zona central						
c. Predictores en el modelo: (Constante), CKDR zona central, % Albura						

Tabla 41. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos para los análisis con todo el conjunto de muestras de la especie pino resinero se puede concluir que las variables % Albura y CKDR Zona central son variables predictoras del MOE global flexión.

1.2.4.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LA ESPECIE PINUS NIGRA

Se analizaron para todas las muestras, mediante regresión lineal, la variable dependiente MOR resistencia flexión axial en función de las variables independientes densidad real, % albura, % duramen, feed H 0.5, feed V 0.5, drill H 0.5, drill V 0.5, velocidad Ultrasonidos media, n° nudos total, n° nudos zona central, CKDR zona central, CKDR viga completa.

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recogen como variables significativas CKDR zona central.

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método
1	CKDR zona central		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

Tabla 42. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación R² indica que el modelo así ajustado explica 50.5 % de la variabilidad en MOR resistencia a flexión (N/mm²).

Resumen del modelo ^b					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson

1	,711 ^a	,505	,467	6,87990294349 8407	1,483
a. Predictores: (Constante), CKDR zona central					
b. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)					

Tabla 43. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo 1 puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	627,906	1	627,906	13,266	,003 ^b
	Residuo	615,330	13	47,333		
	Total	1243,236	14			
a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)						
b. Predictores: (Constante), CKDR zona central						

Tabla 44. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente MOR Resistencia flexión axial = 49,7245 - 1444,91*CKDR zona central

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	49,725	4,423		11,241	,000
	CKDR zona central	-1444,913	396,713	-,711	-3,642	,003
a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)						

Tabla 45. Coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo		En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad
						Tolerancia
1	Densidad real (Kg/m ³)	,152 ^b	,690	,504	,195	,818
	% Albura	,134 ^b	,640	,535	,182	,914
	% Duramen	-,134 ^b	-,640	,535	-,182	,914

Feed V 0,5	,171 ^b	,866	,404	,242	1,000
Feed H 0,5	,139 ^b	,698	,499	,197	1,000
Drill V 0,5	-,014 ^b	-,066	,948	-,019	,951
Drill H 0,5	,243 ^b	1,256	,233	,341	,976
Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	,149 ^b	,612	,552	,174	,678
Nº nudos total	,031 ^b	,109	,915	,031	,517
Nº nudos zona central	,198 ^b	,560	,586	,160	,322
CKDR viga completa	-,328 ^b	-,631	,540	-,179	,148
a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)					
b. Predictores en el modelo: (Constante), CKDR zona central					

Tabla 46. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos para los análisis con todo el conjunto de muestras de la especie pino laricio se puede concluir que la variable *CKDR Zona central* es predictora del *MOE global flexión*.

1.2.5.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LA ESPECIE PINUS HALEPENSIS

Se analizaron para todas las muestras de las especies de pino carrasco, mediante regresión lineal, la variable dependiente *MOR resistencia flexión axial* en función de las variables independientes *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *feed H 0.5*, *feed V 0.5*, *drill H 0.5*, *drill V 0.5*, *velocidad Ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR zona central*, *CKDR viga completa*.

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recogen como variables significativas *CKDR viga completa*, *drill H 0.5* y *% duramen*.

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método
1	CKDR viga completa		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
2	Drill H 0,5		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
3	% Duramen		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)			

Tabla 47. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo así ajustado explica 71.3 % de la variabilidad en MOR resistencia a flexión (N/mm^2).

Resumen del modelo ^d					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,654 ^a	,428	,387	11,6497061743 87490	
2	,769 ^b	,592	,529	10,2102933123 24737	
3	,844 ^c	,713	,641	8,91205775219 6810	1,596
a. Predictores: (Constante), CKDR viga completa					
b. Predictores: (Constante), CKDR viga completa, Drill H 0,5					
c. Predictores: (Constante), CKDR viga completa, Drill H 0,5, % Duramen					
d. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm^2)					

Tabla 48. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo 3 puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	1422,289	1	1422,289	10,480	,006 ^b
	Residuo	1900,019	14	135,716		
	Total	3322,308	15			
2	Regresión	1967,057	2	983,529	9,434	,003 ^c
	Residuo	1355,251	13	104,250		
	Total	3322,308	15			
3	Regresión	2369,211	3	789,737	9,943	,001 ^d
	Residuo	953,097	12	79,425		
	Total	3322,308	15			
a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm^2)						
b. Predictores: (Constante), CKDR viga completa						
c. Predictores: (Constante), CKDR viga completa, Drill H 0,5						
d. Predictores: (Constante), CKDR viga completa, Drill H 0,5, % Duramen						

Tabla 49. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente MOR Resistencia flexión axial = $-30,089 - 1287,19 \cdot \text{CKDR viga completa} + 5,66023 \cdot \text{Drill H 0,5} + 0,938702 \cdot \% \text{ Duramen}$

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	62,257	8,848		7,036	,000
	CKDR viga completa	-1129,012	348,754	-,654	-3,237	,006
2	(Constante)	-37,655	44,390		-,848	,412
	CKDR viga completa	-788,275	340,070	-,457	-2,318	,037
	Drill H 0,5	5,681	2,485	,451	2,286	,040
3	(Constante)	-30,089	38,891		-,774	,454
	CKDR viga completa	-1287,190	370,498	-,746	-3,474	,005
	Drill H 0,5	5,660	2,169	,449	2,609	,023
	% Duramen	,939	,417	,452	2,250	,044

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

Tabla 50. Coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo		En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad
						Tolerancia
1	Densidad real (Kg/m ³)	,325 ^b	1,716	,110	,430	1,000
	% Albura	-,454 ^b	-1,880	,083	-,462	,593
	% Duramen	,454 ^b	1,880	,083	,462	,593
	Feed V 0,5	,398 ^b	2,219	,045	,524	,991
	Feed H 0,5	,197 ^b	,631	,539	,172	,437
	Drill V 0,5	,115 ^b	,516	,614	,142	,874
	Drill H 0,5	,451 ^b	2,286	,040	,535	,808
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	,006 ^b	,019	,985	,005	,391
	Nº nudos total	,582 ^b	1,236	,238	,324	,177
	Nº nudos zona central	,249 ^b	,846	,413	,229	,483
	CKDR zona central	,028 ^b	,079	,938	,022	,362
2	Densidad real (Kg/m ³)	,086 ^c	,337	,742	,097	,520
	% Albura	-,452 ^c	-2,250	,044	-,545	,593

	% Duramen	,452 ^c	2,250	,044	,545	,593
	Feed V 0,5	,305 ^c	1,772	,102	,455	,907
	Feed H 0,5	-,544 ^c	-1,436	,177	-,383	,202
	Drill V 0,5	-,109 ^c	-,497	,628	-,142	,687
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	-,172 ^c	-,571	,578	-,163	,365
	Nº nudos total	,424 ^c	,991	,341	,275	,172
	Nº nudos zona central	,277 ^c	1,094	,295	,301	,482
	CKDR zona central	,101 ^c	,330	,747	,095	,358
3	Densidad real (Kg/m ³)	-,010 ^d	-,045	,965	-,013	,500
	% Albura	. ^d	.	.	.	,000
	Feed V 0,5	,253 ^d	1,641	,129	,443	,883
	Feed H 0,5	-,595 ^d	-1,908	,083	-,499	,201
	Drill V 0,5	,048 ^d	,229	,823	,069	,598
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	,221 ^d	,698	,500	,206	,250
	Nº nudos total	-,480 ^d	-,836	,421	-,244	,074
	Nº nudos zona central	,086 ^d	,341	,740	,102	,401
CKDR zona central	,177 ^d	,665	,520	,196	,353	
a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)						
b. Predictores en el modelo: (Constante), CKDR viga completa						
c. Predictores en el modelo: (Constante), CKDR viga completa, Drill H 0,5						
d. Predictores en el modelo: (Constante), CKDR viga completa, Drill H 0,5, % Duramen						

Tabla 51. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

2.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MOE-MOR ESTÁTICO (ENSAYO DESTRUCTIVO) EN FUNCIÓN DEL MOE Y MOR OBTENIDO MEDIANTE TND Y VARIABLES Y PARÁMETROS DE LA MADERA

Se procede a realizar análisis multivariantes con el programa informático SPSS y las variables dependientes *MOE Global flexión* y *MOR Resistencia flexión* y las variables independientes *Sylvatest media MOE*, *Sylvatest media MOR*, *Timber grader MOE* y *Timber grader MOR*, *especie*, *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *Feed V 0.5*, *Feed H 0.5*, *Drill V 0.5*, *Drill H 0.5*, *velocidad ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR viga completa*, *CKDR zona central*.

2.1.- ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

2.1.1.- ANÁLISIS DEL MOE PARA LAS CUATRO ESPECIES

Se analizaron para las muestras de las cuatro especies, mediante regresión lineal, la variable dependiente *MOE global flexión* en función de las variables independientes *Timber grader MOE*, *Sylvatest media MOE*, *especie*, *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *feed H 0.5*, *feed V 0.5*, *drill H 0.5*, *drill V 0.5*, *velocidad Ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR zona central*, *CKDR viga completa*.

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recogen como variables significativas *Timber grader MOE*, *drill H 0.5*, *drill V 0.5*.

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método
1	Timber grader MOE	.	Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
2	Drill H 0,5	.	Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
3	Drill V 0,5	.	Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

Tabla 52. Modelos SPSS MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo así ajustado explica 81.1 % de la variabilidad en MOR resistencia a flexión (N/mm²).

Resumen del modelo ^d					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,874 ^a	,763	,759	1188,50542122 2880400	
2	,887 ^b	,786	,779	1139,98618346 9385000	
3	,900 ^c	,811	,801	1081,35152267 0109700	1,810

a. Predictores: (Constante), Timber grader MOE

b. Predictores: (Constante), Timber grader MOE, Drill H 0,5

c. Predictores: (Constante), Timber grader MOE, Drill H 0,5, Drill V 0,5

d. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

Tabla 53. Resumen del modelo MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo 3 puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	268704508,510	1	268704508,510	190,227	,000 ^b
	Residuo	83340163,040	59	1412545,136		
	Total	352044671,550	60			
2	Regresión	276669698,637	2	138334849,319	106,447	,000 ^c
	Residuo	75374972,913	58	1299568,499		
	Total	352044671,550	60			
3	Regresión	285393367,962	3	95131122,654	81,356	,000 ^d
	Residuo	66651303,588	57	1169321,116		
	Total	352044671,550	60			
a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)						
b. Predictores: (Constante), Timber grader MOE						
c. Predictores: (Constante), Timber grader MOE, Drill H 0,5						
d. Predictores: (Constante), Timber grader MOE, Drill H 0,5, Drill V 0,5						

Tabla 54. ANOVA MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente MOE global flexión (N/mm²) = -761,455 + 1,26313*Timber grader MOE - 381,588*Drill V 0,5 + 452,362*Drill H 0,5

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	-1044,560	974,881		-1,071	,288
	Timber grader MOE	1,339	,097	,874	13,792	,000
2	(Constante)	-1608,144	962,394		-1,671	,100
	Timber grader MOE	1,235	,102	,806	12,098	,000
	Drill H 0,5	131,193	52,992	,165	2,476	,016
3	(Constante)	-761,455	964,088		-,790	,433
	Timber grader MOE	1,263	,097	,824	12,970	,000
	Drill H 0,5	452,362	127,879	,569	3,537	,001

	Drill V 0,5	-381,588	139,705	-,441	-2,731	,008
--	-------------	----------	---------	-------	--------	------

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

Tabla 55. Tabla coeficientes MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo		En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad
						Tolerancia
1	Especie	,044 ^b	,686	,496	,090	1,000
	Densidad real (Kg/m ³)	-,020 ^b	-,292	,772	-,038	,900
	% Albura	,017 ^b	,255	,800	,033	,959
	% Duramen	-,017 ^b	-,255	,800	-,033	,959
	Feed V 0,5	,130 ^b	1,971	,053	,251	,881
	Feed H 0,5	,139 ^b	1,999	,050	,254	,795
	Drill V 0,5	,084 ^b	1,211	,231	,157	,826
	Drill H 0,5	,165 ^b	2,476	,016	,309	,832
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	-,022 ^b	-,220	,826	-,029	,410
	Ultrasonidos media MOE	-,197 ^b	-1,121	,267	-,146	,130
	Nº nudos total	,041 ^b	,569	,571	,075	,771
	Nº nudos zona central	,054 ^b	,777	,440	,102	,851
	CKDR viga completa	-,004 ^b	-,056	,956	-,007	,747
	CKDR zona central	-,003 ^b	-,038	,970	-,005	,783
2	Especie	-,093 ^c	-1,165	,249	-,153	,581
	Densidad real (Kg/m ³)	-,195 ^c	-2,475	,016	-,312	,549
	% Albura	-,115 ^c	-1,506	,138	-,196	,622
	% Duramen	,115 ^c	1,506	,138	,196	,622
	Feed V 0,5	-,129 ^c	-,750	,456	-,099	,126
	Feed H 0,5	-,211 ^c	-,986	,329	-,129	,081
	Drill V 0,5	-,441 ^c	-2,731	,008	-,340	,128
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	,165 ^c	1,444	,154	,188	,277
	Sylvatest media MOE	-,275 ^c	-1,631	,108	-,211	,126
	Nº nudos total	,041 ^c	,592	,557	,078	,771
	Nº nudos zona central	,046 ^c	,697	,489	,092	,849
	CKDR viga completa	-,040 ^c	-,550	,585	-,073	,719
	CKDR zona central	-,048 ^c	-,681	,499	-,090	,734
	3	Especie	,042 ^d	,453	,652	,060

Densidad real (Kg/m ³)	-,106 ^d	-1,098	,277	-,145	,356
% Albura	-,062 ^d	-,811	,421	-,108	,570
% Duramen	,062 ^d	,811	,421	,108	,570
Feed V 0,5	,344 ^d	1,547	,128	,202	,065
Feed H 0,5	,061 ^d	,264	,792	,035	,063
Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	,073 ^d	,626	,534	,083	,246
Ultrasonidos media MOE	-,123 ^d	-,694	,491	-,092	,108
Nº nudos total	,072 ^d	1,082	,284	,143	,751
Nº nudos zona central	,083 ^d	1,315	,194	,173	,815
CKDR viga completa	,059 ^d	,765	,448	,102	,565
CKDR zona central	,041 ^d	,539	,592	,072	,590

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

b. Predictores en el modelo: (Constante), Timber grader MOE

c. Predictores en el modelo: (Constante), Timber grader MOE, Drill H 0,5

d. Predictores en el modelo: (Constante), Timber grader MOE, Drill H 0,5, Drill V 0,5

Tabla 56. Variables excluidas MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos para los análisis con todo el conjunto de muestras de las cuatro especies se puede concluir que las variables *Drill V 0.5*, *Drill H 0.5* y *Timber grader MOE* son buenas predictoras de la variable *MOE global flexión*.

2.1.2.- ANÁLISIS DEL MOE PARA LA ESPECIE PINUS SYLVESTRIS

Se analizaron para las muestras de las especies de pino silvestre, mediante regresión lineal, la variable dependiente *MOE global flexión* en función de las variables independientes *Timber grader MOE*, *Sylvatest media MOE*, *especie*, *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *feed H 0.5*, *feed V 0.5*, *drill H 0.5*, *drill V 0.5*, *velocidad Ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR zona central*, *CKDR viga completa*.

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recoge como variable significativa *velocidad ultrasonidos media*.

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método
1	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

Tabla 57. Modelos SPSS MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación R² indica que el modelo así ajustado explica 52.2 % de la variabilidad en MOR resistencia a flexión (N/mm²).

Resumen del modelo ^b					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,723 ^a	,522	,485	1303,38947535 6074900	1,454
a. Predictores: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s)					
b. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)					

Tabla 58. Resumen del modelo MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	24118263,417	1	24118263,417	14,197	,002 ^b
	Residuo	22084713,618	13	1698824,124		
	Total	46202977,035	14			
a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)						
b. Predictores: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s)						

Tabla 59. ANOVA MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente MOE global flexión (N/mm²) = -15927,5 + 5,79711*Velocidad Ultrasonidos media (m/s)

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	-15927,479	7569,547		-2,104	,055
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	5,797	1,539	,723	3,768	,002
a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)						

Tabla 60. Tabla coeficientes MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo	En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad	
					Tolerancia	
1	Densidad real (Kg/m ³)	,174 ^b	,887	,393	,248	,972
	% Albura	-,053 ^b	-,264	,796	-,076	,973
	% Duramen	,053 ^b	,264	,796	,076	,973
	Feed V 0,5	,284 ^b	1,448	,173	,386	,880
	Feed H 0,5	,264 ^b	1,389	,190	,372	,948
	Drill V 0,5	,216 ^b	1,030	,323	,285	,831
	Drill H 0,5	,161 ^b	,788	,446	,222	,909
	Timber grader MOE	,139 ^b	,441	,667	,126	,394
	Ultrasonidos media MOE	,279 ^b	,872	,400	,244	,365
	Nº nudos total	-,115 ^b	-,576	,575	-,164	,974
	Nº nudos zona central	-,076 ^b	-,385	,707	-,110	,998
	CKDR viga completa	-,096 ^b	-,473	,645	-,135	,954
	CKDR zona central	-,071 ^b	-,354	,729	-,102	,989
a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)						
b. Predictores en el modelo: (Constante), Velocidad Ultrasonidos media (m/s)						

Tabla 61. Variables excluidas MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos para los análisis con todo el conjunto de muestras de la especie pino silvestre se puede concluir que la variable *Velocidad Sylvatest media* es la única predictora del *MOE global flexión*. Los valores de MOE proporcionados por los equipos de vibraciones inducidas y ultrasonidos (valores MOE dinámicos) no son buenos predictores.

2.1.3.- ANÁLISIS DEL MOE PARA LA ESPECIE PINUS PINASTER

Se analizaron para las muestras de la especie pino resinero, mediante regresión lineal, la variable dependiente *MOE global flexión* en función de las variables independientes de *Timber grader MOE*, *Sylvatest media MOE*, *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *feed H 0.5*, *feed V 0.5*, *drill H 0.5*, *drill V 0.5*, *velocidad Ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR zona central*, *CKDR viga completa*.

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recogen como variables significativas *Ultrasonidos media MOE*.

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método
1	Ultrasonidos media MOE		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

Tabla 62. Modelos SPSS MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo así ajustado explica 82.9 % de la variabilidad en MOR resistencia a flexión (N/mm²).

Resumen del modelo ^b					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,911 ^a	,829	,816	785,933274629 602700	1,901

a. Predictores: (Constante), Ultrasonidos media MOE

b. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

Tabla 63. Resumen del modelo MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo 4 puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	39056144,027	1	39056144,027	63,229	,000 ^b
	Residuo	8029984,458	13	617691,112		
	Total	47086128,485	14			

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

b. Predictores: (Constante), Ultrasonidos media MOE

Tabla 64. ANOVA MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente MOE global flexión (N/mm²) = -15,358 + 1,01077*Ultrasonidos media MOE.

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	-15,358	1581,214		-,010	,992

Ultrasonidos media MOE	1,011	,127	,911	7,952	,000
------------------------	-------	------	------	-------	------

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

Tabla 65. Tabla coeficientes MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo		En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad
						Tolerancia
1	Densidad real (Kg/m ³)	,030 ^b	,157	,878	,045	,388
	% Albura	-,051 ^b	-,416	,685	-,119	,947
	% Duramen	,051 ^b	,416	,685	,119	,947
	Feed V 0,5	-,193 ^b	-1,163	,268	-,318	,464
	Feed H 0,5	,005 ^b	,029	,977	,008	,513
	Drill V 0,5	-,125 ^b	-,658	,523	-,187	,382
	Drill H 0,5	-,065 ^b	-,419	,682	-,120	,579
	Timber grader MOE	,360 ^b	,994	,340	,276	,100
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	-,040 ^b	-,277	,787	-,080	,685
	Nº nudos total	-,067 ^b	-,554	,589	-,158	,948
	Nº nudos zona central	-,021 ^b	-,175	,864	-,050	,990
	CKDR viga completa	-,074 ^b	-,576	,576	-,164	,828
	CKDR zona central	-,084 ^b	-,668	,517	-,189	,867

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

b. Predictores en el modelo: (Constante), Ultrasonidos media MOE

Tabla 66. Variables excluidas MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos para los análisis con todo el conjunto de muestras de la especie pino resinero se puede concluir que la variable *Sylvatest media MOE* es buena predictora del *MOE global flexión*.

2.1.4.- ANÁLISIS DEL MOE PARA LA ESPECIE PINUS NIGRA

Se analizaron para las muestras de la especie pino laricio, mediante regresión lineal, la variable dependiente *MOE global flexión* en función de las variables independientes de *Timber grader MOE*, *Sylvatest media MOE*, *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *feed H 0.5*, *feed V 0.5*, *drill H 0.5*, *drill V 0.5*, *velocidad Ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR zona central*, *CKDR viga completa*.

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recogen como variables significativas *Timber grader MOE*.

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método
1	Timber grader MOE		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

Tabla 67. Modelos SPSS MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación R² indica que el modelo así ajustado explica 86.1 % de la variabilidad en MOR resistencia a flexión (N/mm²).

Resumen del modelo ^b					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,928 ^a	,861	,850	814,666823317 415000	2,552

a. Predictores: (Constante), Timber grader MOE

b. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

Tabla 68. Resumen del modelo MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	53413545,140	1	53413545,140	80,481	,000 ^b
	Residuo	8627866,429	13	663682,033		
	Total	62041411,569	14			

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

b. Predictores: (Constante), Timber grader MOE

Tabla 69. ANOVA MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente MOE global flexión (N/mm²) = -1112,13 + 1,25956*Timber grader MOE

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Dev. Error	Beta		
1	(Constante)	-1112,127	1288,779		-,863	,404
	Timber grader MOE	1,260	,140	,928	8,971	,000

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

Tabla 70. Tabla coeficientes MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo		En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad
						Tolerancia
1	Densidad real (Kg/m ³)	-,129 ^b	-1,277	,226	-,346	,994
	% Albura	,067 ^b	,493	,631	,141	,625
	% Duramen	-,067 ^b	-,493	,631	-,141	,625
	Feed V 0,5	-,205 ^b	-1,620	,131	-,424	,593
	Feed H 0,5	-,149 ^b	-1,329	,209	-,358	,802
	Drill V 0,5	-,207 ^b	-1,974	,072	-,495	,799
	Drill H 0,5	-,169 ^b	-1,656	,124	-,431	,906
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	,064 ^b	,249	,808	,072	,175
	Ultrasonidos media MOE	-,704 ^b	-1,759	,104	-,453	,057
	Nº nudos total	,070 ^b	,570	,579	,162	,740
	Nº nudos zona central	,033 ^b	,293	,774	,084	,894
	CKDR viga completa	-,087 ^b	-,717	,487	-,203	,750
CKDR zona central	-,143 ^b	-1,175	,263	-,321	,705	

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

b. Predictores en el modelo: (Constante), Timber grader MOE

Tabla 71. Variables excluidas MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos para los análisis con todo el conjunto de muestras de la especie pino laricio se puede concluir que la variable *Timber grader MOE* es la única predictora del *MOE global flexión*.

2.1.5.- ANÁLISIS DEL MOE PARA LA ESPECIE PINUS HALEPENSIS

Se analizaron para las muestras de pino carrasco, mediante regresión lineal, la variable dependiente *MOE global flexión* en función de las variables independientes de *Timber*

grader MOE, Sylvatest media MOE, densidad real, % albura, % duramen, feed H 0.5, feed V 0.5, drill H 0.5, drill V 0.5, velocidad Ultrasonidos media, nº nudos total, nº nudos zona central, CKDR zona central, CKDR viga completa.

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recogen como variables significativas Timber grader MOE y nº nudos total.

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método
1	Timber grader MOE		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
2	Nº nudos total		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

Tabla 72. Modelos SPSS MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 89.4 % de la variabilidad en MOR resistencia a flexión (N/mm²).

Resumen del modelo ^c					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,921 ^a	,848	,837	1096,63952193 7674800	
2	,946 ^b	,894	,878	947,212932139 718200	2,219

a. Predictores: (Constante), Timber grader MOE
 b. Predictores: (Constante), Timber grader MOE, Nº nudos total
 c. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

Tabla 73. Resumen del modelo MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo 2 puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	93607018,548	1	93607018,548	77,836	,000 ^b
	Residuo	16836655,375	14	1202618,241		
	Total	110443673,923	15			

2	Regresión	98779913,519	2	49389956,759	55,048	,000 ^c
	Residuo	11663760,405	13	897212,339		
	Total	110443673,923	15			
a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)						
b. Predictores: (Constante), Timber grader MOE						
c. Predictores: (Constante), Timber grader MOE, N° nudos total						

Tabla 74. ANOVA MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente MOE global flexión (N/mm²) = -5958,55 + 1,65256*Timber grader MOE + 105,034*N° nudos total

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	-282,095	1590,998		-,177	,862
	Timber grader MOE	1,318	,149	,921	8,822	,000
2	(Constante)	-5958,547	2734,450		-2,179	,048
	Timber grader MOE	1,653	,190	1,154	8,702	,000
	N° nudos total	105,034	43,743	,319	2,401	,032

a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm²)

Tabla 75. Tabla coeficientes MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo		En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad
						Tolerancia
1	Densidad real (Kg/m ³)	,024 ^b	,217	,832	,060	,979
	% Albura	-,249 ^b	-2,369	,034	-,549	,741
	% Duramen	,249 ^b	2,369	,034	,549	,741
	Feed V 0,5	-,002 ^b	-,016	,988	-,004	,833
	Feed H 0,5	-,232 ^b	-1,586	,137	-,403	,460
	Drill V 0,5	-,223 ^b	-2,156	,050	-,513	,807
	Drill H 0,5	-,001 ^b	-,005	,996	-,001	,667
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	-,332 ^b	-1,608	,132	-,407	,229
	Ultrasonidos media MOE	-,348 ^b	-1,551	,145	-,395	,197
	N° nudos total	,319 ^b	2,401	,032	,554	,462
	N° nudos zona central	,188 ^b	1,521	,152	,389	,648

	CKDR viga completa	,225 ^b	1,223	,243	,321	,312
	CKDR zona central	,105 ^b	,717	,486	,195	,524
2	Densidad real (Kg/m ³)	-,046 ^c	-,469	,648	-,134	,890
	% Albura	-,137 ^c	-,837	,419	-,235	,311
	% Duramen	,137 ^c	,837	,419	,235	,311
	Feed V 0,5	-,066 ^c	-,634	,538	-,180	,779
	Feed H 0,5	-,188 ^c	-1,463	,169	-,389	,450
	Drill V 0,5	-,166 ^c	-1,681	,119	-,437	,735
	Drill H 0,5	-,047 ^c	-,404	,694	-,116	,648
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	-,159 ^c	-,736	,476	-,208	,182
	Ultrasonidos media MOE	-,232 ^c	-1,109	,289	-,305	,182
	Nº nudos zona central	-,005 ^c	-,033	,974	-,010	,320
	CKDR viga completa	-,210 ^c	-,792	,444	-,223	,119
	CKDR zona central	-,031 ^c	-,218	,831	-,063	,424
	a. Variable dependiente: MOE global flexión (N/mm ²)					
b. Predictores en el modelo: (Constante), Timber grader MOE						
c. Predictores en el modelo: (Constante), Timber grader MOE, Nº nudos total						

Tabla 76. Variables excluidas MOE estático en función de MOE dinámicos y variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

2.2.- ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ROTURA/RESISTENCIA A FLEXIÓN

2.2.1.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LAS CUATRO ESPECIES

Se analizaron para todas las muestras de las cuatro especies, mediante regresión lineal, la variable dependiente *MOR resistencia flexión axial* en función de las variables independientes *Timber grader MOR*, *Sylvatest media MOR*, *especie*, *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *feed H 0.5*, *feed V 0.5*, *drill H 0.5*, *drill V 0.5*, *velocidad Ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR zona central*, *CKDR viga completa*.

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recogen como variables significativas *CKDR viga completa*, *Timber grader MOR*, *Ultrasonidos media MOR* y *nº nudos total*.

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método
1	CKDR viga completa	.	Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).

2	Timber grader MOR	.	Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
3	Ultrasonidos media MOR	.	Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
4	Nº nudos total	.	Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)			

Tabla 77. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación R² indica que el modelo así ajustado explica 70.5 % de la variabilidad en MOR resistencia a flexión (N/mm²).

Resumen del modelo ^e					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,755 ^a	,570	,563	7,98381690761 5989	
2	,790 ^b	,624	,611	7,52630278266 9385	
3	,823 ^c	,678	,661	7,02823737205 2220	
4	,839 ^d	,705	,684	6,78926901991 1790	1,983
a. Predictores: (Constante), CKDR viga completa					
b. Predictores: (Constante), CKDR viga completa, Timber grader MOR					
c. Predictores: (Constante), CKDR viga completa, Timber grader MOR, Ultrasonidos media MOR					
d. Predictores: (Constante), CKDR viga completa, Timber grader MOR, Ultrasonidos media MOR, Nº nudos total					
e. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)					

Tabla 78. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo 4 puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	4981,216	1	4981,216	78,147	,000 ^b
	Residuo	3760,739	59	63,741		
	Total	8741,954	60			
2	Regresión	5456,531	2	2728,265	48,164	,000 ^c

	Residuo	3285,424	58	56,645		
	Total	8741,954	60			
3	Regresión	5926,375	3	1975,458	39,992	,000 ^d
	Residuo	2815,579	57	49,396		
	Total	8741,954	60			
4	Regresión	6160,681	4	1540,170	33,414	,000 ^e
	Residuo	2581,274	56	46,094		
	Total	8741,954	60			
a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)						
b. Predictores: (Constante), CKDR viga completa						
c. Predictores: (Constante), CKDR viga completa, Timber grader MOR						
d. Predictores: (Constante), CKDR viga completa, Timber grader MOR, Ultrasonidos media MOR						
e. Predictores: (Constante), CKDR viga completa, Timber grader MOR, Ultrasonidos media MOR, N° nudos total						

Tabla 79. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente MOR Resistencia flexión axial = 42,4883 - 879,499*CKDR viga completa + 1,71395*Timber grader MOR - 0,945908*Ultrasonidos media MOR + 0,423814*N° nudos total

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	55,505	1,926		28,812	,000
	CKDR viga completa	-780,399	88,279	-,755	-8,840	,000
2	(Constante)	41,644	5,118		8,137	,000
	CKDR viga completa	-640,368	96,242	-,619	-6,654	,000
	Timber grader MOR	,520	,179	,270	2,897	,005
3	(Constante)	45,599	4,949		9,215	,000
	CKDR viga completa	-532,594	96,428	-,515	-5,523	,000
	Timber grader MOR	1,863	,467	,966	3,992	,000
	Ultrasonidos media MOR	-1,090	,354	-,691	-3,084	,003
4	(Constante)	42,488	4,975		8,540	,000
	CKDR viga completa	-879,499	179,865	-,851	-4,890	,000
	Timber grader MOR	1,714	,456	,889	3,762	,000
	Ultrasonidos media MOR	-,946	,348	-,599	-2,722	,009
	N° nudos total	,424	,188	,369	2,255	,028

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

Tabla 80. Tabla coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo		En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad
						Tolerancia
1	Especie	-,109 ^b	-1,105	,274	-,144	,750
	Densidad real (Kg/m ³)	,055 ^b	,618	,539	,081	,939
	% Albura	-,101 ^b	-1,186	,240	-,154	,994
	% Duramen	,101 ^b	1,186	,240	,154	,994
	Feed V 0,5	-,038 ^b	-,437	,664	-,057	,985
	Feed H 0,5	-,023 ^b	-,262	,795	-,034	1,000
	Drill V 0,5	-,040 ^b	-,468	,641	-,061	,995
	Drill H 0,5	,003 ^b	,035	,972	,005	,997
	Timber grader MOR	,270 ^b	2,897	,005	,356	,748
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	,137 ^b	1,327	,190	,172	,678
	Ultrasonidos media MOR	,144 ^b	1,594	,116	,205	,873
	Nº nudos total	,408 ^b	2,237	,029	,282	,205
	Nº nudos zona central	,256 ^b	1,821	,074	,233	,355
	CKDR zona central	-,155 ^b	-,658	,513	-,086	,133
2	Especie	-,227 ^c	-2,390	,020	-,302	,662
	Densidad real (Kg/m ³)	-,099 ^c	-1,018	,313	-,134	,679
	% Albura	-,180 ^c	-2,211	,031	-,281	,918
	% Duramen	,180 ^c	2,211	,031	,281	,918
	Feed V 0,5	-,192 ^c	-2,154	,035	-,274	,764
	Feed H 0,5	-,195 ^c	-2,133	,037	-,272	,734
	Drill V 0,5	-,226 ^c	-2,482	,016	-,312	,720
	Drill H 0,5	-,126 ^c	-1,409	,164	-,183	,800
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	-,103 ^c	-,768	,446	-,101	,366
	Ultrasonidos media MOR	-,691 ^c	-3,084	,003	-,378	,113
	Nº nudos total	,452 ^c	2,659	,010	,332	,203
	Nº nudos zona central	,243 ^c	1,837	,071	,236	,354
	CKDR zona central	-,161 ^c	-,725	,472	-,096	,133
	3	Especie	-,196 ^d	-2,170	,034	-,279
Densidad real (Kg/m ³)		-,011 ^d	-,114	,910	-,015	,610
% Albura		-,151 ^d	-1,955	,056	-,253	,903
% Duramen		,151 ^d	1,955	,056	,253	,903
Feed V 0,5		-,171 ^d	-2,038	,046	-,263	,758

	Feed H 0,5	-,169 ^d	-1,958	,055	-,253	,726
	Drill V 0,5	-,178 ^d	-2,023	,048	-,261	,691
	Drill H 0,5	-,099 ^d	-1,179	,243	-,156	,791
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	,009 ^d	,070	,944	,009	,335
	Nº nudos total	,369 ^d	2,255	,028	,288	,197
	Nº nudos zona central	,202 ^d	1,615	,112	,211	,350
	CKDR zona central	-,113 ^d	-,540	,591	-,072	,132
4	Especie	-,125 ^e	-1,202	,235	-,160	,484
	Densidad real (Kg/m ³)	,068 ^e	,681	,499	,091	,540
	% Albura	-,076 ^e	-,796	,430	-,107	,588
	% Duramen	,076 ^e	,796	,430	,107	,588
	Feed V 0,5	-,111 ^e	-1,199	,236	-,160	,616
	Feed H 0,5	-,105 ^e	-1,115	,270	-,149	,590
	Drill V 0,5	-,108 ^e	-1,078	,286	-,144	,527
	Drill H 0,5	-,045 ^e	-,522	,604	-,070	,710
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	-,101 ^e	-,754	,454	-,101	,295
	Nº nudos zona central	,062 ^e	,407	,686	,055	,231
	CKDR zona central	-,032 ^e	-,155	,878	-,021	,127
a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)						
b. Predictores en el modelo: (Constante), CKDR viga completa						
c. Predictores en el modelo: (Constante), CKDR viga completa, Timber grader MOR						
d. Predictores en el modelo: (Constante), CKDR viga completa, Timber grader MOR, Ultrasonidos media MOR						
e. Predictores en el modelo: (Constante), CKDR viga completa, Timber grader MOR, Ultrasonidos media MOR, Nº nudos total						

Tabla 81. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para las cuatro especies. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos para los análisis con todo el conjunto de muestras de las cuatro especies se puede concluir que las variables *nº nudos total*, *CKDR viga*, *Timber grader MOR* y *Sylvatest media MOR* son predictores del *MOR resistencia flexión axial*.

2.2.2.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LA ESPECIE PINUS SYLVESTRIS

Se analizaron para las muestras de la especie pino silvestre, mediante regresión lineal, la variable dependiente *MOR resistencia flexión axial* en función de las variables independientes *Timber grader MOR*, *Sylvatest media MOR*, *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *feed H 0.5*, *feed V 0.5*, *drill H 0.5*, *drill V 0.5*, *velocidad Ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR zona central*, *CKDR viga completa*.

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recogen como variables significativas *CKDR viga completa*.

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método
1	CKDR viga completa		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

Tabla 82. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación R² indica que el modelo así ajustado explica 56.8 % de la variabilidad en MOR resistencia a flexión (N/mm²).

Resumen del modelo ^b					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,754 ^a	,568	,535	5,36384512481 5986	1,590

a. Predictores: (Constante), CKDR viga completa

b. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

Tabla 83. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	491,883	1	491,883	17,097	,001 ^b
	Residuo	374,021	13	28,771		
	Total	865,904	14			

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

b. Predictores: (Constante), CKDR viga completa

Tabla 84-. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente MOR Resistencia flexión axial = 54,4322 - 555,408*CKDR viga completa

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	54,432	2,153		25,288	,000
	CKDR viga completa	-555,408	134,325	-,754	-4,135	,001

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

Tabla 85. Coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo		En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad
						Tolerancia
1	Densidad real (Kg/m ³)	,149 ^b	,771	,456	,217	,921
	% Albura	,111 ^b	,576	,575	,164	,948
	% Duramen	-,111 ^b	-,576	,575	-,164	,948
	Feed V 0,5	,409 ^b	1,886	,084	,478	,591
	Feed H 0,5	,150 ^b	,695	,500	,197	,744
	Drill V 0,5	,339 ^b	1,480	,165	,393	,581
	Drill H 0,5	,409 ^b	2,126	,055	,523	,708
	Timber grader MOR	,239 ^b	1,216	,247	,331	,830
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	,108 ^b	,565	,582	,161	,954
	Ultrasonidos media MOR	,164 ^b	,842	,416	,236	,893
	Nº nudos total	1,008 ^b	1,367	,197	,367	,057
	Nº nudos zona central	,367 ^b	,966	,353	,269	,232
CKDR zona central	,360 ^b	,647	,530	,183	,112	

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

b. Predictores en el modelo: (Constante), CKDR viga completa

Tabla 86. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino silvestre. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos para los análisis con todo el conjunto de muestras de la especie pino silvestre se puede concluir que la variable *CKDR Viga completa* es la única predictora del *MOR Resistencia flexión*.

2.2.3.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LA ESPECIE PINUS PINASTER

Se analizaron para todas las muestras, mediante regresión lineal, la variable dependiente *MOR resistencia flexión axial* en función de las variables independientes

MOR dinámicas, densidad real, % albura, % duramen, feed H 0.5, feed V 0.5, drill H 0.5, drill V 0.5, velocidad Ultrasonidos media, nº nudos total, nº nudos zona central, CKDR zona central, CKDR viga completa.

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recogen como variables significativas CKDR zona central y % albura.

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método
1	CKDR zona central		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
2	% Albura		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

Tabla 87. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación R² indica que el modelo así ajustado explica 72.1 % de la variabilidad en MOR resistencia a flexión (N/mm²).

Resumen del modelo ^c					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,744 ^a	,553	,518	6,02045290287 7872	
2	,849 ^b	,721	,674	4,95293816179 4418	2,606

a. Predictores: (Constante), CKDR zona central

b. Predictores: (Constante), CKDR zona central, % Albura

c. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

Tabla 88. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo 2 puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	582,634	1	582,634	16,074	,001 ^b
	Residuo	471,196	13	36,246		
	Total	1053,830	14			

2	Regresión	759,451	2	379,725	15,479	,000 ^c
	Residuo	294,379	12	24,532		
	Total	1053,830	14			
a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)						
b. Predictores: (Constante), CKDR zona central						
c. Predictores: (Constante), CKDR zona central, % Albura						

Tabla 89. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente MOR Resistencia flexión axial = 68,1135 - 2857,16*CKDR zona central - 0,147502*% Albura

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	55,223	2,598		21,252	,000
	CKDR zona central	-1955,645	487,777	-,744	-4,009	,001
2	(Constante)	68,113	5,256		12,960	,000
	CKDR zona central	-2857,157	523,248	-1,086	-5,460	,000
	% Albura	-,148	,055	-,534	-2,685	,020

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

Tabla 90. Coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo		En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad
						Tolerancia
1	Densidad real (Kg/m ³)	,257 ^b	1,293	,220	,350	,830
	% Albura	-,534 ^b	-2,685	,020	-,613	,588
	% Duramen	,534 ^b	2,685	,020	,613	,588
	Feed V 0,5	,104 ^b	,453	,659	,130	,696
	Feed H 0,5	,287 ^b	1,127	,282	,309	,520
	Drill V 0,5	,209 ^b	,933	,369	,260	,692
	Drill H 0,5	,172 ^b	,726	,482	,205	,635
	Timber grader MOR	,349 ^b	1,691	,117	,439	,706
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	,069 ^b	,360	,725	,103	,998
	Ultrasonidos media MOR	,270 ^b	1,407	,185	,376	,867
	Nº nudos total	,348 ^b	,713	,490	,202	,150

	Nº nudos zona central	,607 ^b	2,157	,052	,529	,339
	CKDR viga completa	-,046 ^b	-,077	,940	-,022	,105
2	Densidad real (Kg/m ³)	,017 ^c	,084	,935	,025	,585
	% Duramen	. ^c	.	.	.	,000
	Feed V 0,5	-,047 ^c	-,238	,817	-,071	,634
	Feed H 0,5	,136 ^c	,598	,562	,177	,478
	Drill V 0,5	,038 ^c	,187	,855	,056	,604
	Drill H 0,5	,016 ^c	,078	,939	,024	,575
	Timber grader MOR	,078 ^c	,325	,751	,097	,437
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	-,046 ^c	-,276	,788	-,083	,925
	Ultrasonidos media MOR	-,029 ^c	-,127	,902	-,038	,499
	Nº nudos total	-,355 ^c	-,732	,480	-,215	,103
	Nº nudos zona central	,303 ^c	,943	,366	,273	,227
	CKDR viga completa	,185 ^c	,373	,716	,112	,101
	a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)					
b. Predictores en el modelo: (Constante), CKDR zona central						
c. Predictores en el modelo: (Constante), CKDR zona central, % Albura						

Tabla 91. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino resinero. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos para los análisis con todo el conjunto de muestras de la especie pino resinero se puede concluir que las variables % Albura y CKDR Zona central son variables predictoras del MOE global flexión.

2.2.4.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LA ESPECIE PINUS NIGRA

Se analizaron para las muestras de la especie pino laricio, mediante regresión lineal, la variable dependiente MOR resistencia flexión axial en función de las variables independientes Timber grader MOR, Sylvatest media MOR, densidad real, % albura, % duramen, feed H 0.5, feed V 0.5, drill H 0.5, drill V 0.5, velocidad Ultrasonidos media, nº nudos total, nº nudos zona central, CKDR zona central, CKDR viga completa.

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recogen como variables significativas CKDR zona central.

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	Variables entradas	Variables eliminadas	Método
1	CKDR zona central		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

Tabla 92. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación R² indica que el modelo así ajustado explica 50.5 % de la variabilidad en MOR resistencia a flexión (N/mm²).

Resumen del modelo ^b					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,711 ^a	,505	,467	6,87990294349 8407	1,483
a. Predictores: (Constante), CKDR zona central					
b. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)					

Tabla 93. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	627,906	1	627,906	13,266	,003 ^b
	Residuo	615,330	13	47,333		
	Total	1243,236	14			
a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)						
b. Predictores: (Constante), CKDR zona central						

Tabla 94. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente MOR Resistencia flexión axial = 49,725 - 1444,91*CKDR zona central

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	49,725	4,423		11,241	,000
	CKDR zona central	-1444,913	396,713	-,711	-3,642	,003
a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)						

Tabla 95. Coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo		En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad
						Tolerancia
1	Densidad real (Kg/m ³)	,152 ^b	,690	,504	,195	,818
	% Albura	,134 ^b	,640	,535	,182	,914
	% Duramen	-,134 ^b	-,640	,535	-,182	,914
	Feed V 0,5	,171 ^b	,866	,404	,242	1,000
	Feed H 0,5	,139 ^b	,698	,499	,197	1,000
	Drill V 0,5	-,014 ^b	-,066	,948	-,019	,951
	Drill H 0,5	,243 ^b	1,256	,233	,341	,976
	Timber grader MOR	,215 ^b	,918	,377	,256	,705
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	,149 ^b	,612	,552	,174	,678
	Ultrasonidos media MOR	,187 ^b	,859	,407	,241	,823
	Nº nudos total	,031 ^b	,109	,915	,031	,517
	Nº nudos zona central	,198 ^b	,560	,586	,160	,322
	CKDR viga completa	-,328 ^b	-,631	,540	-,179	,148
a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm ²)						
b. Predictores en el modelo: (Constante), CKDR zona central						

Tabla 96. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino laricio. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos para los análisis con todo el conjunto de muestras de la especie pino laricio se puede concluir que la variable *CKDR Zona central* es predictora del *MOE global flexión*.

2.2.5.- ANÁLISIS DEL MOR PARA LA ESPECIE PINUS HALEPENSIS

Se analizaron para las muestras de la especie pino carrasco, mediante regresión lineal, la variable dependiente *MOR resistencia flexión axial* en función de las variables independientes *Timber grader MOR*, *Sylvatest media MOR*, *densidad real*, *% albura*, *% duramen*, *feed H 0.5*, *feed V 0.5*, *drill H 0.5*, *drill V 0.5*, *velocidad Ultrasonidos media*, *nº nudos total*, *nº nudos zona central*, *CKDR zona central*, *CKDR viga completa*.

Los modelos planteados por el programa informático estadístico SPSS recogen como variables significativas *Timber grader MOR* y *velocidad Ultrasonidos media*.

Variables entradas/eliminadas ^a			
Modelo	VARIABLES entradas	VARIABLES eliminadas	Método
1	Timber grader MOR		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).
2	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)		Por pasos (Criterios: Probabilidad-de-F-para-entrar <= ,050, Probabilidad-de-F-para-eliminar >= ,100).

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

Tabla 97. Modelos SPSS MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación R² indica que el modelo así ajustado explica 76.7 % de la variabilidad en MOR resistencia a flexión (N/mm²).

Resumen del modelo ^c					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,790 ^a	,625	,598	9,43802890164 3477	
2	,876 ^b	,767	,731	7,71744959526 8996	1,884

a. Predictores: (Constante), Timber grader MOR
 b. Predictores: (Constante), Timber grader MOR, Velocidad Ultrasonidos media (m/s)
 c. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

Tabla 98. Resumen del modelo MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla ANOVA, puesto que el valor-P (Sig.) es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%, de esta forma el modelo 2 puede darse por válido.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	2075,239	1	2075,239	23,297	,000 ^b
	Residuo	1247,069	14	89,076		
	Total	3322,308	15			
2	Regresión	2548,041	2	1274,020	21,391	,000 ^c
	Residuo	774,267	13	59,559		
	Total	3322,308	15			

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)
 b. Predictores: (Constante), Timber grader MOR

c. Predictores: (Constante), Timber grader MOR, Velocidad Ultrasonidos media (m/s)

Tabla 99. ANOVA MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación del modelo ajustado que relaciona la variable dependiente MOR Resistencia flexión axial = 121,525 + 2,93366*Timber grader MOR - 0,0337525*Velocidad Ultrasonidos media (m/s)

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	-2,273	8,116		-,280	,784
	Timber grader MOR	1,565	,324	,790	4,827	,000
2	(Constante)	121,525	44,437		2,735	,017
	Timber grader MOR	2,934	,553	1,482	5,301	,000
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	-,034	,012	-,787	-2,818	,015

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

Tabla 100. Coeficientes MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran las variables excluidas en cada uno de los modelos propuestos por SPSS.

Variables excluidas ^a						
Modelo		En beta	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticas de colinealidad
						Tolerancia
1	Densidad real (Kg/m ³)	,229 ^b	1,433	,176	,369	,979
	% Albura	-,343 ^b	-1,982	,069	-,482	,741
	% Duramen	,343 ^b	1,982	,069	,482	,741
	Feed V 0,5	,159 ^b	,880	,395	,237	,833
	Feed H 0,5	-,008 ^b	-,031	,975	-,009	,460
	Drill V 0,5	-,019 ^b	-,098	,923	-,027	,807
	Drill H 0,5	,292 ^b	1,521	,152	,389	,667
	Velocidad Ultrasonidos media (m/s)	-,787 ^b	-2,818	,015	-,616	,230
	Ultrasonidos media MOR	-,518 ^b	-1,456	,169	-,374	,196
	Nº nudos total	,196 ^b	,802	,437	,217	,461
	Nº nudos zona central	,183 ^b	,895	,387	,241	,648
	CKDR viga completa	,005 ^b	,018	,986	,005	,311
CKDR zona central	,064 ^b	,272	,790	,075	,523	
2	Densidad real (Kg/m ³)	,117 ^c	,803	,438	,226	,874

% Albura	-,027 ^c	-,110	,914	-,032	,318
% Duramen	,027 ^c	,110	,914	,032	,318
Feed V 0,5	-,011 ^c	-,066	,949	-,019	,694
Feed H 0,5	,010 ^c	,049	,962	,014	,460
Drill V 0,5	,048 ^c	,308	,763	,089	,787
Drill H 0,5	,269 ^c	1,764	,103	,454	,665
Ultrasonidos media MOR	,362 ^c	,742	,473	,209	,078
Nº nudos total	-,072 ^c	-,316	,758	-,091	,365
Nº nudos zona central	-,161 ^c	-,754	,465	-,213	,408
CKDR viga completa	-,130 ^c	-,518	,614	-,148	,299
CKDR zona central	-,126 ^c	-,624	,545	-,177	,464

a. Variable dependiente: MOR Resistencia flexión axial (N/mm²)

b. Predictores en el modelo: (Constante), Timber grader MOR

c. Predictores en el modelo: (Constante), Timber grader MOR, Velocidad Ultrasonidos media (m/s)

Tabla 101. Variables excluidas MOR estático en función de variables y parámetros de la madera para la especie pino carrasco. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 7. JUSTIFICACIÓN DE LA DEFORMACIÓN “W”

ÍNDICE GENERAL

1.- INTRODUCCIÓN	288
2.- OBJETIVOS.....	289
3.- METODOLOGÍA	290
3.1.- ENSAYOS <i>IN SITU</i> COMPARATIVA DEFORMACIÓN REAL VS. DESPLAZAMIENTO PLANCHA	290
3.2.- MODELIZACIÓN SAP 2000.....	291
4.- ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	292
4.1.- COMPARATIVA DESPLAZAMIENTO REAL VS. DESPLAZAMIENTO PLANCHA.....	292
4.1.1.- VIGA PS 16	293
4.1.2.- VIGA PS 17	294
4.1.3.- VIGA PN 16.....	295
4.1.4.- VIGA PN 17	296
4.2.- MODELIZACIÓN SAP 2000.....	297
5.- CONCLUSIONES	298

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ensayo para la medición del módulo de elasticidad global en flexión y resistencia a la flexión axial.....	288
Figura 2. Componentes máquina ensayo a flexión.	288
Figura 3. Modelo diferenciación de deformaciones.....	289
Figura 4. Medición deformación real mediante galga en viga PS 16.	290
Figura 5. Medición deformación real mediante galga en viga PN 16.....	290
Figura 6. Modelo SAP viga 16.	291
Figura 7. Modelo SAP- Deformada.	292
Figura 8. Modelo SAP - deformación por colores.	292
Figura 9. Gráfico desplazamiento plancha - deformación real.	293
Figura 10. Gráfico tensión-deformación PS 16.	293
Figura 11. Gráfico comparativo deformación real vs. desplazamiento plancha PS 16.	294
Figura 12. Gráfico tensión-deformación PS 17.	294
Figura 13. Gráfico comparativo deformación real vs. desplazamiento plancha PS 17.	295
Figura 14. Gráfico tensión-deformación PN 17.	295
Figura 15. Gráfico comparativo deformación real vs. desplazamiento plancha PN 16.	296
Figura 16. Gráfico tensión-deformación PN 17.	296
Figura 17. Gráfico comparativo deformación real vs. desplazamiento plancha PN 17.	297

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones y pesos vigas ensayo.291
Tabla 2. Resultados ensayos deformación real vs. desplazamiento plancha.292
Tabla 3. Resultados modelización SAP viga 16.297

1.- INTRODUCCIÓN

En la realización de los ensayos físico-mecánicos, según norma UNE-EN 408:2011+A1, tanto para la determinación de la resistencia a la flexión axial como para la determinación del módulo de elasticidad global en flexión se hace necesaria la medición de la deformación “w” que sufre la viga al ser sometida a una carga.

Esta deformación “w” debe medirse en el centro de la luz y en el centro del borde traccionado o comprimido, o, cuando “w” se mide en el eje neutro, debe tomarse la media de las mediciones realizadas en ambas caras de la probeta, tal como se indica en la siguiente figura:

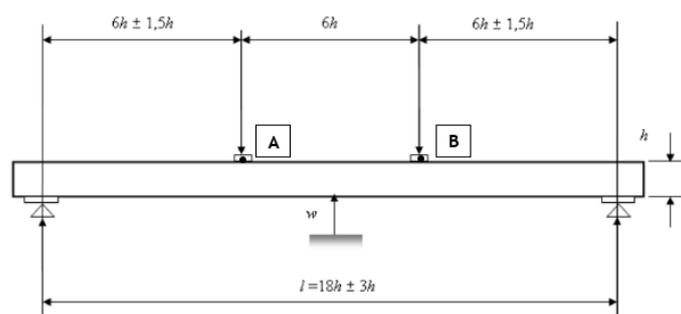


Figura 1. Ensayo para la medición del módulo de elasticidad global en flexión y resistencia a la flexión axial. Fuente: UNE-EN 408:2011+A1.

En la realización de los ensayos se prevén ciertas limitaciones, de manera que la deformación “w” expresada en la norma (denominada deformación real) no se puede registrar con la máquina de ensayos que se va a utilizar en las instalaciones de AIDIMME. De esta forma, la máquina utilizada para los ensayos registra la bajada de la plancha metálica (denominada desplazamiento plancha) que realiza la compresión de la viga, una vez la plancha ha apoyado sobre los apoyos metálicos, como se aprecia en la fig. 2.

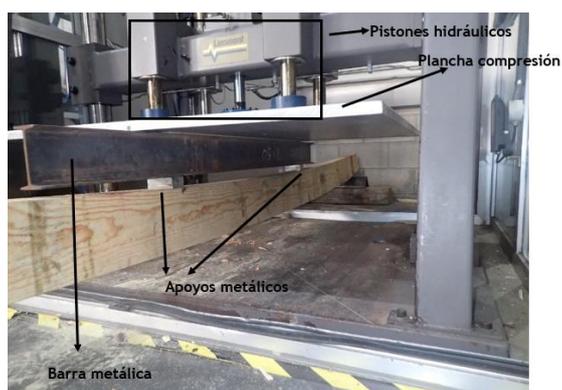


Figura 2. Componentes máquina ensayo a flexión. Fuente: Elaboración propia.

Esta característica implica que la deformación real no coincida exactamente con el desplazamiento plancha.

Al tratarse de un sistema de viga biapoyada esta presenta curvatura en el momento de aplicación de una carga, de esta manera la deformación “w” no coincide con el desplazamiento de la plancha (desplazamientos de los puntos A y B, figura 3).

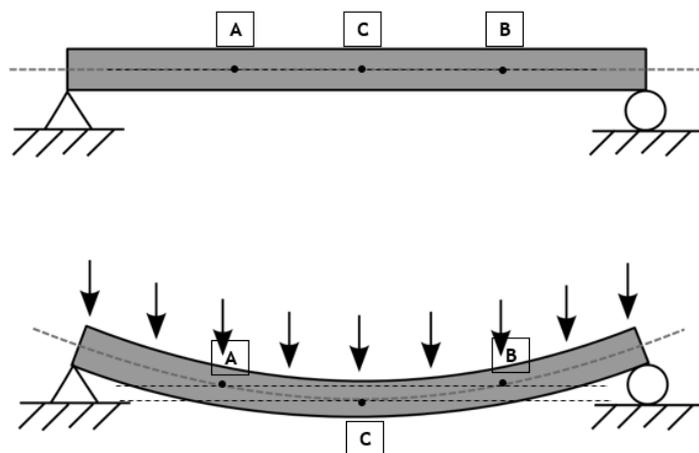


Figura 3. Modelo diferenciación de deformaciones. Fuente: Elaboración propia

Ya que la diferencia deformacional entre el descenso de los puntos A y B (*desplazamiento plancha*) y el punto C (*deformación real*) es mínima, solo unos pocos milímetros, se realizan los cálculos de resistencia a flexión y determinación del módulo de elasticidad global con las medidas del desplazamiento de la plancha.

Para corroborar que la diferencia entre desplazamiento y deformación es mínima y constar que la variación de los resultados al utilizar cualquier medida es muy baja y no va a tener significancia en el resultado final se procede a analizar el alcance del error cometido mediante dos métodos independientes: i) Ensayos *in situ* con 4 vigas ii) modelización SAP.

Los métodos realizados para la justificación de las pruebas realizadas en la máquina de flexión se realizaron con dos vigas de pino silvestre y dos vigas de pino laricio, sobrantes del primer lote de madera compuesto por 26 vigas de cada especie.

2.- OBJETIVOS

El objetivo de estos métodos comparativos es analizar la similar evolución de la deformación vertical tanto para el valor “real” como “plancha”. Así, quedará justificada la utilización de los valores de *desplazamiento plancha* en los ensayos destructivos para los cálculos de resistencia a flexión y módulo de elasticidad global.

3.- METODOLOGÍA

3.1.- ENSAYOS *IN SITU* COMPARATIVA DEFORMACIÓN REAL VS. DESPLAZAMIENTO PLANCHA

Ya que la máquina de ensayo no recoge la *deformación real* se realizan cuatro ensayos con dos vigas de pino silvestre y dos de pino laricio, de manera que se ubica una galga extensiométrica en la zona inferior de la mitad de la viga, recogiendo así la *deformación real* que sufre la viga, a la vez que se anota la carga que produce dicha deformación y el *desplazamiento plancha*.



Figura 4. Medición de deformación real mediante galga en viga PS 16. Fuente: Elaboración propia.



Figura 5. Medición de deformación real mediante galga en viga PN 16. Fuente: Elaboración propia.

Primeramente, se anotan las dimensiones y pesos de las cuatro vigas, así como la distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo (a).

VIGA	b (mm)	h (mm)	Longitud (mm)	a (cm)	Peso (Kg)
PS 16	82,00	177,00	4200,00	133,50	28,20
PS 17	77,00	176,00	4110,00	134,50	26,41
PN 16	80,00	174,00	4144,00	135,00	30,71
PN 17	78,00	176,00	4106,00	134,50	30,32

Tabla 1. Dimensiones y pesos vigas ensayo. Fuente: Elaboración propia.

Los ensayos consisten en ir aplicando variaciones de carga para cada una de las vigas a la vez que se recogen los desplazamientos y deformaciones, tanto deformaciones reales (medidos por la galga extensiométrica) como desplazamientos de plancha (medidos por la propia máquina).

Se aplican tres cargas distintas en cada una de las vigas y se anotan sus deformaciones reales y desplazamientos de plancha, estando los valores de las cargas aproximadamente comprendidas entre el 10 % de la fuerza máxima ($F_{\text{máx}}$) y el 40 % de la fuerza máxima.

3.2.- MODELIZACIÓN SAP 2000

Para comprobar de forma teórica la linealidad entre la deformación real y el desplazamiento de la plancha, se modeliza a modo de ejemplo la viga PS16 en SAP2000 v20 mediante elementos finitos lineales con las características mecánicas y geométricas de la viga PS16.

A partir de un análisis estático lineal con cargas puntuales crecientes a una distancia “a” de los apoyos extremos se obtienen la deformación vertical en los puntos de estudio.

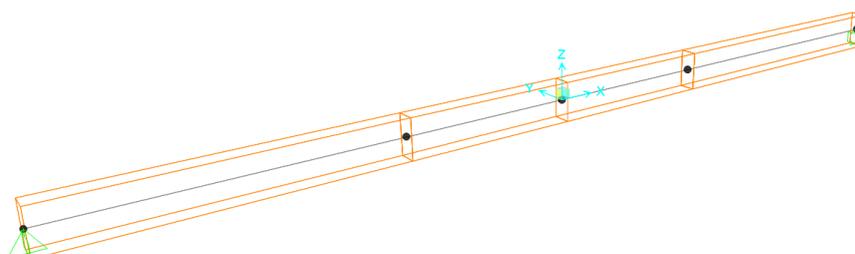


Figura 6. Modelo SAP viga 16. Fuente: Elaboración propia.

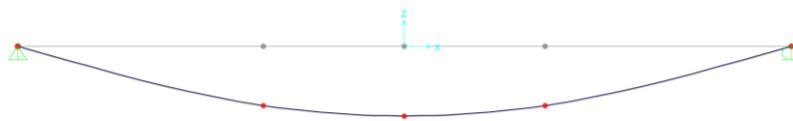


Figura 7. Modelo SAP- Deformada. Fuente: Elaboración propia.

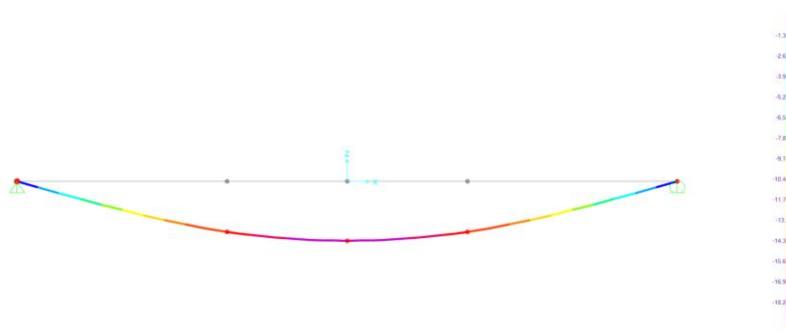


Figura 8. Modelo SAP - deformación por colores. Fuente: Elaboración propia.

4.- ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1.- COMPARATIVA DESPLAZAMIENTO REAL VS. DESPLAZAMIENTO PLANCHA

Posteriormente a la realización de los ensayos se recogen datos de *deformaciones reales* y datos de *desplazamientos de plancha* para una misma viga.

VIGA	Fuerza (N)	Desplazamiento plancha (mm)	Deformación real (mm)
PS 16	1950	7,40	7,50
PS 16	3108	12,80	11,70
PS 16	4760	18,30	19,00
PS 17	2030	6,90	9,27
PS 17	3253	11,10	14,60
PS 17	4988	15,40	19,70
PN 16	2260	6,90	8,30
PN 16	3292	9,90	11,76
PN 16	4091	13,70	15,20
PN 17	2296	6,80	8,07
PN 17	3319	9,80	11,92
PN 17	4218	12,50	15,22

Tabla 2. Resultados ensayos deformación real vs. desplazamiento plancha. Fuente: Elaboración propia.

Se inserta gráfica de valores de desplazamiento y deformación, observando que el coeficiente de la variable independiente es muy cercano a la unidad.

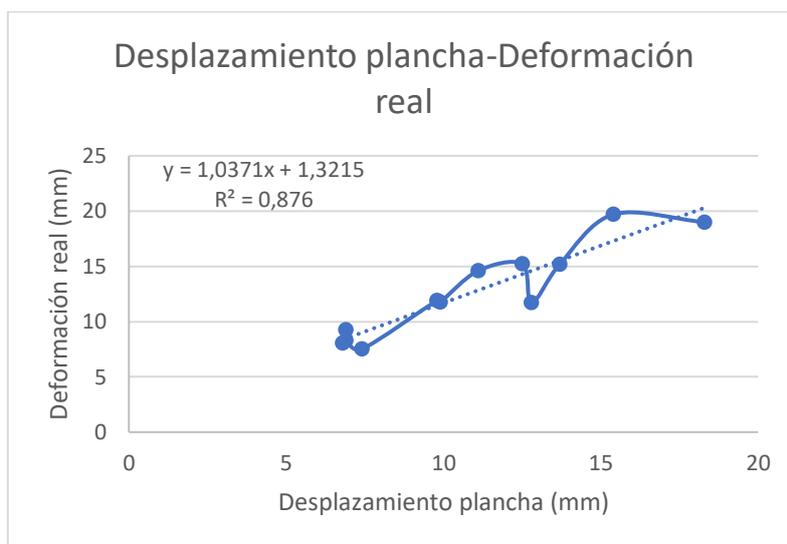


Figura 9. Gráfico desplazamiento plancha - deformación real. Fuente: Elaboración propia.

Se procede a representar para cada una de las vigas mediante gráficos de dispersión, en hoja de cálculo Excel, los valores obtenidos de *desplazamiento plancha* como los obtenidos de la *deformación real* en función de la carga aplicada. También se representa el gráfico de desplazamiento-deformación aportado por la máquina de ensayo.

4.1.1.- VIGA PS 16

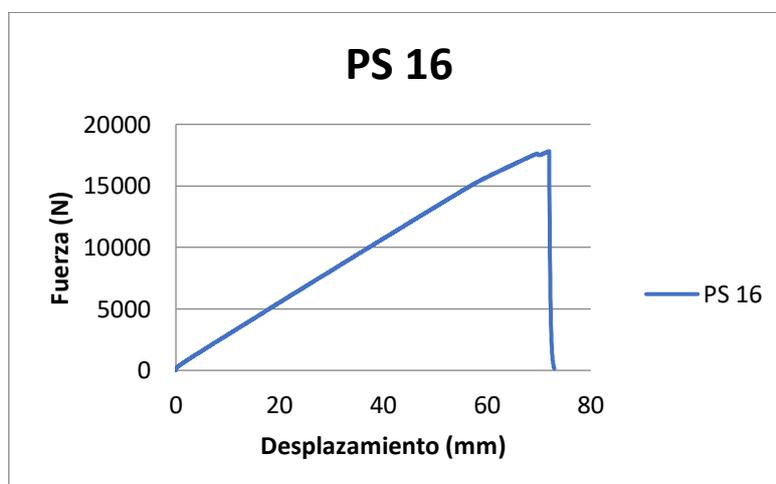


Figura 10. Gráfico tensión-deformación PS 16. Fuente: Elaboración propia.

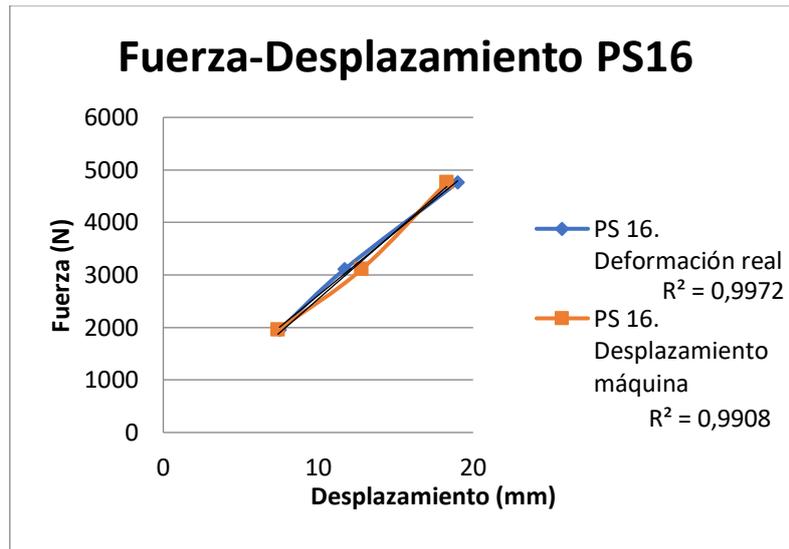


Figura 11. Gráfico comparativo deformación real vs. desplazamiento plancha PS 16. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar tanto el *desplazamiento plancha* como la *deformación real* tienen una tendencia lineal.

4.1.2.- VIGA PS 17

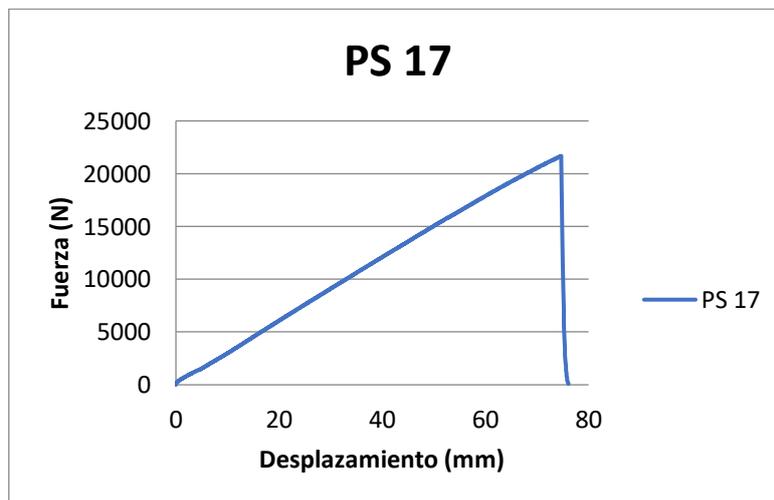


Figura 12. Gráfico tensión-deformación PS 17. Fuente: Elaboración propia.

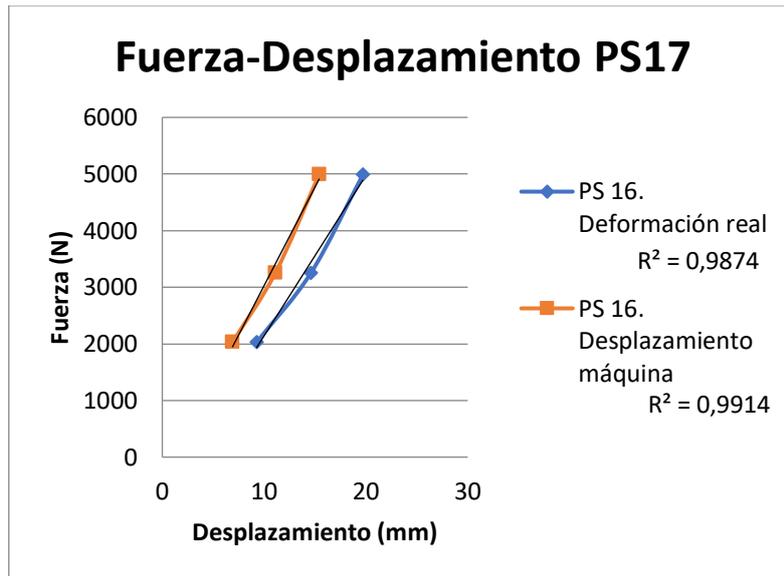


Figura 13. Gráfico comparativo deformación real vs. desplazamiento plancha PS 17. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar tanto el *desplazamiento plancha* como el *deformación real* tienen una tendencia lineal.

4.1.3.- VIGA PN 16

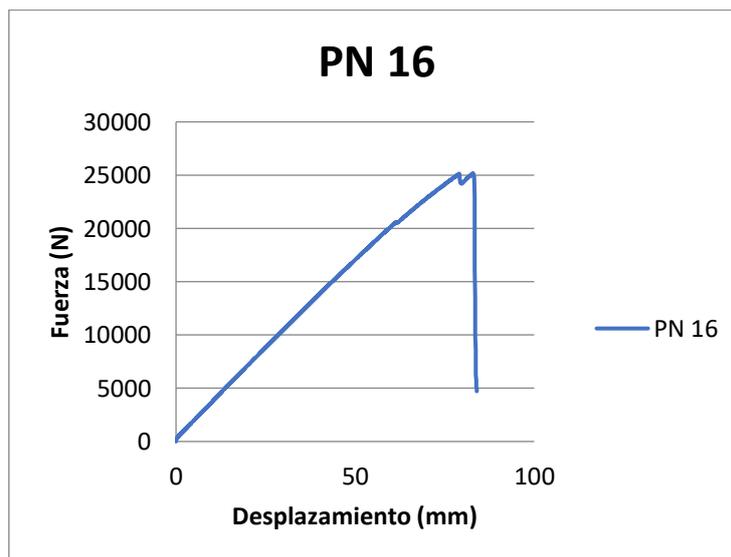


Figura 14. Gráfico tensión-deformación PN 17. Fuente: Elaboración propia.

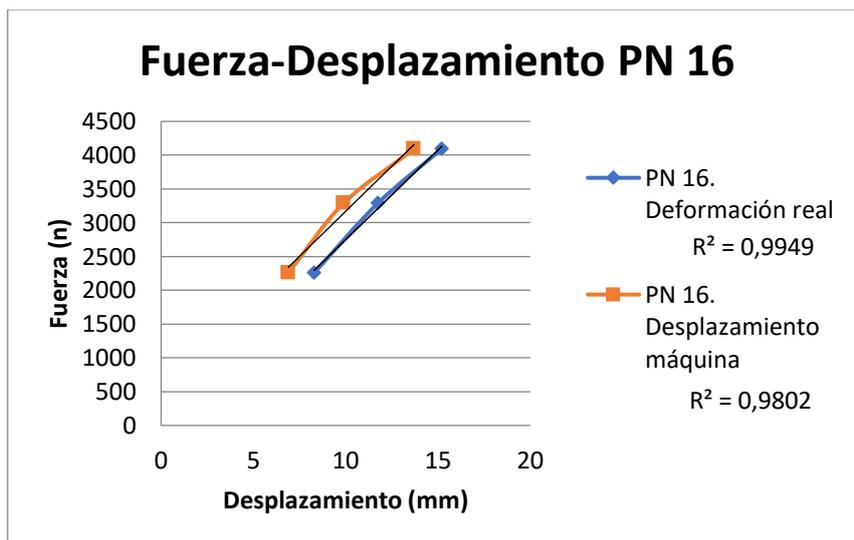


Figura 15. Gráfico comparativo deformación real vs. desplazamiento plancha PN 16. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar tanto el *desplazamiento plancha* como el *deformación real* tienen una tendencia lineal.

4.1.4.- VIGA PN 17

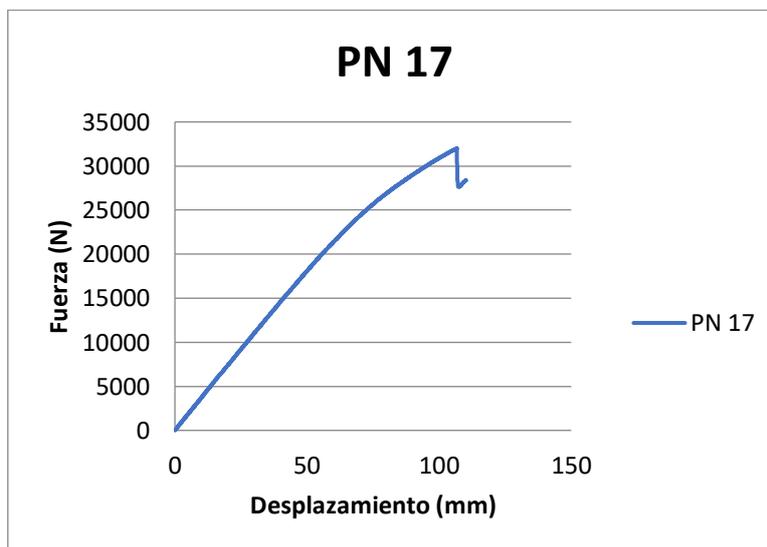


Figura 16. Gráfico tensión-deformación PN 17. Fuente: Elaboración propia.

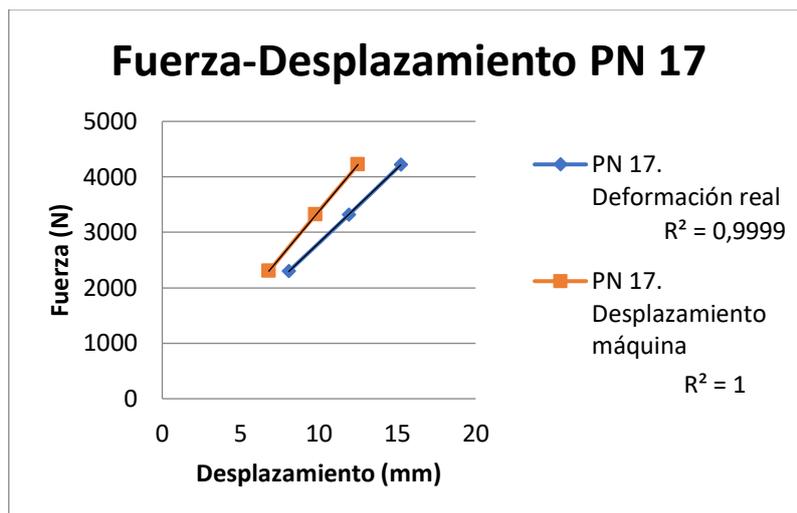


Figura 17. Gráfico comparativo deformación real vs. desplazamiento plancha PN 17. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar tanto el *desplazamiento plancha* como el *deformación real* tienen una tendencia lineal.

4.2.- MODELIZACIÓN SAP 2000

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos según la modelización realizada en SAP2000 para la viga PS 16. Se observan diferencias deformacionales muy pequeñas entre los puntos de estudio, con una tendencia tenso-deformacional muy lineal. Por tanto, puede concluirse que se ha comprobado teóricamente que existe una relación muy lineal entre la deformación real y el desplazamiento de la plancha.

VIGA	Fuerza (N)	Desplazamiento plancha (mm)	Deformación real (mm)
PS 16	1950	7,012	8,235
PS 16	3108	10,75	12,65
PS 16	4760	16,10	18,95

Tabla 3. Resultados modelización SAP viga 16. Fuente: Elaboración propia.

Debido a que en SAP2000 no se modeliza la distribución de nudos de la viga, los resultados de la tabla 3 no son idénticos a los correspondientes de la tabla 2, pero muestran una tendencia muy similar y un grado de aproximación suficiente.

5.- CONCLUSIONES

Analizados los datos y sus relaciones estadísticas, se observa una tendencia muy lineal entre los resultados obtenidos con la deformación real y con el desplazamiento de la plancha. Este hecho también se ha comprobado teóricamente mediante la modelización con SAP2000 de una viga.

Como además, en la regresión lineal entre la deformación real y el desplazamiento de la plancha, el coeficiente de la segunda variable es muy próximo a 1, es perfectamente justificable el uso final del desplazamiento de la plancha tanto para los cálculos de resistencia a flexión como de módulo de elasticidad global.

ANEXO 8. TABLAS DE RESULTADOS

ÍNDICE GENERAL

1.- RESULTADOS MEDICIONES Y PESOS.....	301
1.1.- MEDICIONES Y PESOS VIGAS	301
1.2.- MEDICIONES Y PESOS REBANADAS	303
2.- RESULTADOS DENSIDADES	305
2.1.- DENSIDADES REBANADAS.....	305
2.2.- DENSIDAD VIGAS.....	308
3.- MEDICIÓN DE NUDOS	313
3.1.- NUDOS ESPECIE PINUS SYLVESTRIS	313
3.2.- NUDOS ESPECIE PINUS PINASTER	317
3.3.- NUDOS ESPECIE PINUS NIGRA	322
3.4.- NUDOS ESPECIE PINUS HALEPENSIS	326
4.- INDICES CKDR.....	333
5.- ULTRASONIDOS	336
6.- VIBRACIONES INDUCIDAS.....	354
7.- RESISTOGRAFÍAS	356
7.1.- MEDIAS TODAS ESPECIES	356
7.2.- PLANTILLA RESISTOGRAFIAS.....	359
8.- CLASIFICACIÓN VISUAL	364
9.- % ALBURA/DURAMEN	368
10.- RESULTADOS ENSAYOS DE ROTURA	372
10.1.- DATOS MÓDULO DE ELASTICIDAD GLOBAL A FLEXIÓN	372
10.2.- DATOS RESISTENCIA A FLEXIÓN AXIAL.....	375
10.3.- PLANTILLA DATOS LANDSMONT	379

1.- RESULTADOS MEDICIONES Y PESOS

1.1.- MEDICIONES Y PESOS VIGAS

Especie	Código	Muestra	Cara (mm)	Canto (mm)	Longitud (mm)	Volumen (m ³)	Peso (Kg)
Pinus Sylvestris	PS 1	1	176,000	79,000	4173,000	0,058	30,650
Pinus Sylvestris	PS 2	2	173,000	80,000	4182,000	0,058	30,200
Pinus Sylvestris	PS 3	3	174,000	77,000	4209,000	0,056	27,200
Pinus Sylvestris	PS 4	4	175,000	80,000	4230,000	0,059	26,200
Pinus Sylvestris	PS 5	5	175,000	80,000	4204,000	0,059	27,400
Pinus Sylvestris	PS 6	6	173,000	78,000	4030,000	0,054	28,550
Pinus Sylvestris	PS 7	7	176,000	79,000	4249,000	0,059	29,050
Pinus Sylvestris	PS 8	8	175,000	79,000	4236,000	0,059	34,950
Pinus Sylvestris	PS 9	9	173,000	77,000	4078,000	0,054	32,315
Pinus Sylvestris	PS 10	10	175,000	77,000	4238,000	0,057	34,483
Pinus Sylvestris	PS 11	11	175,000	78,000	4330,000	0,059	31,990
Pinus Sylvestris	PS 12	12	172,000	78,000	4201,000	0,056	30,093
Pinus Sylvestris	PS 13	13	174,000	76,000	4234,000	0,056	29,685
Pinus Sylvestris	PS 14	14	175,000	78,000	4144,000	0,057	29,928
Pinus Sylvestris	PS 15	15	176,000	78,000	4037,000	0,055	30,685
Pinus Pinaster	PP 1	16	180,000	77,000	4000,000	0,055	26,855
Pinus Pinaster	PP 2	17	178,000	79,000	4000,000	0,056	25,084
Pinus Pinaster	PP 3	18	179,000	76,000	4000,000	0,054	24,822
Pinus Pinaster	PP 4	19	179,000	80,000	3970,000	0,057	29,137
Pinus Pinaster	PP 5	20	178,000	77,000	3957,000	0,054	30,207
Pinus Pinaster	PP 6	21	179,000	78,000	3946,000	0,055	28,163
Pinus Pinaster	PP 7	22	178,000	77,000	3980,000	0,055	28,403
Pinus Pinaster	PP 8	23	179,000	77,000	3980,000	0,055	30,287
Pinus Pinaster	PP 9	24	177,000	76,000	4050,000	0,054	36,469
Pinus Pinaster	PP 10	25	176,000	78,000	3943,000	0,054	27,752
Pinus Pinaster	PP 11	26	176,000	79,000	3997,000	0,056	29,228
Pinus Pinaster	PP 12	27	176,000	77,000	3992,000	0,054	31,696
Pinus Pinaster	PP 13	28	175,000	77,000	3987,000	0,054	31,346

TABALAS DE RESULTADOS

Pinus Pinaster	PP 14	29	175,000	77,000	4000,000	0,054	33,117
Pinus Pinaster	PP 15	30	176,000	78,000	4000,000	0,055	30,241
Pinus Nigra	PN 1	31	174,000	76,000	4057,000	0,054	31,769
Pinus Nigra	PN 2	32	176,000	79,000	4096,000	0,057	32,279
Pinus Nigra	PN 3	33	174,000	79,000	4082,000	0,056	34,292
Pinus Nigra	PN 4	34	175,000	79,000	4051,000	0,056	33,455
Pinus Nigra	PN 5	35	175,000	79,000	4048,000	0,056	32,731
Pinus Nigra	PN 6	36	175,000	80,000	4077,000	0,057	28,801
Pinus Nigra	PN 7	37	177,000	75,000	4141,000	0,055	31,924
Pinus Nigra	PN 8	38	175,000	79,000	4062,000	0,056	33,846
Pinus Nigra	PN 9	39	176,000	78,000	4081,000	0,056	35,248
Pinus Nigra	PN 10	40	177,000	78,000	4088,000	0,056	31,047
Pinus Nigra	PN 11	41	176,000	78,000	4089,000	0,056	31,425
Pinus Nigra	PN 12	42	174,000	79,000	4065,000	0,056	33,703
Pinus Nigra	PN 13	43	175,000	78,000	4076,000	0,056	34,703
Pinus Nigra	PN 14	44	176,000	77,000	4073,000	0,055	29,391
Pinus Nigra	PN 15	45	176,000	78,000	4074,000	0,056	32,986
Pinus Halepensis	PH 1	46	178,000	86,000	4037,000	0,062	36,693
Pinus Halepensis	PH 2	47	173,000	88,000	4004,000	0,061	37,522
Pinus Halepensis	PH 3	48	175,000	79,000	4004,000	0,055	34,796
Pinus Halepensis	PH 4	49	178,000	76,000	4033,000	0,055	34,450
Pinus Halepensis	PH 5	50	174,000	78,000	3994,000	0,054	34,282
Pinus Halepensis	PH 6	51	173,000	73,000	4009,000	0,051	33,672
Pinus Halepensis	PH 7	52	174,000	75,000	3988,000	0,052	34,453
Pinus Halepensis	PH 8	53	175,000	77,000	4000,000	0,054	34,085
Pinus Halepensis	PH 9	54	173,000	77,000	4007,000	0,053	34,665
Pinus Halepensis	PH 10	55	177,000	77,000	4034,000	0,055	35,949
Pinus Halepensis	PH 11	56	174,000	79,000	4040,000	0,056	37,033
Pinus Halepensis	PH 12	57	172,000	77,000	4025,000	0,053	35,934
Pinus Halepensis	PH 13	58	175,000	77,000	4045,000	0,055	32,139
Pinus Halepensis	PH 14	59	175,000	79,000	4042,000	0,056	32,880
Pinus Halepensis	PH 15	60	171,000	77,000	4039,000	0,053	34,646
Pinus Halepensis	PH 16	61	180,000	78,000	4028,000	0,057	36,314

1.2.- MEDICIONES Y PESOS REBANADAS

Espece	Código	Muestra	Cara (mm)	Canto (mm)	Longitud (mm)	Volumen (dm3)	Peso (g)
Pinus Sylvestris	PS 1	V1	174,720	64,970	80,440	0,913	435,000
Pinus Sylvestris	PS 2	V2	175,910	67,870	80,710	0,964	447,700
Pinus Sylvestris	PS 3	V3	177,340	74,880	78,050	1,036	489,050
Pinus Sylvestris	PS 4	V4	178,660	76,090	80,010	1,088	449,400
Pinus Sylvestris	PS 5	V5	178,580	79,260	80,010	1,132	481,700
Pinus Sylvestris	PS 6	V6	176,960	64,330	78,350	0,892	425,300
Pinus Sylvestris	PS 7	V7	174,580	76,170	78,760	1,047	465,100
Pinus Sylvestris	PS 8	V8	174,180	76,880	80,120	1,073	632,200
Pinus Sylvestris	PS 9	V9	174,220	83,870	79,260	1,158	608,000
Pinus Sylvestris	PS 10	V10	175,110	65,800	78,190	0,901	558,200
Pinus Sylvestris	PS 11	V11	175,800	96,010	79,420	1,340	677,300
Pinus Sylvestris	PS 12	V12	175,010	62,550	77,050	0,843	394,100
Pinus Sylvestris	PS 13	V13	175,170	68,840	75,660	0,912	431,900
Pinus Sylvestris	PS 14	V14	173,610	76,750	79,940	1,065	552,500
Pinus Sylvestris	PS 15	V15	176,020	68,530	79,590	0,960	509,700
Pinus Pinaster	PP 1	V1	179,270	78,170	66,160	0,927	419,000
Pinus Pinaster	PP 2	V2	177,810	79,800	70,770	1,004	428,500
Pinus Pinaster	PP 3	V3	178,000	76,470	64,020	0,871	381,000
Pinus Pinaster	PP 4	V4	177,800	80,400	66,810	0,955	487,000
Pinus Pinaster	PP 5	V5	177,630	77,980	64,600	0,895	481,000
Pinus Pinaster	PP 6	V6	179,380	77,710	68,240	0,951	461,000
Pinus Pinaster	PP 7	V7	176,630	78,610	66,150	0,918	444,000
Pinus Pinaster	PP 8	V8	178,130	78,280	73,790	1,029	560,500
Pinus Pinaster	PP 9	V9	175,470	73,970	56,380	0,732	510,000
Pinus Pinaster	PP 10	V10	177,800	78,580	61,410	0,858	430,500
Pinus Pinaster	PP 11	V11	173,300	79,390	54,620	0,751	397,000
Pinus Pinaster	PP 12	V12	173,970	77,900	62,180	0,843	479,000
Pinus Pinaster	PP 13	V13	173,365	77,800	68,020	0,917	526,500
Pinus Pinaster	PP 14	V14	175,020	79,190	76,000	1,053	607,500
Pinus Pinaster	PP 15	V15	175,150	77,730	68,530	0,933	573,500

TABALAS DE RESULTADOS

Pinus Nigra	PN 1	V1	175,520	105,650	79,000	1,465	735,500
Pinus Nigra	PN 2	V2	173,520	79,140	79,200	1,088	561,000
Pinus Nigra	PN 3	V3	175,820	79,880	79,490	1,116	617,300
Pinus Nigra	PN 4	V4	174,390	88,590	79,110	1,222	633,600
Pinus Nigra	PN 5	V5	174,250	94,420	79,340	1,305	728,300
Pinus Nigra	PN 6	V6	177,600	85,990	80,890	1,235	553,200
Pinus Nigra	PN 7	V7	174,380	75,200	78,640	1,031	495,200
Pinus Nigra	PN 8	V8	172,440	93,770	79,620	1,287	735,800
Pinus Nigra	PN 9	V9	174,070	125,240	79,240	1,727	973,200
Pinus Nigra	PN 10	V10	174,350	104,310	78,680	1,431	735,300
Pinus Nigra	PN 11	V11	173,510	71,810	80,770	1,006	522,800
Pinus Nigra	PN 12	V12	171,160	87,130	81,510	1,216	645,500
Pinus Nigra	PN 13	V13	173,570	77,240	81,020	1,086	580,500
Pinus Nigra	PN 14	V14	176,960	74,630	79,440	1,049	479,300
Pinus Nigra	PN 15	V15	176,900	74,780	79,360	1,050	553,200
Pinus Halepensis	PH 1	V1	175,800	86,560	61,350	0,934	539,000
Pinus Halepensis	PH 2	V2	172,910	83,870	62,330	0,904	636,000
Pinus Halepensis	PH 3	V3	173,500	81,440	61,920	0,875	505,000
Pinus Halepensis	PH 4	V4	175,300	79,310	66,980	0,931	540,000
Pinus Halepensis	PH 5	V5	171,700	80,230	61,000	0,840	578,500
Pinus Halepensis	PH 6	V6	173,110	77,060	62,760	0,837	537,000
Pinus Halepensis	PH 7	V7	175,780	79,460	71,120	0,993	560,000
Pinus Halepensis	PH 8	V8	172,920	80,100	64,500	0,893	520,500
Pinus Halepensis	PH 9	V9	175,220	78,250	62,000	0,850	473,000
Pinus Halepensis	PH 10	V10	177,410	79,720	68,290	0,966	435,500
Pinus Halepensis	PH 11	V11	176,850	84,510	56,750	0,848	412,500
Pinus Halepensis	PH 12	V12	175,800	80,900	65,600	0,933	553,500
Pinus Halepensis	PH 13	V13	175,130	78,190	69,360	0,950	528,500
Pinus Halepensis	PH 14	V14	176,150	83,070	75,930	1,111	613,500
Pinus Halepensis	PH 15	V15	175,630	78,380	71,760	0,988	621,000
Pinus Halepensis	PH 16	V16	175,100	76,220	73,030	0,975	543,500

2.- RESULTADOS DENSIDADES

2.1.- DENSIDADES REBANADAS

Especie	Muestra	h (mm)	b (mm)	l (mm)	Volumen (mm ³)	Volumen (m ³)	Peso (g)	Densidad rebanada (kg/m ³)
Pinus Sylvestris	PS1	174,7 2	64,97	80,44	913119,358	0,00091312	435	476,388
Pinus Sylvestris	PS2	175,9 1	67,87	80,71	963597,634	0,0009636	447,7	464,613
Pinus Sylvestris	PS3	177,3 4	74,88	78,05	1036443,06	0,00103644	489,05	471,854
Pinus Sylvestris	PS4	178,6 6	76,09	80,01	1087675,09	0,00108768	449,4	413,174
Pinus Sylvestris	PS5	178,5 8	79,26	80,01	1132481,61	0,00113248	481,7	425,349
Pinus Sylvestris	PS6	176,9 6	64,33	78,35	891923,613	0,00089192	425,3	476,834
Pinus Sylvestris	PS7	174,5 8	76,17	78,76	1047331,47	0,00104733	465,1	444,080
Pinus Sylvestris	PS8	174,1 8	76,88	80,12	1072883,59	0,00107288	632,2	589,253
Pinus Sylvestris	PS9	174,2 2	83,87	79,26	1158133,76	0,00115813	608	524,982
Pinus Sylvestris	PS10	175,1 1	65,8	78,19	900923,789	0,00090092	558,2	619,586
Pinus Sylvestris	PS11	175,8	96,01	79,42	1340495,08	0,0013405	677,3	505,261
Pinus Sylvestris	PS12	175,0 1	62,55	77,05	843456,757	0,00084346	394,1	467,243
Pinus Sylvestris	PS13	175,1 7	68,84	75,66	912361,454	0,00091236	431,9	473,386
Pinus Sylvestris	PS14	173,6 1	76,75	79,94	1065165,93	0,00106517	552,5	518,698

TABLAS DE RESULTADOS

Pinus Sylvestris	PS15	176,0 2	68,53	79,59	960066,361	0,00096007	509,7	530,900
Pinus Nigra	PN1	175,5 2	105,6 5	79	1464951,35	1,46495135	735,5	502,064
Pinus Nigra	PN2	173,5 2	79,14	79,2	1087603,93	1,08760393	561	515,812
Pinus Nigra	PN3	175,8 2	79,88	79,49	1116397,43	1,11639743	617,3	552,939
Pinus Nigra	PN4	174,3 9	88,59	79,11	1222187,01	1,22218701	633,6	518,414
Pinus Nigra	PN5	174,2 5	94,42	79,34	1305356,03	1,30535603	728,3	557,932
Pinus Nigra	PN6	177,6	85,99	80,89	1235337,84	1,23533784	553,2	447,812
Pinus Nigra	PN7	174,3 8	75,2	78,64	1031235,89	1,03123589	495,2	480,200
Pinus Nigra	PN8	172,4 4	93,77	79,62	1287431,42	1,28743142	735,8	571,525
Pinus Nigra	PN9	174,0 7	125,2 4	79,24	1727473,74	1,72747374	973,2	563,366
Pinus Nigra	PN10	174,3 5	104,3 1	78,68	1430909,77	1,43090977	735,3	513,868
Pinus Nigra	PN11	173,5 1	71,81	80,77	1006374,26	1,00637426	522,8	519,488
Pinus Nigra	PN12	171,1 6	87,13	81,51	1215572,55	1,21557255	645,5	531,025
Pinus Nigra	PN13	173,5 7	77,24	81,02	1086198,42	1,08619842	580,5	534,432
Pinus Nigra	PN14	176,9 6	74,63	79,44	1049126,33	1,04912633	479,3	456,856
Pinus Nigra	PN15	176,9	74,78	79,36	1049820,27	1,04982027	553,2	526,947
Pinus Pinaster	PP1	179,2 7	78,17	66,16	927135,535	0,00092714	419	451,929

TABLAS DE RESULTADOS

Pinus Pinaster	PP2	177,8 1	79,8	70,77	1004172,37	0,00100417	428,5	426,719
Pinus Pinaster	PP3	178	76,47	64,02	871418,473	0,00087142	381	437,218
Pinus Pinaster	PP4	177,8	80,4	66,81	955056,967	0,00095506	487	509,917
Pinus Pinaster	PP5	177,6 3	77,98	64,6	894812,546	0,00089481	481	537,542
Pinus Pinaster	PP6	179,3 8	77,71	68,24	951239,655	0,00095124	461	484,630
Pinus Pinaster	PP7	176,6 3	78,61	66,15	918485,096	0,00091849	444	483,404
Pinus Pinaster	PP8	178,1 3	78,28	73,79	1028928,97	0,00102893	560,5	544,741
Pinus Pinaster	PP9	175,4 7	73,97	56,38	731785,106	0,00073179	510	696,925
Pinus Pinaster	PP10	177,8	78,58	61,41	857991,289	0,00085799	430,5	501,753
Pinus Pinaster	PP11	173,3	79,39	54,62	751477,636	0,00075148	397	528,292
Pinus Pinaster	PP12	173,9 7	77,9	62,18	842679,713	0,00084268	479	568,424
Pinus Pinaster	PP13	173,3 65	77,8	68,02	917439,952	0,00091744	526,5	573,879
Pinus Pinaster	PP14	175,0 2	79,19	76	1053347,37	0,00105335	607,5	576,732
Pinus Pinaster	PP15	175,1 5	77,73	68,53	932995,483	0,000933	573,5	614,686
Pinus Halepensis	PH1	175,8	86,56	61,35	933578,165	0,93357816	539	577,348
Pinus Halepensis	PH2	172,9 1	83,87	62,33	903907,273	0,90390727	636	703,611
Pinus Halepensis	PH3	173,5	81,44	61,92	874919,693	0,87491969	505	577,195

Pinus Halepensis	PH4	175,3	79,31	66,98	931225,82	0,93122582	540	579,880
Pinus Halepensis	PH5	171,7	80,23	61	840304,951	0,84030495	578,5	688,440
Pinus Halepensis	PH6	173,1 1	77,06	62,76	837209,4	0,8372094	537	641,416
Pinus Halepensis	PH7	175,7 8	79,46	71,12	993367,092	0,99336709	560	563,739
Pinus Halepensis	PH8	172,9 2	80,1	64,5	893382,534	0,89338253	520,5	582,617
Pinus Halepensis	PH9	175,2 2	78,25	62	850079,83	0,85007983	473	556,418
Pinus Halepensis	PH10	177,4 1	79,72	68,29	965834,02	0,96583402	435,5	450,905
Pinus Halepensis	PH11	176,8 5	84,51	56,75	848162,431	0,84816243	412,5	486,345
Pinus Halepensis	PH12	175,8	80,9	65,6	932977,632	0,93297763	553,5	593,261
Pinus Halepensis	PH13	175,1 3	78,19	69,36	949775,244	0,94977524	528,5	556,447
Pinus Halepensis	PH14	176,1 5	83,07	75,93	1111067,02	1,11106702	613,5	552,171
Pinus Halepensis	PH15	175,6 3	78,38	71,76	987839,506	0,98783951	621	628,644
Pinus Halepensis	PH16	175,1	76,22	73,03	974667,29	0,97466729	543,5	557,626

2.2.- DENSIDAD VIGAS

Especie	Código	h (mm)	b (mm)	l (mm)	Volumen (m ³)	Peso (Kg)	Densidad viga (kg/m ³)	Densidad real (kg/m ³)
Pinus Sylvestris	PS 1	176,00	79,00	4173,00	0,0580	30,650	528,25	522,5976003

TABLAS DE RESULTADOS

Pinus Sylvestris	PS 2	173,00	80,00	4182,00	0,0579	30,200	521,78	508,6335913
Pinus Sylvestris	PS 3	174,00	77,00	4209,00	0,0564	27,200	482,34	466,885479
Pinus Sylvestris	PS 4	175,00	80,00	4230,00	0,0592	26,200	442,42	433,3006334
Pinus Sylvestris	PS 5	175,00	80,00	4204,00	0,0589	27,400	465,54	456,1532426
Pinus Sylvestris	PS 6	173,00	78,00	4030,00	0,0544	28,550	525,00	510,9600622
Pinus Sylvestris	PS 7	176,00	79,00	4249,00	0,0591	29,050	491,72	497,2321587
Pinus Sylvestris	PS 8	175,00	79,00	4236,00	0,0586	34,950	596,80	591,2239271
Pinus Sylvestris	PS 9	173,00	77,00	4078,00	0,0543	32,315	594,87	573,8585563
Pinus Sylvestris	PS 10	175,00	77,00	4238,00	0,0571	34,483	603,83	594,2674301
Pinus Sylvestris	PS 11	175,00	78,00	4330,00	0,0591	31,990	541,24	529,1485255
Pinus Sylvestris	PS 12	172,00	78,00	4201,00	0,0564	30,093	533,94	531,2235206
Pinus Sylvestris	PS 13	174,00	76,00	4234,00	0,0560	29,685	530,18	529,0054334
Pinus Sylvestris	PS 14	175,00	78,00	4144,00	0,0566	29,928	529,08	520,3781675
Pinus Sylvestris	PS 15	176,00	78,00	4037,00	0,0554	30,685	553,68	542,5588562
Pinus Nigra	PN 1	174	76	4057	0,05364977	31,769	592,1554032	564,7351704
Pinus Nigra	PN 2	176	79	4096	0,05695078	32,279	566,7876319	573,4365929
Pinus Nigra	PN 3	174	79	4082	0,05611117	34,292	611,1438913	601,089362

TABLAS DE RESULTADOS

Pinus Nigra	PN 4	175	79	4051	0,05600508	33,455	597,3565788	598,6125654
Pinus Nigra	PN 5	175	79	4048	0,0559636	32,731	584,8623034	584,8625149
Pinus Nigra	PN 6	175	80	4077	0,057078	28,801	504,5902099	491,7326651
Pinus Nigra	PN 7	177	75	4141	0,05497178	31,924	580,734386	562,1754724
Pinus Nigra	PN 8	175	79	4062	0,05615715	33,846	602,701526	606,8861741
Pinus Nigra	PN 9	176	78	4081	0,05602397	35,248	629,1592913	626,1804276
Pinus Nigra	PN 10	177	78	4088	0,05643893	31,047	550,099038	553,6336153
Pinus Nigra	PN 11	176	78	4089	0,05613379	31,425	559,8232166	548,382495
Pinus Nigra	PN 12	174	79	4065	0,05587749	33,703	603,1588033	594,285097
Pinus Nigra	PN 13	175	78	4076	0,0556374	34,703	623,7351134	605,4327957
Pinus Nigra	PN 14	176	77	4073	0,0551973	29,391	532,4717356	513,3169529
Pinus Nigra	PN 15	176	78	4074	0,05592787	32,986	589,7953707	576,7387581
Pinus Pinaster	PP1	180	77	4000	0,05544	26,855	484,3975469	479,0903629
Pinus Pinaster	PP2	178	79	4000	0,056248	25,084	445,9536339	441,9546702
Pinus Pinaster	PP3	179	76	4000	0,054416	24,822	456,1526022	455,895901
Pinus Pinaster	PP4	179	80	3970	0,0568504	29,137	512,5205803	513,4125989
Pinus Pinaster	PP5	178	77	3957	0,05423464	30,207	556,968736	551,1147044

TABLAS DE RESULTADOS

Pinus Pinaster	PP6	179	78	3946	0,05509405	28,163	511,1804084	512,0011137
Pinus Pinaster	PP7	178	77	3980	0,05454988	28,403	520,6794222	513,9713091
Pinus Pinaster	PP8	179	77	3980	0,05485634	30,287	552,1148513	545,7393893
Pinus Pinaster	PP9	177	76	4050	0,0544806	36,469	669,3942431	693,7617264
Pinus Pinaster	PP10	176	78	3943	0,0541295	27,752	512,6963661	503,7600561
Pinus Pinaster	PP11	176	79	3997	0,05557429	29,228	525,9266659	531,4967164
Pinus Pinaster	PP12	176	77	3992	0,05409958	31,696	585,8825088	585,871139
Pinus Pinaster	PP13	175	77	3987	0,05372483	31,346	583,4546692	582,901097
Pinus Pinaster	PP14	175	77	4000	0,0539	33,117	614,4155844	597,3556479
Pinus Pinaster	PP15	176	78	4000	0,054912	30,241	550,7175117	555,3123696
Pinus Halepensis	PH1	178	86	4037	0,0617984	36,693	593,7532748	597,2942762
Pinus Halepensis	PH2	173	88	4004	0,0609569	37,522	582,7396461	646,1973259
Pinus Halepensis	PH3	175	79	4004	0,0553553	34,796	628,5938293	615,0324201
Pinus Halepensis	PH4	178	76	4033	0,05455842	34,45	631,4331954	614,3999027
Pinus Halepensis	PH5	174	78	3994	0,05420657	34,282	632,4325864	623,0903176
Pinus Halepensis	PH6	173	73	4009	0,05062966	33,672	665,064694	629,6246108
Pinus Halepensis	PH7	174	75	3988	0,0520434	34,453	662,0051726	618,5201801

Pinus Halepensis	PH8	175	77	4000	0,0539	34,085	632,3747681	615,2130852
Pinus Halepensis	PH9	173	77	4007	0,05337725	34,665	649,4340182	630,9629232
Pinus Halepensis	PH10	177	77	4034	0,05497939	35,949	653,8632498	630,0942758
Pinus Halepensis	PH11	174	79	4040	0,05553384	37,033	666,8546601	613,3302206
Pinus Halepensis	PH12	172	77	4025	0,0533071	35,934	674,09407	627,7291353
Pinus Halepensis	PH13	175	77	4045	0,05450638	32,139	589,6374507	580,2325294
Pinus Halepensis	PH14	175	79	4042	0,05588065	32,88	588,396878	555,9153189
Pinus Halepensis	PH15	171	77	4039	0,05318151	34,646	651,4669863	623,1251603
Pinus Halepensis	PH16	180	78	4028	0,05655312	36,314	642,1219554	675,506507

3.- MEDICIÓN DE NUDOS

3.1.- NUDOS ESPECIE PINUS SYLVESTRIS

VIGA	CARA/ CANTO	TERCIO	DIMENSIONES (mm)								N° Nudos	Suma diámetros (mm)
Viga 1	Canto A	1	30	18	17						3	65
		2	13	17							2	30
		3										0
	Cara B	1	22+17	12+15+20							5	86
		2	27								1	27
		3	24	21	15	25					4	85
	Canto C	1	42	32	15	13	14				5	116
		2	27	15							2	42
		3	14	20	15						3	49
	Cara D	1										0
		2										0
		3										0
Viga 2	Canto A	1										0
		2	21							1	21	
		3										0
	Cara B	1	17	31	27	25					4	100
		2	20	28	24	24	17+32				6	145
		3	23	28	30	18	31				5	130
	Canto C	1										0
		2	31	12	23						3	66
		3	35								1	35
	Cara D	1										0
2											0	
3											0	
Viga 3	Canto A	1	18								1	18
		2	17								1	17
		3										0
	Cara B	1	19+13	25	31	15+32	13				7	148
		2	21+44	13	15+22	20	21				7	156
		3	35	20	20	18	21+20	43+22			8	199
	Canto C	1	16+18	19	43						4	96
		2	14	26	32	30					4	102
		3	36	16+34							3	86

TABLAS DE RESULTADOS

	Cara D	1	50 (3nudos)	14	13					5	77	
		2	15+22	13	47					4	97	
		3	20	13	15	27+14	14+24			7	127	
Viga 4	Canto A	1	14							1	14	
		2									0	
		3										0
	Cara B	1	24	12	23	30	17				5	106
		2	12	17+15	13	13					5	70
		3	14								1	14
	Canto C	1	22	32	20						3	74
		2										0
		3										0
	Cara D	1										0
		2										0
		3										0
Viga 5	Canto A	1	22	35						2	57	
		2	39	37	25	31					4	132
		3	21	40							2	61
	Cara B	1	34	46+20	36						4	136
		2	16	43	38						3	97
		3	105(3 nudos)	27							4	132
	Canto C	1	15	27							2	42
		2										0
		3										0
	Cara D	1										0
		2										0
		3										0
Viga 6	Canto A	1									0	
		2	15							1	15	
		3	29	12	18					3	59	
	Cara B	1										0
		2										0
		3										0
	Canto C	1										0
		2										0
		3	12								1	12
	Cara D	1										0
		2	15	12							2	27
		3		13+18	15+23	14					5	83
	Canto A	1									0	

TABLAS DE RESULTADOS

Viga 7		2										0	
		3										0	
		Cara B	1										0
			2										0
			3										0
			Canto C	1									
			2										0
			3										0
			Cara D	1									
		2										0	
		3										0	
		Viga 8	Canto A	1									0
		2	12							1		12	
		3	13	15	11					3		39	
		Cara B	1	25	27	38	23				4		113
		2	31	31+29	24	21				5		136	
		3	20	17	24	12+19				5		92	
		Canto C	1	30							1		30
		2	16							1		16	
		3	12							1		12	
		Cara D	1										0
		2										0	
		3										0	
		Viga 9	Canto A	1	17							1	
		2	14								1		14
		3											0
		Cara B	1										0
		2										0	
		3										0	
		Canto C	1										0
		2										0	
		3										0	
		Cara D	1	13								1	
		2	11	14	16	11					4		52
		3											0
		Viga 10	Canto A	1	21							1	
		2	23								1		23
		3											0
		Cara B	1	18	30	20	32+13					5	
		2	16	15	18	23+11	19				6		102
		3	15	15	21	16	18				5		85

TABLAS DE RESULTADOS

	Canto C	1	22	17						2	39	
		2									0	
		3	16	15						2	31	
	Cara D	1									0	
		2									0	
		3									0	
Viga 11	Canto A	1	14							1	14	
		2	15							1	15	
		3									0	
	Cara B	1	13								1	13
		2										0
		3										0
	Canto C	1	14								1	14
		2										0
		3										0
	Cara D	1										0
		2										0
		3										0
Viga 12	Canto A	1	13							1	13	
		2	24							1	24	
		3	13+24							2	37	
	Cara B	1	13	15	20					3	48	
		2	13	12	19	18				4	62	
		3	15	13	16	27				4	71	
	Canto C	1										0
		2										0
		3										0
	Cara D	1										0
		2										0
		3										0
Viga 13	Canto A	1									0	
		2									0	
		3	14							1	14	
	Cara B	1										0
		2										0
		3										0
	Canto C	1	12								1	12
		2	11	12	13	13	15	13			6	77
		3	14	14							2	28
	Cara D	1	11	18+13	31(2nudos)	15					6	88
		2	20+19	13	18	26+24	22				7	142
		3	18	22+12	15	23					5	90

TABLAS DE RESULTADOS

Viga 14	Canto A	1										0	
		2										0	
		3										0	
	Cara B	1											0
		2											0
		3											0
	Canto C	28											0
		2											0
		3											0
Cara D	1											0	
	2											0	
	3											0	
Viga 15	Canto A	1	27								1	27	
		2	20	12							2	32	
		3										0	
	Cara B	1	17	14								2	31
		2	13	28	14							3	55
		3											0
	Canto C	1											0
		2											0
		3											0
	Cara D	1											0
		2											0
													0

3.2.- NUDOS ESPECIE PINUS PINASTER

VIGA	CARA/ CANTO	TERCIO	DIMENSIONES (mm)							Nº Nudos	Suma diámetros (mm)
Viga 1	Canto A	1	20	15						2	35
		2									0
		3									0
	Cara B	1	19	23						2	42
		2	18	23	13					3	54
		3	20	22	20	19				4	81
	Canto C	1	25	24						2	49
		2	35							1	35
		3	19							1	19
	Cara D	1	14	22	22	18	15			5	91
		2	15	14	30	15				4	74
		3									0

TABLAS DE RESULTADOS

Viga 2	Canto A	1	65	29	16					3	110	
		2	18							1	18	
		3									0	
	Cara B	1	47	28	22	17						114
		2	25	18	23	14				4		80
		3	20	19						2		39
	Canto C	1	34	22	28					3		84
		2										0
		3										0
	Cara D	1	16							1		16
		2	38	27						2		65
		3										0
Viga 3	Canto A	1	32							1	32	
		2	42	28	13					3	83	
		3	21							1	21	
	Cara B	1	31	35	32					3		98
		2	14	25	15	17				4		71
		3										0
	Canto C	1										0
		2	25							1		25
		3										0
	Cara D	1	17	24	34	16	15			5		106
		2	23	15						2		38
		3										0
Viga 4	Canto A	1									0	
		2									0	
		3									0	
	Cara B	1										0
		2										0
		3										0
	Canto C	1										0
		2										0
		3										0
	Cara D	1										0
		2	13	15	19	17	15			5		79
		3	14	17	18					3		49
Viga 5	Canto A	1									0	
		2									0	
		3									0	
	Cara B	1									0	
		2	22							1		22

TABLAS DE RESULTADOS

		3										0	
	Canto C	1										0	
		2										0	
		3										0	
	Cara D	1	23	27	19						3	69	
		2	32	30	14	17	12	20	25		7	150	
		3	24	23	29						3	76	
Viga 6	Canto A	1	26	15							2	41	
		2	29								1	29	
		3	16								1	16	
	Cara B	1	26	14	15	19					4	74	
		2	25	26	27	13	16				5	107	
		3	21	30	33	17					4	101	
	Canto C	1	16								1	16	
		2	13	15							2	28	
		3	22								1	22	
	Cara D	1	20	31	19						3	70	
		2	32	30	14	15	16	17	20	25	8	169	
		3	13	18	23	25					4	79	
Viga 7	Canto A	1										0	
		2										0	
		3										0	
	Cara B	1											0
		2											0
		3											0
	Canto C	1											0
		2											0
		3											0
	Cara D	1	16	15							2	31	
		2	15								1	15	
		3	12								1	12	
Viga 8	Canto A	1										0	
		2										0	
		3	14								1	14	
	Cara B	1	15	15	20						3	50	
		2	17	16	17	18					4	68	
		3										0	
	Canto C	1											0
		2											0
		3	17								1	17	
	Cara D	1										0	

TABLAS DE RESULTADOS

		2	16	19	16	15	15	34			6	115	
		3	13	<u>17</u>	19						3	49	
Viga 9	Canto A	1										0	
		2										0	
		3	14								1	14	
	Cara B	1	16	17							2	33	
		2	13	12							2	25	
		3	14								1	14	
	Canto C	1											0
		2	18	12							2	30	
		3	19								1	19	
	Cara D	1	15								1	15	
		2	12								1	12	
		3										0	
Viga 10	Canto A	1										0	
		2										0	
		3										0	
	Cara B	1	19	15	15	26	18				5	93	
		2	24	20	21	12	14				5	91	
		3	22	26	15	18	15				5	96	
	Canto C	1											0
		2											0
		3											0
	Cara D	1											0
		2											0
		3											0
Viga 11	Canto A	1										0	
		2										0	
		3										0	
	Cara B	1											0
		2											0
		3											0
	Canto C	1											0
		2											0
		3											0
	Cara D	1	14	21							2	35	
		2	21	22							2	43	
		3	22	19	15	15					4	71	
Viga 12	Canto A	1										0	
		2										0	
		3										0	

TABLAS DE RESULTADOS

	Cara B	1									0
		2									0
		3									0
	Canto C	1									0
		2									0
		3									0
	Cara D	1									0
		2									0
		3	17							1	17
Viga 13	Canto A	1									0
		2									0
		3									0
	Cara B	1									0
		2									0
		3									0
	Canto C	1									0
		2									0
		3									0
Cara D	1									0	
	2									0	
	3									0	
Viga 14	Canto A	1									0
		2									0
		3									0
	Cara B	1	14	15	15					3	44
		2	14	14	27	21	21			5	97
		3	16	17	12					3	45
	Canto C	1									0
		2									0
		3									0
Cara D	1									0	
	2									0	
	3									0	
Viga 15	Canto A	1	11							1	11
		2									0
		3									0
	Cara B	1									0
		2	15	14	21	22	19			5	91
		3	19	22	13	15	19	17		6	105
Canto C	1									0	
	2	16	11						2	27	

TABLAS DE RESULTADOS

		3	26	14						2	40
	Cara D	1	14	13	13					3	40
		2	12	22						2	34
		3	23	16	16	14	12			5	81

3.3.- NUDOS ESPECIE PINUS NIGRA

VIGA	CARA/ CANTO	TERCIO	DIMENSIONES NUDOS (mm)							Nº Nudos	Suma diámetros (mm)
Viga 1	Canto A	1	21	31	18					3	70
		2	27							1	27
		3	20	15						2	35
	Cara B	1	43	28	52					3	123
		2	34	56+16	16+23					5	145
		3	13	65						2	78
	Canto C	1	47							1	47
		2	50	15	15	47				4	127
		3	64	80						2	144
	Cara D	1									0
		2									0
		3									0
Viga 2	Canto A	1	20	12	23					3	55
		2									0
		3									0
	Cara B	1									0
		2									0
		3									0
	Canto C	1	20	30	22	40				4	112
		2									0
		3									0
	Cara D	1	22	26						2	48
		2	31	43	28					3	102
		3	17	42	13					3	72
Viga 3	Canto A	1	22	40+29						3	91
		2	11							1	11
		3	24	44						2	68
	Cara B	1									0
		2									0
		3									0

TABLAS DE RESULTADOS

	Canto C	1	40							1	40	
		2	44							1	44	
		3	37+11+12	31	30					5	121	
	Cara D	1	48							1	48	
		2	30+20	26	44(4 nudos)					7	120	
		3	14	46	23	18				4	101	
	Viga 4	Canto A	1	51+20							2	71
			2	18	31	41					3	90
			3	17	23	40	44				4	124
Cara B		1									0	
		2									0	
		3									0	
Canto C		1	16	27	12					3	55	
		2	41	47						2	88	
		3	16	19	11					3	46	
Cara D		1	52+39	45	19	46	40+31			7	272	
		2	40	32	28	20	16	46+24	30+27	9	263	
		3	14+25	37+17+28	45+22	53+22				9	263	
Viga 5		Canto A	1	25	36						2	61
			2	37	70						2	107
			3	65	18						2	83
	Cara B	1	65+33							2	98	
		2	15	25	38					3	78	
		3	15	13	17					3	45	
	Canto C	1	21	12						2	33	
		2									0	
		3	80							1	80	
	Cara D	1									0	
		2									0	
		3									0	
	Viga 6	Canto A	1	30	15						2	45
			2	21							1	21
			3									0
Cara B		1									0	
		2									0	
		3									0	
Canto C		1	15							1	15	
		2	15	31						2	46	
		3	28							1	28	

TABLAS DE RESULTADOS

	Cara D	1	21	27	31	24				4	103	
		2	34	35+24	29					4	122	
		3	23	15	21	20				4	79	
Viga 7	Canto A	1	29							1	29	
		2	17	70	25					3	112	
		3	22	23						2	45	
	Cara B	1										0
		2										0
		3										0
	Canto C	1	38	12							2	50
		2	12	13	42	50					4	117
		3	35	35							2	70
	Cara D	1	23	37	40	20	51	60			6	231
		2	42	38+28	33+20						5	161
		3	14	55	35	58					4	162
Viga 8	Canto A	1	26	47						2	73	
		2	31	22	36					3	89	
		3	24	22+22						3	68	
	Cara B	1										0
		2										0
		3										0
	Canto C	1	24								1	24
		2										0
		3	15								1	15
	Cara D	1	23	28	34	12+27					5	124
		2	39	45	27	37	32	33			6	213
		3	31+16	16+16	20+23	15					7	137
Viga 9	Canto A	1	54	43						2	97	
		2	45	44	20	62				4	171	
		3	48							1	48	
	Cara B	1										0
		2										0
		3										0
	Canto C	1										0
		2	52	13							2	65
		3	12								1	12
	Cara D	1	44	42	55	55	55+15				6	266
		2	12+40	38	20+36	50	13				7	209
		3	55	57+14	13						4	139

TABLAS DE RESULTADOS

Viga 10	Canto A	1	35						1	35
		2	60	47	61				3	168
		3	17	32	47				3	96
	Cara B	1	42	30	46				3	118
		2	51	37	15	43	50		5	196
		3	43	34	28	30			4	135
	Canto C	1								0
		2	22						1	22
		3	23						1	23
	Cara D	1								0
		2								0
		3								0
Viga 11	Canto A	1	20	33	30	14			4	97
		2	24	23	17	32			4	96
		3	13	28					2	41
	Cara B	1	36	38					2	74
		2	34	30	28				3	92
		3	26	36+15	50	24	36		6	187
	Canto C	1	31	35	38				3	104
		2								0
		3	25	30					2	55
	Cara D	1								0
		2								0
		3								0
Viga 12	Canto A	1	45	25					2	70
		2	50	46	14+18	42			5	170
		3	43						1	43
	Cara B	1	70	42	54				3	166
		2	42	34	36	34			4	146
		3	40	42+38	14				4	134
	Canto C	1	14	25	18				3	57
		2	56						1	56
		3	47						1	47
	Cara D	1								0
		2								0
		3								0
Viga 13	Canto A	1	35						1	35
		2	40	12+20					3	72
		3	11+15+12	29					4	67

TABLAS DE RESULTADOS

	Cara B	1	17	33+12+21	26	45+44				7	198
		2	28+26	50	34	27	50	53	24+30	9	322
		3	65	68	35+50	15				5	233
	Canto C	1	50							1	50
		2	18	17	41					3	76
		3	23+20	26						3	69
	Cara D	1									0
		2									0
		3									0
Viga 14	Canto A	1	25	24						2	49
		2	28	14	14					3	56
		3	23	19	14	24				4	80
	Cara B	1	12	23	27	15	21			5	98
		2	26+12	14	24	20	25+20			7	141
		3	27	20	20	22				4	89
	Canto C	1	25	17	28					3	70
		2	15							1	15
		3	17	16	18	17				4	68
	Cara D	1									0
		2									0
		3									0
Viga 15	Canto A	1	22							1	22
		2	14	14						2	28
		3	12	14						2	26
	Cara B	1									0
		2									0
		3									0
	Canto C	1									0
		2									0
		3									0
	Cara D	1	25	13	16	16				4	70
		2	17	15	24	13				4	69
		3									0

3.4.- NUDOS ESPECIE PINUS HALEPENSIS

VIGA	CARA/ CANTO	TERCIO	DIMENSIONES NUDOS (mm)	Nº Nudos	Suma diámetros (mm)
------	----------------	--------	------------------------	-------------	---------------------------

TABLAS DE RESULTADOS

Viga 1	Canto A	1	15	21	45						3	81
		2	56	27							2	83
		3	24								1	24
	Cara B	1	22	26							2	48
		2	15	40	36	14					4	105
		3	45	23	20						3	88
	Canto C	1	37	42	22							101
		2	30									30
		3										0
	Cara D	1	23								1	23
		2	40	50							2	90
		3	14	26	27						3	67
Viga 2	Canto A	1	16	42								58
		2	80	45								125
		3										0
	Cara B	1	32	25	17	15	22	50	24	44	8	229
		2	39	43	28						3	110
		3	24	27	18						3	69
	Canto C	1	44									44
		2										0
		3	37								1	37
	Cara D	1	57	28	15						3	100
		2	30									30
		3										0
Viga 3	Canto A	1	38	16							2	54
		2										0
		3	15	13							2	28
	Cara B	1	17	24							2	41
		2	50	32	23						3	105
		3	18	44	27	31	41	23			6	184
	Canto C	1	51								1	51
		2	12	30	40						3	82
		3										0

TABLAS DE RESULTADOS

	Cara D	1	62	26	36						3	124	
		2	55									55	
		3										0	
Viga 4	Canto A	1	56								1	56	
		2	33								1	33	
		3										0	
	Cara B	1											0
		2	55	13	45	57	42					5	212
		3	46	32								2	78
	Canto C	1	45									1	45
		2	23	48	17	13	45					5	146
		3	45									1	45
	Cara D	1	45	49								2	94
		2	50	26								2	76
		3	31									1	31
Viga 5	Canto A	1	27									27	
		2										0	
		3										0	
	Cara B	1	39	12	35	34	36					5	156
		2	25	27	20	16	12	14				6	114
		3	23	20	27	24	23	45				6	162
	Canto C	1	32									1	32
		2	21	27	23	35						4	106
		3											0
	Cara D	1	40	13	36	38						4	127
		2	60									1	60
		3											0
Viga 6	Canto A	1										0	
		2	47								1	47	
		3										0	
	Cara B	1	33	12	33							3	78
		2	50	37								2	87
		3											0

TABLAS DE RESULTADOS

	Canto C	1										0
		2										0
		3										0
	Cara D	1	32								1	32
		2										0
		3										0
Viga 7	Canto A	1	47								1	47
		2	18								1	18
		3	31	46							2	77
	Cara B	1	46	30	36	14	20	28			3	174
		2	40	12	14	36	37	27	24		7	190
		3	42	30	20	32					4	124
	Canto C	1										0
		2	21	25	20						3	66
		3										0
	Cara D	1	38	21	20	15	30	25	27		7	176
		2	35	50	40	30	32				5	187
		3										0
Viga 8	Canto A	1	62								1	62
		2	25	57							2	82
		3										0
	Cara B	1	25	27	25	45					4	122
		2	32	41	60	42	21				5	196
		3	31	32	25	23					4	111
	Canto C	1	53									53
		2										0
		3										0
	Cara D	1	32	45	60						3	137
		2										0
		3										0
Viga 9	Canto A	1	38								1	38
		2	28								1	28
		3	42	30							2	72

TABLAS DE RESULTADOS

	Cara B	1	20	18	12	14					4	64
		2	12	27	45	40					4	124
		3	38	25	56	56	15	45	30		7	265
	Canto C	1	20	25							2	45
		2	18	16	22	25					4	81
		3	36	16							2	52
	Cara D	1	23	42	32	18	15	45			6	175
		2	15	25	30						3	70
		3	42	18							2	60
Viga 10	Canto A	1										0
		2	15	20							2	35
		3	20	30	48						3	98
	Cara B	1	22								1	22
		2	28	47	13						3	88
		3	35	37							2	72
	Canto C	1	63								1	63
		2	32	27	42	45	32				5	178
		3										0
Cara D	1	20	25	37						3	82	
	2	12	41	32	16					4	101	
	3	18	47	20						3	85	
Viga 11	Canto A	1	27	26	21						3	74
		2										0
		3										0
	Cara B	1	18	22	24	20					4	84
		2	27	20	29	13	18				5	107
		3	43	25	40	26					4	134
	Canto C	1										0
		2	34								1	34
		3										0
Cara D	1	26	16	29	30					4	101	
	2	13	18	80	42	44	19			6	216	
	3										0	

Viga 12	Canto A	1	17								1	17	
		2	19	17							2	36	
		3	16	44							2	60	
	Cara B	1											0
		2	44								1	44	
		3	22	34	15	35					4	106	
	Canto C	1											0
		2	24								1	24	
		3	26								1	26	
	Cara D	1	24								1	24	
		2	20	22	19						3	61	
		3											0
Viga 13	Canto A	1	22	52							2	74	
		2	27	45							2	72	
		3	25	45	75						3	145	
	Cara B	1	50								1	50	
		2	47								1	47	
		3											0
	Canto C	1											0
		2	70								1	70	
		3	21								1	21	
	Cara D	1	55								1	55	
		2											0
		3											0
Viga 14	Canto A	1	20								1	20	
		2										0	
		3	16								1	16	
	Cara B	1	22										22
		2	16	40									56
		3	42+40(2nudos)	25	15	35	55	15			7	227	
	Canto C	1											0
		2	57								1	57	
		3	18								1	18	

TABLAS DE RESULTADOS

	Cara D	1	53	24						2	77	
		2									0	
		3									0	
Viga 15	Canto A	1									0	
		2	32							1	32	
		3	13							1	13	
	Cara B	1	25	27	18	30	15				5	115
		2	30	35	48	22					4	135
		3										0
	Canto C	1										0
		2	47	30							2	77
		3	40								1	40
	Cara D	1										0
		2	32								1	32
		3	26	38							2	64
Viga 16	Canto A	1	20							1	20	
		2	20	18	26	34				4	98	
		3	21+27(2 nudos)								2	48
	Cara B	1	36								1	36
		2										0
		3										0
	Canto C	1										0
		2										0
		3										0
	Cara D	1	30	24	23						3	77
		2	19								1	19
		3										0

4.- INDICES CKDR

Especie	Viga	Nº nudos total	Nº nudos zona central	CKDR viga completa	CKDR zona central	Suma total diámetros (mm)	Suma total diámetros en zona central (mm)
Pinus Sylvestris	1	25	5	0,01779	0,00352	500,00	99
Pinus Sylvestris	2	20	10	0,01750	0,00817	497,00	232
Pinus Sylvestris	3	51	16	0,04057	0,01344	1123,00	372
Pinus Sylvestris	4	15	5	0,00972	0,00245	278,00	70
Pinus Sylvestris	5	21	7	0,02299	0,00801	657,00	229
Pinus Sylvestris	6	12	3	0,00707	0,00151	196,00	42
Pinus Sylvestris	7	0	0	0,00000	0,00000	0,00	0
Pinus Sylvestris	8	21	7	0,01612	0,00588	450,00	164
Pinus Sylvestris	9	7	5	0,00348	0,00239	96,00	66
Pinus Sylvestris	10	22	7	0,01512	0,00456	414,00	125
Pinus Sylvestris	11	4	1	0,00201	0,00054	56,00	15
Pinus Sylvestris	12	15	5	0,00946	0,00319	255,00	86
Pinus Sylvestris	13	28	13	0,01701	0,00826	451,00	219
Pinus Sylvestris	14	0	0	0,00000	0,00000	0,00	0
Pinus Sylvestris	15	8	5	0,00518	0,00311	145,00	87
Pinus Pinaster	1	24	8	0,01713	0,00582	480	163
Pinus Pinaster	2	16	7	0,01854	0,00574	526	163
Pinus Pinaster	3	19	1	0,01741	0,00797	474	217
Pinus Pinaster	4	8	5	0,00448	0,00276	128	79
Pinus Pinaster	5	14	8	0,01144	0,00621	317	172
Pinus Pinaster	6	36	16	0,02697	0,01194	752	333

TABLAS DE RESULTADOS

Pinus Pinaster	7	4	1	0,00209	0,00054	58	15
Pinus Pinaster	8	18	10	0,01122	0,00656	313	183
Pinus Pinaster	9	11	5	0,00624	0,00258	162	67
Pinus Pinaster	10	15	5	0,01002	0,00326	280	91
Pinus Pinaster	11	8	2	0,00541	0,00156	149	43
Pinus Pinaster	12	1	0	0,00063	0,00000	17	0
Pinus Pinaster	13	0	0	0,00000	0,00000	0	0
Pinus Pinaster	14	11	5	0,00671	0,00350	186	97
Pinus Pinaster	15	26	9	0,01576	0,00558	429	152
Pinus Nigra	1	23	10	0,02870	0,01078	796	299
Pinus Nigra	2	15	3	0,01415	0,00371	389	102
Pinus Nigra	3	24	11	0,02304	0,00626	644	175
Pinus Nigra	4	42	14	0,04610	0,01598	1272	441
Pinus Nigra	5	17	5	0,02116	0,00669	585	185
Pinus Nigra	6	19	7	0,01598	0,00658	459	189
Pinus Nigra	7	29	12	0,03562	0,01422	977	390
Pinus Nigra	8	28	9	0,02706	0,01100	743	302
Pinus Nigra	9	27	13	0,03650	0,01613	1007	445
Pinus Nigra	10	21	9	0,02890	0,01407	793	386
Pinus Nigra	11	26	7	0,02662	0,00671	746	188
Pinus Nigra	12	24	10	0,03186	0,01333	889	372
Pinus Nigra	13	36	15	0,03989	0,01671	1122	470
Pinus Nigra	14	33	11	0,02369	0,00754	666	212
Pinus Nigra	15	13	6	0,00766	0,00345	215	97
Pinus Halepensis	1	21	8	0,02431	0,01012	740	308

TABLAS DE RESULTADOS

Pinus Halepensis	2	18	3	0,02765	0,00914	802	265
Pinus Halepensis	3	22	6	0,02562	0,00856	724	242
Pinus Halepensis	4	21	13	0,02935	0,01679	816	467
Pinus Halepensis	5	27	11	0,02846	0,01016	784	280
Pinus Halepensis	6	7	3	0,00915	0,00502	244	134
Pinus Halepensis	7	33	16	0,03791	0,01650	1059	461
Pinus Halepensis	8	19	7	0,02754	0,01004	763	278
Pinus Halepensis	9	38	12	0,03917	0,01105	1074	303
Pinus Halepensis	10	27	14	0,02913	0,01421	824	402
Pinus Halepensis	11	27	12	0,02509	0,01194	750	357
Pinus Halepensis	12	16	7	0,01399	0,00580	398	165
Pinus Halepensis	13	12	4	0,01950	0,00690	534	189
Pinus Halepensis	14	13	1	0,01685	0,00386	493	113
Pinus Halepensis	15	17	8	0,01845	0,01002	508	276
Pinus Halepensis	16	12	5	0,01116	0,00438	298	117

5.- ULTRASONIDOS

N° Viga	N° sylvatest	Tipo	Distancia (cm)	Tiempo (µs)	Pico (mV)	Velocidad (m/s)	Nuevo MOE (N/mm ²)	Nuevo MOR (N/mm ²)
PS 1	1	DIRECTO	411	856	901	4797	12025,603	30,021386
PS 1	2	DIRECTO	411	851	927	4825	12166,399	30,578939
PS 1	3	CANTO A IND	411	890	67	4617	11140,051	26,5146
PS 1	4	CARA B IND	411	873	110	4708	11583,514	28,270715
PS 1	5	CANTO C IND	411	877	124	4686	11475,51	27,843018
PS 1	6	CARA D IND	411	877	169	4686	11475,51	27,843018
PS 1	7	CARA DB CRUZADO	411	864	186	4757	11825,887	29,230511
PS 1	8	CARA BD CRUZADO	411	881	123	4660	11348,52	27,340141
PS 1	9	CANTO AC CRUZADO	413	892	135	4627	11188,359	26,705903
PS 1	10	CANTO CA CRUZADO	413	857	124	4816	12121,053	30,399372
PS 2	1	DIRECTO	412	845	934	4874	12083,037	30,248825
PS 2	2	DIRECTO	412	849	932	4850	11964,334	29,778761
PS 2	3	CANTO A IND	412	855	92	4813	11782,481	29,058626
PS 2	4	CARA B IND	412	868	91	4746	11456,725	27,768633
PS 2	5	CANTO C IND	412	877	64	4693	11202,273	26,761001
PS 2	6	CARA D IND	412	867	134	4750	11476,045	27,84514
PS 2	7	CARA DB CRUZADO	412	868	100	4746	11456,725	27,768633
PS 2	8	CARA BD CRUZADO	412	863	123	4773	11587,451	28,286306
PS 2	9	CANTO AC CRUZADO	414	880	102	4703	11250,064	26,950254
PS 2	10	CANTO CA CRUZADO	414	850	48	4869	12058,258	30,150703
PS 3	1	DIRECTO	415	818	907	5070	12001,245	29,924928
PS 3	2	DIRECTO	415	856	745	4844	10955,158	25,782425
PS 3	3	CANTO A IND	415	841	56	4933	11361,42	27,391221
PS 3	4	CARA B IND	415	871	56	4763	10591,843	24,343698
PS 3	5	CANTO C IND	415	880	72	4714	10375,034	23,485134
PS 3	6	CARA D IND	415	846	125	4904	11228,23	26,86379
PS 3	7	CARA DB CRUZADO	415	867	64	4785	10689,915	24,732063
PS 3	8	CARA BD CRUZADO	415	852	102	4867	11059,438	26,195375
PS 3	9	CANTO AC CRUZADO	417	850	99	4905	11232,809	26,881925

TABLAS DE RESULTADOS

PS 3	10	CANTO CA CRUZADO	417	856	65	4867	11059,438	26,195375
PS 4	1	DIRECTO	417	851	659	4900	10403,548	23,598051
PS 4	2	DIRECTO	417	845	857	4933	10544,149	24,154832
PS 4	3	CANTO A IND	417	859	285	4849	10188,112	22,744922
PS 4	4	CARA B IND	417	858	159	4858	10225,966	22,894825
PS 4	5	CANTO C IND	417	859	99	4853	10204,927	22,811511
PS 4	6	CARA D IND	417	864	188	4821	10070,791	22,280333
PS 4	7	CARA DB CRUZADO	417	856	132	4867	10263,891	23,045007
PS 4	8	CARA BD CRUZADO	417	864	118	4826	10091,691	22,363098
PS 4	9	CANTO AC CRUZADO	419	852	117	4914	10463,082	23,833805
PS 4	10	CANTO CA CRUZADO	419	854	101	4905	10424,791	23,682171
PS 5	1	DIRECTO	414	855	908	4841	10690,079	24,732715
PS 5	2	DIRECTO	414	834	908	4959	11217,575	26,821597
PS 5	3	CANTO A IND	414	891	78	4643	9833,5003	21,340661
PS 5	4	CARA B IND	414	861	139	4805	10531,677	24,105443
PS 5	5	CANTO C IND	414	846	101	4888	10898,661	25,558699
PS 5	6	CARA D IND	414	877	56	4720	10162,364	22,642963
PS 5	7	CARA DB CRUZADO	414	863	122	4796	10492,262	23,949356
PS 5	8	CARA BD CRUZADO	414	866	97	4778	10413,652	23,638062
PS 5	9	CANTO AC CRUZADO	416	864	124	4814	10571,167	24,261822
PS 5	10	CANTO CA CRUZADO	416	874	63	4756	10317,975	23,25918
PS 6	1	DIRECTO	397	809	540	4904	12288,189	31,061228
PS 6	2	DIRECTO	397	797	852	4979	12666,925	32,561024
PS 6	3	CANTO A IND	397	816	115	4860	12068,672	30,191942
PS 6	4	CARA B IND	397	817	175	4855	12043,852	30,093656
PS 6	5	CANTO C IND	397	803	160	4944	12489,466	31,858287
PS 6	6	CARA D IND	397	815	106	4870	12118,389	30,388819
PS 6	7	CARA DB CRUZADO	397	812	122	4884	12188,163	30,665127
PS 6	8	CARA BD CRUZADO	397	819	134	4846	11999,241	29,916994
PS 6	9	CANTO AC CRUZADO	399	794	196	5025	12902,061	33,492161
PS 6	10	CANTO CA CRUZADO	399	822	97	4851	12024,015	30,015099
PS 7	1	DIRECTO	419	875	490	4786	11389,498	27,502414

TABLAS DE RESULTADOS

PS 7	2	DIRECTO	419	889	593	4712	11040,018	26,11847
PS 7	3	CANTO A IND	419	894	59	4686	10918,52	25,63734
PS 7	4	CARA B IND	419	908	82	4610	10567,228	24,246221
PS 7	5	CANTO C IND	419	907	174	4619	10608,528	24,409772
PS 7	6	CARA D IND	419	895	120	4677	10876,62	25,471415
PS 7	7	CARA DB CRUZADO	419	899	84	4660	10797,695	25,158871
PS 7	8	CARA BD CRUZADO	419	899	97	4660	10797,695	25,158871
PS 7	9	CANTO AC CRUZADO	421	881	142	4773	11327,709	27,257727
PS 7	10	CANTO CA CRUZADO	421	908	114	4637	10691,371	24,737829
PS 8	1	DIRECTO	418	828	881	5047	15059,779	42,036727
PS 8	2	DIRECTO	418	798	914	5232	16184,06	46,488877
PS 8	3	CANTO A IND	418	846	89	4935	14398,801	39,41925
PS 8	4	CARA B IND	418	843	76	4954	14509,886	39,859149
PS 8	5	CANTO C IND	418	807	113	5174	15827,228	45,075822
PS 8	6	CARA D IND	418	838	61	4988	14709,736	40,650556
PS 8	7	CARA DB CRUZADO	418	846	83	4935	14398,801	39,41925
PS 8	8	CARA BD CRUZADO	418	829	66	5037	15000,16	41,800635
PS 8	9	CANTO AC CRUZADO	420	821	75	5151	15686,827	44,519834
PS 8	10	CANTO CA CRUZADO	420	837	355	5017	14881,277	41,329857
PS 9	1	DIRECTO	403	798	529	5044	14600,073	40,216288
PS 9	2	DIRECTO	403	788	819	5112	14996,384	41,785681
PS 9	3	CANTO A IND	403	823	94	4894	13744,622	36,828702
PS 9	4	CARA B IND	403	806	105	4998	14334,989	39,166557
PS 9	5	CANTO C IND	403	791	164	5091	14873,427	41,298772
PS 9	6	CARA D IND	403	819	152	4919	13885,404	37,386198
PS 9	7	CARA DB CRUZADO	403	807	148	4988	14277,684	38,939627
PS 9	8	CARA BD CRUZADO	403	820	80	4914	13857,19	37,274472
PS 9	9	CANTO AC CRUZADO	405	785	109	5153	15237,901	42,742088
PS 9	10	CANTO CA CRUZADO	405	826	102	4899	13772,721	36,939974
PS 10	1	DIRECTO	418	893	349	4679	13010,321	33,920872
PS 10	2	DIRECTO	418	888	789	4705	13155,313	34,495039
PS 10	3	CANTO A IND	418	916	51	4559	12351,54	31,312099
PS 10	4	CARA B IND	418	911	78	4587	12503,725	31,91475

TABLAS DE RESULTADOS

PS 10	5	CANTO C IND	418	893	124	4679	13010,321	33,920872
PS 10	6	CARA D IND	418	917	53	4554	12324,462	31,204871
PS 10	7	CARA DB CRUZADO	418	916	53	4563	12373,224	31,397966
PS 10	8	CARA BD CRUZADO	418	916	64	4563	12373,224	31,397966
PS 10	9	CANTO AC CRUZADO	420	912	107	4638	12783,313	33,021919
PS 10	10	CANTO CA CRUZADO	420	886	326	4774	13543,994	36,034217
PS 11	1	DIRECTO	427	762	903	5601	16600,025	48,136098
PS 11	2	DIRECTO	427	764	898	5583	16493,501	47,714263
PS 11	3	CANTO A IND	427	768	89	5560	16357,886	47,177228
PS 11	4	CARA B IND	427	773	70	5519	16117,526	46,225403
PS 11	5	CANTO C IND	427	768	85	5560	16357,886	47,177228
PS 11	6	CARA D IND	427	778	108	5484	15913,748	45,418443
PS 11	7	CARA DB CRUZADO	427	776	99	5501	16012,564	45,809754
PS 11	8	CARA BD CRUZADO	427	776	71	5496	15983,469	45,694537
PS 11	9	CANTO AC CRUZADO	429	777	121	5516	16100,008	46,156034
PS 11	10	CANTO CA CRUZADO	429	772	54	5550	16299,097	46,944426
PS 12	1	DIRECTO	414	851	776	4860	12547,287	32,087257
PS 12	2	DIRECTO	414	833	862	4964	13090,036	34,236543
PS 12	3	CANTO A IND	414	449	102	4874	12619,68	32,373933
PS 12	4	CARA B IND	414	850	318	4869	12593,802	32,271454
PS 12	5	CANTO C IND	414	825	316	5018	13376,38	35,370466
PS 12	6	CARA D IND	414	860	254	4809	12285,331	31,049909
PS 12	7	CARA DB CRUZADO	414	855	113	4841	12449,372	31,699515
PS 12	8	CARA BD CRUZADO	414	855	186	4841	12449,372	31,699515
PS 12	9	CANTO AC CRUZADO	416	841	252	4945	12990,022	33,840487
PS 12	10	CANTO CA CRUZADO	416	841	179	4945	12990,022	33,840487
PS 13	1	DIRECTO	417	797	907	5230	14469,833	39,700538
PS 13	2	DIRECTO	417	814	884	5120	13867,56	37,315538
PS 13	3	CANTO A IND	417	804	118	5182	14205,448	38,653576
PS 13	4	CARA B IND	417	835	348	4991	13177,568	34,58317
PS 13	5	CANTO C IND	417	814	264	5120	13867,56	37,315538
PS 13	6	CARA D IND	417	812	301	5130	13921,783	37,530261

TABLAS DE RESULTADOS

PS 13	7	CARA DB CRUZADO	417	828	130	5035	13410,936	35,507306
PS 13	8	CARA BD CRUZADO	417	823	129	5065	13571,224	36,142049
PS 13	9	CANTO AC CRUZADO	419	794	242	5271	14697,591	40,602461
PS 13	10	CANTO CA CRUZADO	419	814	128	5145	14003,316	37,853132
PS 14	1	DIRECTO	408	851	904	4790	11939,609	29,680851
PS 14	2	DIRECTO	408	839	930	4859	12286,067	31,052824
PS 14	3	CANTO A IND	408	857	115	4758	11780,614	29,051233
PS 14	4	CARA B IND	408	865	145	4713	11558,832	28,172974
PS 14	5	CANTO C IND	408	840	240	4854	12260,794	30,952746
PS 14	6	CARA D IND	408	875	234	4660	11300,324	27,149284
PS 14	7	CARA DB CRUZADO	408	859	151	4744	11711,39	28,777103
PS 14	8	CARA BD CRUZADO	408	867	165	4704	11514,728	27,998324
PS 14	9	CANTO AC CRUZADO	410	844	129	4855	12265,847	30,972753
PS 14	10	CANTO CA CRUZADO	410	852	177	4808	12029,511	30,036865
PS 15	1	DIRECTO	398	794	852	5012	13629,157	36,37146
PS 15	2	DIRECTO	398	755	913	5266	15045,567	41,980446
PS 15	3	CANTO A IND	398	817	124	4867	12851,965	33,293783
PS 15	4	CARA B IND	398	786	196	5059	13885,97	37,38844
PS 15	5	CANTO C IND	398	749	239	5311	15303,806	43,003073
PS 15	6	CARA D IND	398	784	284	5075	13973,942	37,736812
PS 15	7	CARA DB CRUZADO	398	788	256	5048	13825,65	37,149573
PS 15	8	CARA BD CRUZADO	398	784	307	5075	13973,942	37,736812
PS 15	9	CANTO AC CRUZADO	400	788	65	5074	13968,436	37,715007
PS 15	10	CANTO CA CRUZADO	400	783	110	5105	14139,64	38,392974
PN 1	1	DIRECTO	400	869	819	4599	11944,601	29,700621
PN 1	2	DIRECTO	400	862	849	4638	12148,043	30,506251
PN 1	3	CANTO A IND	400	863	129	4634	12127,098	30,423309
PN 1	4	CARA B IND	400	886	113	4510	11486,77	27,887609
PN 1	5	CANTO C IND	400	890	198	4490	11385,118	27,485065
PN 1	6	CARA D IND	400	890	142	4490	11385,118	27,485065
PN 1	7	CARA DB CRUZADO	400	877	131	4556	11722,285	28,820248
PN 1	8	CARA BD CRUZADO	400	894	134	4469	11278,869	27,06432

TABLAS DE RESULTADOS

PN 1	9	CANTO AC CRUZADO	402	897	269	4479	11329,401	27,264429
PN 1	10	CANTO CA CRUZADO	402	864	126	4648	12200,484	30,713918
PN 2	1	DIRECTO	404	890	906	4535	11793,426	29,101967
PN 2	2	DIRECTO	404	908	922	4445	11329,975	27,266699
PN 2	3	CANTO A IND	404	909	311	4441	11309,592	27,185986
PN 2	4	CARA B IND	404	929	187	4348	10840,878	25,329879
PN 2	5	CANTO C IND	404	912	269	4425	11228,247	26,863858
PN 2	6	CARA D IND	404	925	81	4367	10935,831	25,70589
PN 2	7	CARA DB CRUZADO	404	926	118	4359	10895,8	25,54737
PN 2	8	CARA BD CRUZADO	404	922	302	4379	10996,014	25,944216
PN 2	9	CANTO AC CRUZADO	406	907	118	4475	11483,426	27,874368
PN 2	10	CANTO CA CRUZADO	406	916	130	4432	11263,799	27,004646
PN 3	1	DIRECTO	402	784	922	5177	16109,994	46,195575
PN 3	2	DIRECTO	402	793	926	5118	15744,889	44,749761
PN 3	3	CANTO A IND	402	810	114	5010	15087,403	42,146116
PN 3	4	CARA B IND	402	833	98	4873	14273,546	38,92324
PN 3	5	CANTO C IND	402	807	159	5025	15177,882	42,504413
PN 3	6	CARA D IND	402	820	303	4950	14728,192	40,723641
PN 3	7	CARA DB CRUZADO	402	815	242	4980	14907,257	41,432736
PN 3	8	CARA BD CRUZADO	402	801	372	5066	15426,571	43,489223
PN 3	9	CANTO AC CRUZADO	404	807	122	5006	15063,321	42,050751
PN 3	10	CANTO CA CRUZADO	404	815	129	4956	14763,918	40,865117
PN 4	1	DIRECTO	399	919	892	4340	11275,227	27,049898
PN 4	2	DIRECTO	399	917	773	4347	11311,628	27,194046
PN 4	3	CANTO A IND	399	939	347	4246	10792,096	25,136701
PN 4	4	CARA B IND	399	936	140	4261	10868,482	25,439189
PN 4	5	CANTO C IND	399	917	169	4347	11311,628	27,194046
PN 4	6	CARA D IND	399	926	149	4305	11094,102	26,332642
PN 4	7	CARA DB CRUZADO	399	946	89	4217	10645,181	24,554915
PN 4	8	CARA BD CRUZADO	399	928	218	4298	11058,053	26,189888
PN 4	9	CANTO AC CRUZADO	401	921	171	4354	11348,088	27,338427
PN 4	10	CANTO CA CRUZADO	401	938	121	4271	10919,556	25,641441

TABLAS DE RESULTADOS

PN 5	1	DIRECTO	399	795	793	5014	14703,558	40,626091
PN 5	2	DIRECTO	399	779	891	5119	15325,832	43,090293
PN 5	3	CANTO A IND	399	811	67	4919	14151,662	38,44058
PN 5	4	CARA B IND	399	787	269	5066	15010,12	41,840074
PN 5	5	CANTO C IND	399	779	185	5119	15325,832	43,090293
PN 5	6	CARA D IND	399	803	115	4964	14411,77	39,470611
PN 5	7	CARA DB CRUZADO	399	799	126	4989	14557,299	40,046903
PN 5	8	CARA BD CRUZADO	399	792	97	5035	14826,981	41,114846
PN 5	9	CANTO AC CRUZADO	401	810	99	4941	14278,53	38,942978
PN 5	10	CANTO CA CRUZADO	401	790	92	5076	15069,437	42,074969
PN 6	1	DIRECTO	402	837	859	4802	11338,964	27,302297
PN 6	2	DIRECTO	402	816	936	4926	11932,127	29,651224
PN 6	3	CANTO A IND	402	867	63	4635	10564,003	24,233454
PN 6	4	CARA B IND	402	852	266	4715	10931,82	25,690005
PN 6	5	CANTO C IND	402	849	82	4733	11015,446	26,021164
PN 6	6	CARA D IND	402	842	109	4769	11183,654	26,687268
PN 6	7	CARA DB CRUZADO	402	843	118	4765	11164,901	26,613007
PN 6	8	CARA BD CRUZADO	402	847	126	4742	11057,378	26,187217
PN 6	9	CANTO AC CRUZADO	404	840	48	4807	11362,589	27,395853
PN 6	10	CANTO CA CRUZADO	404	862	144	4684	10788,544	25,122634
PN 7	1	DIRECTO	408	908	883	4489	11328,466	27,260725
PN 7	2	DIRECTO	408	920	910	4434	11052,57	26,168177
PN 7	3	CANTO A IND	408	933	85	4372	10745,638	24,952726
PN 7	4	CARA B IND	408	943	177	4327	10525,571	24,081263
PN 7	5	CANTO C IND	408	942	132	4330	10540,172	24,13908
PN 7	6	CARA D IND	408	933	196	4372	10745,638	24,952726
PN 7	7	CARA DB CRUZADO	408	936	224	4357	10672,029	24,661236
PN 7	8	CARA BD CRUZADO	408	937	165	4353	10652,443	24,583675
PN 7	9	CANTO AC CRUZADO	410	925	318	4432	11042,601	26,128702
PN 7	10	CANTO CA CRUZADO	410	954	110	4296	10375,295	23,486167
PN 8	1	DIRECTO	400	1017	826	3933	9387,6121	19,574944
PN 8	2	DIRECTO	400	999	848	4000	9710,1788	20,852308
PN 8	3	CANTO A IND	400	1061	86	3770	8625,6125	16,557426
PN 8	4	CARA B IND	400	1030	240	3883	9150,441	18,635746
PN 8	5	CANTO C IND	400	1026	224	3899	9226,0056	18,934982
PN 8	6	CARA D IND	400	1043	130	3835	8925,6115	17,745422

TABLAS DE RESULTADOS

PN 8	7	CARA DB CRUZADO	400	1026	450	3895	9207,0853	18,860058
PN 8	8	CARA BD CRUZADO	400	1037	139	3856	9023,6303	18,133576
PN 8	9	CANTO AC CRUZADO	402	1047	40	3839	8944,2405	17,819192
PN 8	10	CANTO CA CRUZADO	402	1034	177	3884	9155,1547	18,654413
PN 9	1	DIRECTO	402	831	924	4835	14638,361	40,367909
PN 9	2	DIRECTO	402	823	892	4882	14924,337	41,500373
PN 9	3	CANTO A IND	402	857	62	4688	13761,783	36,896659
PN 9	4	CARA B IND	402	851	256	4724	13973,953	37,736852
PN 9	5	CANTO C IND	402	819	238	4907	15077,579	42,107212
PN 9	6	CARA D IND	402	840	130	4783	14325,185	39,127734
PN 9	7	CARA DB CRUZADO	402	837	325	4802	14439,222	39,57932
PN 9	8	CARA BD CRUZADO	402	855	97	4701	13838,212	37,199321
PN 9	9	CANTO AC CRUZADO	404	836	320	4830	14608,101	40,248078
PN 9	10	CANTO CA CRUZADO	404	837	181	4826	14583,915	40,152303
PN 10	1	DIRECTO	403	855	888	4713	12297,514	31,098156
PN 10	2	DIRECTO	403	807	917	4988	13774,484	36,946957
PN 10	3	CANTO A IND	403	890	121	4528	11351,03	27,350081
PN 10	4	CARA B IND	403	860	111	4682	12136,271	30,459634
PN 10	5	CANTO C IND	403	844	84	4772	12607,336	32,32505
PN 10	6	CARA D IND	403	873	132	4616	11796,524	29,114235
PN 10	7	CARA DB CRUZADO	403	857	140	4699	12224,563	30,809269
PN 10	8	CARA BD CRUZADO	403	866	150	4651	11976,092	29,825325
PN 10	9	CANTO AC CRUZADO	405	884	305	4579	11608,169	28,368351
PN 10	10	CANTO CA CRUZADO	405	848	84	4773	12612,62	32,345976
PN 11	1	DIRECTO	403	857	919	4699	12108,615	30,350116
PN 11	2	DIRECTO	403	854	933	4717	12201,559	30,718175
PN 11	3	CANTO A IND	403	887	108	4540	11303,041	27,160041
PN 11	4	CARA B IND	403	873	164	4616	11684,636	28,671158
PN 11	5	CANTO C IND	403	869	251	4633	11770,86	29,012604
PN 11	6	CARA D IND	403	875	186	4603	11618,914	28,410899
PN 11	7	CARA DB CRUZADO	403	886	123	4548	11342,91	27,317925
PN 11	8	CARA BD CRUZADO	403	877	143	4595	11578,562	28,251104
PN 11	9	CANTO AC CRUZADO	405	890	125	4550	11352,889	27,357439
PN 11	10	CANTO CA CRUZADO	405	864	192	4683	12026,296	30,024133

TABLAS DE RESULTADOS

PN 12	1	DIRECTO	401	973	305	4117	10072,948	22,288872
PN 12	2	DIRECTO	401	949	900	4223	10598,319	24,369345
PN 12	3	CANTO A IND	401	994	355	4033	9666,1	20,677756
PN 12	4	CARA B IND	401	979	255	4090	9941,2605	21,767392
PN 12	5	CANTO C IND	401	959	301	4180	10383,587	23,519004
PN 12	6	CARA D IND	401	977	158	4104	10009,435	22,037361
PN 12	7	CARA DB CRUZADO	401	970	397	4131	10141,571	22,560621
PN 12	8	CARA BD CRUZADO	401	977	318	4100	9989,9325	21,960133
PN 12	9	CANTO AC CRUZADO	403	995	142	4050	9747,7613	21,001135
PN 12	10	CANTO CA CRUZADO	403	958	288	4205	10508,164	24,012329
PN 13	1	DIRECTO	402	1056	886	3803	8756,2589	17,074785
PN 13	2	DIRECTO	402	1030	861	3900	9208,6328	18,866186
PN 13	3	CANTO A IND	402	1104	102	3638	8012,9297	14,131202
PN 13	4	CARA B IND	402	1076	172	3734	8441,4017	15,827951
PN 13	5	CANTO C IND	402	1056	263	3803	8756,2589	17,074785
PN 13	6	CARA D IND	402	1078	177	3729	8418,81	15,738488
PN 13	7	CARA DB CRUZADO	402	1074	159	3740	8468,5518	15,935465
PN 13	8	CARA BD CRUZADO	402	1077	218	3732	8432,3614	15,792151
PN 13	9	CANTO AC CRUZADO	404	1076	326	3753	8527,5264	16,169004
PN 13	10	CANTO CA CRUZADO	404	1086	231	3719	8373,7174	15,559921
PN 14	1	DIRECTO	401	833	924	4808	11866,278	29,390462
PN 14	2	DIRECTO	401	856	864	4681	11247,678	26,940806
PN 14	3	CANTO A IND	401	851	262	4712	11397,148	27,532704
PN 14	4	CARA B IND	401	868	90	4615	10932,74	25,69365
PN 14	5	CANTO C IND	401	857	291	4676	11223,663	26,845705
PN 14	6	CARA D IND	401	868	140	4615	10932,74	25,69365
PN 14	7	CARA DB CRUZADO	401	875	118	4580	10767,542	25,039465
PN 14	8	CARA BD CRUZADO	401	858	153	4672	11204,469	26,769697
PN 14	9	CANTO AC CRUZADO	403	889	73	4532	10543,029	24,150396
PN 14	10	CANTO CA CRUZADO	403	844	97	4772	11689,245	28,689412
PN 15	1	DIRECTO	401	794	857	5045	14679,169	40,52951
PN 15	2	DIRECTO	401	763	930	5249	15890,307	45,325615
PN 15	3	CANTO A IND	401	798	105	5019	14528,258	39,9319
PN 15	4	CARA B IND	401	799	142	5014	14499,325	39,817329
PN 15	5	CANTO C IND	401	788	67	5086	14918,73	41,47817
PN 15	6	CARA D IND	401	788	177	5083	14901,135	41,408496

TABLAS DE RESULTADOS

PN 15	7	CARA DB CRUZADO	401	783	154	5118	15107,051	42,223923
PN 15	8	CARA BD CRUZADO	401	790	184	5076	14860,122	41,246082
PN 15	9	CANTO AC CRUZADO	403	787	53	5117	15101,148	42,200547
PN 15	10	CANTO CA CRUZADO	403	779	183	5170	15415,593	43,445747
PP 1	1	DIRECTO	394	853	2260	4616	10208,197	22,824459
PP 1	2	DIRECTO	394	881	2208	4471	9576,9402	20,324683
PP 1	3	CANTO A IND	394	868	320	4538	9866,1206	21,469837
PP 1	4	CARA B IND	394	865	1371	4551	9922,7284	21,694005
PP 1	5	CANTO C IND	394	897	814	4390	9233,0774	18,962986
PP 1	6	CARA D IND	394	870	891	4526	9814,0109	21,263483
PP 1	7	CARA DB CRUZADO	394	873	943	4513	9757,7144	21,040549
PP 1	8	CARA BD CRUZADO	394	864	1326	4556	9944,5438	21,780394
PP 1	9	CANTO AC CRUZADO	396	884	341	4478	9606,9518	20,443529
PP 1	10	CANTO CA CRUZADO	396	874	420	4528	9822,6862	21,297837
PP 2	1	DIRECTO	394	833	2286	4724	9862,7382	21,456443
PP 2	2	DIRECTO	394	829	2301	4752	9980,0012	21,920805
PP 2	3	CANTO A IND	394	851	369	4630	9474,1381	19,917587
PP 2	4	CARA B IND	394	827	881	4762	10022,049	22,087313
PP 2	5	CANTO C IND	394	838	405	4702	9771,0892	21,093513
PP 2	6	CARA D IND	394	830	797	4743	9942,2339	21,771246
PP 2	7	CARA DB CRUZADO	394	828	748	4757	10001,014	22,004015
PP 2	8	CARA BD CRUZADO	394	832	889	4734	9904,5383	21,621972
PP 2	9	CANTO AC CRUZADO	396	833	350	4753	9984,2019	21,93744
PP 2	10	CANTO CA CRUZADO	396	858	422	4613	9404,6933	19,642585
PP 3	1	DIRECTO	394	842	2183	4679	9980,9477	21,924553
PP 3	2	DIRECTO	394	823	2202	4785	10438,295	23,735649
PP 3	3	CANTO A IND	394	856	431	4599	9642,5635	20,584551
PP 3	4	CARA B IND	394	832	921	4734	10216,972	22,859208
PP 3	5	CANTO C IND	394	816	714	4828	10626,744	24,481905
PP 3	6	CARA D IND	394	836	1251	4711	10117,935	22,467024
PP 3	7	CARA DB CRUZADO	394	837	802	4706	10096,469	22,382019
PP 3	8	CARA BD CRUZADO	394	833	1388	4724	10173,853	22,688459
PP 3	9	CANTO AC CRUZADO	396	849	514	4662	9908,5528	21,637869
PP 3	10	CANTO CA CRUZADO	396	825	521	4800	10503,842	23,995213

TABLAS DE RESULTADOS

PP 4	1	DIRECTO	391	856	2166	4564	10694,434	24,749958
PP 4	2	DIRECTO	391	824	2348	4744	11554,626	28,156318
PP 4	3	CANTO A IND	391	870	427	4491	10355,06	23,406039
PP 4	4	CARA B IND	391	836	981	4675	11220,953	26,834975
PP 4	5	CANTO C IND	391	810	647	4825	11952,566	29,732162
PP 4	6	CARA D IND	391	840	926	4652	11110,815	26,398829
PP 4	7	CARA DB CRUZADO	391	839	1039	4657	11134,712	26,49346
PP 4	8	CARA BD CRUZADO	391	836	936	4635	11029,758	26,077843
PP 4	9	CANTO AC CRUZADO	393	842	615	4662	11158,635	26,588193
PP 4	10	CANTO CA CRUZADO	393	840	354	4676	11225,754	26,853986
PP 5	1	DIRECTO	390	818	2264	4765	12513,183	31,952206
PP 5	2	DIRECTO	390	816	2202	4774	12560,497	32,139569
PP 5	3	CANTO A IND	390	820	613	4755	12460,717	31,74444
PP 5	4	CARA B IND	390	822	1018	4741	12387,45	31,454301
PP 5	5	CANTO C IND	390	815	529	4784	12613,173	32,348164
PP 5	6	CARA D IND	390	811	505	4808	12740,044	32,850573
PP 5	7	CARA DB CRUZADO	390	819	356	4760	12486,937	31,848269
PP 5	8	CARA BD CRUZADO	390	822	748	4741	12387,45	31,454301
PP 5	9	CANTO AC CRUZADO	392	833	834	4700	12174,124	30,60953
PP 5	10	CANTO CA CRUZADO	392	804	354	4872	13081,47	34,202622
PP 6	1	DIRECTO	389	801	2189	4854	12063,42	30,171143
PP 6	2	DIRECTO	389	813	2253	4781	11703,301	28,745074
PP 6	3	CANTO A IND	389	794	562	4899	12288,13	31,060993
PP 6	4	CARA B IND	389	811	1178	4796	11776,853	29,036338
PP 6	5	CANTO C IND	389	814	352	4776	11678,836	28,648189
PP 6	6	CARA D IND	389	814	474	4776	11678,836	28,648189
PP 6	7	CARA DB CRUZADO	389	813	538	4781	11703,301	28,745074
PP 6	8	CARA BD CRUZADO	389	807	1198	4815	11870,349	29,406582
PP 6	9	CANTO AC CRUZADO	391	798	945	4894	12263,06	30,961716
PP 6	10	CANTO CA CRUZADO	391	804	281	4859	12088,285	30,26961
PP 7	1	DIRECTO	392	798	2001	4911	12395,919	31,487841
PP 7	2	DIRECTO	392	798	1981	4906	12370,691	31,387937
PP 7	3	CANTO A IND	392	794	874	4937	12527,521	32,008982
PP 7	4	CARA B IND	392	787	1660	4977	12731,341	32,816111
PP 7	5	CANTO C IND	392	801	333	4891	12295,16	31,088836
PP 7	6	CARA D IND	392	806	589	4862	12149,79	30,51317

TABLAS DE RESULTADOS

PP 7	7	CARA DB CRUZADO	392	799	624	4901	12345,489	31,288135
PP 7	8	CARA BD CRUZADO	392	795	1446	4926	12471,758	31,788164
PP 7	9	CANTO AC CRUZADO	394	807	1208	4877	12224,874	30,810501
PP 7	10	CANTO CA CRUZADO	394	790	251	4982	12756,934	32,91746
PP 8	1	DIRECTO	392	835	1941	4691	12009,258	29,956661
PP 8	2	DIRECTO	392	852	2166	4597	11532,788	28,06984
PP 8	3	CANTO A IND	392	820	756	4780	12469,272	31,778317
PP 8	4	CARA B IND	392	844	1480	4642	11759,682	28,96834
PP 8	5	CANTO C IND	392	865	727	4528	11189,177	26,70914
PP 8	6	CARA D IND	392	842	1067	4655	11825,64	29,229536
PP 8	7	CARA DB CRUZADO	392	846	784	4628	11688,856	28,687869
PP 8	8	CARA BD CRUZADO	392	841	1406	4660	11851,058	29,330191
PP 8	9	CANTO AC CRUZADO	394	838	1101	4702	12065,645	30,179955
PP 8	10	CANTO CA CRUZADO	394	854	369	4612	11608,174	28,368368
PP 9	1	DIRECTO	399	886	1748	4503	14067,413	38,106955
PP 9	2	DIRECTO	399	861	2243	4631	14878,526	41,318962
PP 9	3	CANTO A IND	399	868	1155	4596	14654,479	40,431736
PP 9	4	CARA B IND	399	886	626	4503	14067,413	38,106955
PP 9	5	CANTO C IND	399	865	465	4609	14737,498	40,760491
PP 9	6	CARA D IND	399	886	692	4499	14042,432	38,00803
PP 9	7	CARA DB CRUZADO	399	896	324	4450	13738,217	36,803338
PP 9	8	CARA BD CRUZADO	399	881	769	4528	14224,047	38,727225
PP 9	9	CANTO AC CRUZADO	401	843	519	4753	15672,777	44,464199
PP 9	10	CANTO CA CRUZADO	401	896	530	4472	13874,391	37,342588
PP 10	1	DIRECTO	388	783	2138	4952	12353,357	31,319295
PP 10	2	DIRECTO	388	780	1964	4973	12458,353	31,73508
PP 10	3	CANTO A IND	388	785	408	4937	12278,632	31,023383
PP 10	4	CARA B IND	388	792	1011	4896	12075,54	30,219137
PP 10	5	CANTO C IND	388	794	397	4886	12026,262	30,023997
PP 10	6	CARA D IND	388	784	896	4947	12328,424	31,220558
PP 10	7	CARA DB CRUZADO	388	787	703	4927	12228,941	30,826607
PP 10	8	CARA BD CRUZADO	388	789	1088	4916	12174,397	30,610614
PP 10	9	CANTO AC CRUZADO	390	757	468	5149	13355,788	35,28892
PP 10	10	CANTO CA CRUZADO	390	827	204	4713	11189,704	26,711229

TABLAS DE RESULTADOS

PP 11	1	DIRECTO	392	757	1468	5175	14233,814	38,765904
PP 11	2	DIRECTO	392	759	2200	5164	14173,368	38,526536
PP 11	3	CANTO A IND	392	766	423	5115	13905,668	37,466446
PP 11	4	CARA B IND	392	758	889	5170	14206,323	38,657037
PP 11	5	CANTO C IND	392	774	337	5061	13613,609	36,30989
PP 11	6	CARA D IND	392	758	840	5170	14206,323	38,657037
PP 11	7	CARA DB CRUZADO	392	757	771	5175	14233,814	38,765904
PP 11	8	CARA BD CRUZADO	392	760	799	5153	14113,05	38,287677
PP 11	9	CANTO AC CRUZADO	394	797	495	4941	12975,685	33,783713
PP 11	10	CANTO CA CRUZADO	394	746	230	5235	14565,787	40,080517
PP 12	1	DIRECTO	393	839	1194	4681	12837,468	33,236375
PP 12	2	DIRECTO	393	850	1853	4622	12515,897	31,962953
PP 12	3	CANTO A IND	393	833	859	4712	13008,064	33,911934
PP 12	4	CARA B IND	393	842	1326	4667	12760,794	32,932745
PP 12	5	CANTO C IND	393	860	829	4565	12209,1	30,748038
PP 12	6	CARA D IND	393	845	532	4649	12662,551	32,543701
PP 12	7	CARA DB CRUZADO	393	848	727	4631	12564,687	32,15616
PP 12	8	CARA BD CRUZADO	393	837	726	4694	12908,871	33,519131
PP 12	9	CANTO AC CRUZADO	395	880	530	4487	11795,443	29,109953
PP 12	10	CANTO CA CRUZADO	395	820	453	4812	13566,048	36,121549
PP 13	1	DIRECTO	393	850	1733	4622	12452,449	31,711696
PP 13	2	DIRECTO	393	836	744	4699	12870,807	33,368394
PP 13	3	CANTO A IND	393	587	737	4583	12243,19	30,883032
PP 13	4	CARA B IND	393	837	1305	4694	12843,431	33,259985
PP 13	5	CANTO C IND	393	837	684	4694	12843,431	33,259985
PP 13	6	CARA D IND	393	846	579	4640	12549,627	32,096525
PP 13	7	CARA DB CRUZADO	393	838	1206	4685	12794,227	33,06514
PP 13	8	CARA BD CRUZADO	393	843	718	4658	12647,184	32,482849
PP 13	9	CANTO AC CRUZADO	395	884	553	4466	11626,053	28,439171
PP 13	10	CANTO CA CRUZADO	395	821	484	4807	13469,241	35,738194
PP 14	1	DIRECTO	394	781	1954	5044	15197,884	42,583621
PP 14	2	DIRECTO	394	798	2279	4951	14642,621	40,38478
PP 14	3	CANTO A IND	394	777	592	5066	15330,748	43,109762
PP 14	4	CARA B IND	394	795	859	4952	14648,537	40,408206
PP 14	5	CANTO C IND	394	812	1356	4847	14033,921	37,974325
PP 14	6	CARA D IND	394	784	1260	5024	15077,601	42,107298

TABLAS DE RESULTADOS

PP 14	7	CARA DB CRUZADO	394	785	709	5013	15011,648	41,846128
PP 14	8	CARA BD CRUZADO	394	796	1300	4947	14618,971	40,291124
PP 14	9	CANTO AC CRUZADO	396	782	1112	5060	15294,455	42,966042
PP 14	10	CANTO CA CRUZADO	396	810	491	4887	14266,507	38,895368
PP 15	1	DIRECTO	394	757	2134	5202	15027,199	41,907709
PP 15	2	DIRECTO	394	774	2076	5087	14370,134	39,305731
PP 15	3	CANTO A IND	394	751	446	5241	15253,365	42,803326
PP 15	4	CARA B IND	394	764	1142	5152	14739,714	40,769267
PP 15	5	CANTO C IND	394	781	915	5044	14128,222	38,347758
PP 15	6	CARA D IND	394	766	964	5141	14676,84	40,520286
PP 15	7	CARA DB CRUZADO	394	776	911	5071	14279,88	38,948326
PP 15	8	CARA BD CRUZADO	394	764	709	5152	14739,714	40,769267
PP 15	9	CANTO AC CRUZADO	396	762	611	5123	14574,245	40,114009
PP 15	10	CANTO CA CRUZADO	396	769	347	5145	14699,688	40,610763
PH 1	1	DIRECTO	398	860	969	4624	12770,974	32,973055
PH 1	2	DIRECTO	398	850	1768	4681	13087,769	34,227567
PH 1	3	CANTO A IND	398	860	727	4624	12770,974	32,973055
PH 1	4	CARA B IND	398	866	752	4593	12600,31	32,297229
PH 1	5	CANTO C IND	398	868	55	4580	12529,084	32,015171
PH 1	6	CARA D IND	398	841	896	4731	13368,856	35,34067
PH 1	7	CARA DB CRUZADO	398	851	611	4672	13037,491	34,028464
PH 1	8	CARA BD CRUZADO	398	862	684	4615	12721,308	32,776379
PH 1	9	CANTO AC CRUZADO	400	855	536	4673	13043,073	34,050568
PH 1	10	CANTO CA CRUZADO	400	875	440	4569	12468,973	31,777131
PH 2	1	DIRECTO	394	838	1450	4702	14286,65	38,975134
PH 2	2	DIRECTO	394	841	1570	4683	14171,423	38,518836
PH 2	3	CANTO A IND	394	838	590	4702	14286,65	38,975134
PH 2	4	CARA B IND	394	853	759	4616	13768,821	36,924532
PH 2	5	CANTO C IND	394	857	423	4594	13637,889	36,406039
PH 2	6	CARA D IND	394	837	632	4706	14310,968	39,071432
PH 2	7	CARA DB CRUZADO	394	839	684	4692	14225,946	38,734747
PH 2	8	CARA BD CRUZADO	394	853	744	4616	13768,821	36,924532
PH 2	9	CANTO AC CRUZADO	396	859	739	4605	13703,277	36,664976
PH 2	10	CANTO CA CRUZADO	396	842	228	4698	14262,353	38,878918

TABLAS DE RESULTADOS

PH 3	1	DIRECTO	394	827	2116	4762	13946,871	37,62961
PH 3	2	DIRECTO	394	821	2386	4795	14140,841	38,397729
PH 3	3	CANTO A IND	394	825	814	4776	14028,998	37,954831
PH 3	4	CARA B IND	394	834	1048	4720	13701,938	36,659676
PH 3	5	CANTO C IND	394	822	530	4790	14111,365	38,281007
PH 3	6	CARA D IND	394	839	885	4692	13539,855	36,017826
PH 3	7	CARA DB CRUZADO	394	842	921	4679	13464,93	35,721123
PH 3	8	CARA BD CRUZADO	394	832	994	4734	13783,341	36,982032
PH 3	9	CANTO AC CRUZADO	396	826	716	4791	14117,258	38,304342
PH 3	10	CANTO CA CRUZADO	396	818	527	4838	14395,599	39,406572
PH 4	1	DIRECTO	396	869	1913	4553	12736,393	32,836115
PH 4	2	DIRECTO	396	886	1937	4465	12248,815	30,905306
PH 4	3	CANTO A IND	396	881	583	4494	12408,443	31,537433
PH 4	4	CARA B IND	396	887	669	4461	12226,878	30,818438
PH 4	5	CANTO C IND	396	905	952	4373	11749,249	28,927024
PH 4	6	CARA D IND	396	894	958	4429	12052,094	30,126291
PH 4	7	CARA DB CRUZADO	396	895	710	4421	12008,594	29,954033
PH 4	8	CARA BD CRUZADO	396	881	1088	4494	12408,443	31,537433
PH 4	9	CANTO AC CRUZADO	398	911	836	4368	11722,396	28,820689
PH 4	10	CANTO CA CRUZADO	398	882	467	4508	12485,874	31,844062
PH 5	1	DIRECTO	393	838	1538	4685	13676,35	36,558344
PH 5	2	DIRECTO	393	824	2076	4768	14165,226	38,494293
PH 5	3	CANTO A IND	393	838	754	4685	13676,35	36,558344
PH 5	4	CARA B IND	393	844	598	4653	13490,16	35,821034
PH 5	5	CANTO C IND	393	832	551	4722	13893,222	37,417158
PH 5	6	CARA D IND	393	829	579	4736	13975,726	37,743877
PH 5	7	CARA DB CRUZADO	393	838	772	4685	13676,35	36,558344
PH 5	8	CARA BD CRUZADO	393	835	467	4703	13781,642	36,975302
PH 5	9	CANTO AC CRUZADO	395	841	831	4695	13734,795	36,78979
PH 5	10	CANTO CA CRUZADO	395	830	435	4755	14088,088	38,188827
PH 6	1	DIRECTO	394	772	2114	5098	16363,694	47,200229
PH 6	2	DIRECTO	394	768	2129	5125	16537,484	47,888436
PH 6	3	CANTO A IND	394	758	941	5196	16998,867	49,715514
PH 6	4	CARA B IND	394	779	911	5055	16088,813	46,111701
PH 6	5	CANTO C IND	394	768	791	5125	16537,484	47,888436
PH 6	6	CARA D IND	394	762	994	5168	16816,155	48,991974

TABLAS DE RESULTADOS

PH 6	7	CARA DB CRUZADO	394	767	1089	5135	16602,083	48,14425
PH 6	8	CARA BD CRUZADO	394	773	765	5092	16325,199	47,047788
PH 6	9	CANTO AC CRUZADO	396	769	1029	5145	16666,809	48,400563
PH 6	10	CANTO CA CRUZADO	396	763	922	5183	16913,914	49,379099
PH 7	1	DIRECTO	393	971	2292	4045	10120,243	22,476161
PH 7	2	DIRECTO	393	958	2101	4100	10397,324	23,573404
PH 7	3	CANTO A IND	393	983	1043	3995	9871,5975	21,491526
PH 7	4	CARA B IND	393	973	1033	4035	10070,266	22,278254
PH 7	5	CANTO C IND	393	953	797	4121	10504,106	23,99626
PH 7	6	CARA D IND	393	977	703	4018	9985,5902	21,942937
PH 7	7	CARA DB CRUZADO	393	970	881	4049	10140,268	22,555461
PH 7	8	CARA BD CRUZADO	393	980	710	4008	9935,9478	21,746353
PH 7	9	CANTO AC CRUZADO	395	969	913	4076	10275,956	23,092785
PH 7	10	CANTO CA CRUZADO	395	969	1129	4073	10260,835	23,032906
PH 8	1	DIRECTO	394	803	2065	4901	14777,296	40,918092
PH 8	2	DIRECTO	394	800	2369	4921	14898,148	41,396667
PH 8	3	CANTO A IND	394	805	575	4892	14723,073	40,703368
PH 8	4	CARA B IND	394	812	986	4847	14453,453	39,635672
PH 8	5	CANTO C IND	394	807	784	4877	14632,923	40,346373
PH 8	6	CARA D IND	394	808	930	4872	14602,934	40,227619
PH 8	7	CARA DB CRUZADO	394	808	1178	4872	14602,934	40,227619
PH 8	8	CARA BD CRUZADO	394	812	889	4847	14453,453	39,635672
PH 8	9	CANTO AC CRUZADO	396	797	461	4967	15177,977	42,504788
PH 8	10	CANTO CA CRUZADO	396	820	485	4824	14316,609	39,093771
PH 9	1	DIRECTO	394	925	1585	4259	11445,088	27,722547
PH 9	2	DIRECTO	394	947	1731	4157	10903,449	25,577657
PH 9	3	CANTO A IND	394	938	504	4196	11108,996	26,391623
PH 9	4	CARA B IND	394	943	1101	4178	11013,889	26,015002
PH 9	5	CANTO C IND	394	957	896	4114	10679,045	24,689018
PH 9	6	CARA D IND	394	954	679	4128	10751,851	24,977328
PH 9	7	CARA DB CRUZADO	394	951	1024	4142	10824,903	25,266617
PH 9	8	CARA BD CRUZADO	394	945	763	4167	10955,97	25,785642
PH 9	9	CANTO AC CRUZADO	396	947	756	4181	11029,712	26,07766
PH 9	10	CANTO CA CRUZADO	396	947	583	4181	11029,712	26,07766

TABLAS DE RESULTADOS

PH 10	1	DIRECTO	396	1031	1144	3838	9281,4424	19,154512
PH 10	2	DIRECTO	396	984	2176	4022	10192,71	22,763131
PH 10	3	CANTO A IND	396	1034	649	3826	9223,4939	18,925036
PH 10	4	CARA B IND	396	1039	709	3808	9136,9114	18,582169
PH 10	5	CANTO C IND	396	999	604	3963	9895,8631	21,587618
PH 10	6	CARA D IND	396	1009	926	3922	9692,1631	20,780966
PH 10	7	CARA DB CRUZADO	396	1041	581	3802	9108,1413	18,46824
PH 10	8	CARA BD CRUZADO	396	1011	1013	3916	9662,531	20,663623
PH 10	9	CANTO AC CRUZADO	398	991	487	4016	10162,322	22,642794
PH 10	10	CANTO CA CRUZADO	398	1046	525	3804	9117,7263	18,506196
PH 11	1	DIRECTO	398	860	2027	4624	13113,844	34,330822
PH 11	2	DIRECTO	398	871	2403	4567	12792,528	33,058412
PH 11	3	CANTO A IND	398	864	665	4606	13011,945	33,927304
PH 11	4	CARA B IND	398	893	1219	4455	12172,78	30,60421
PH 11	5	CANTO C IND	398	879	1294	4525	12558,32	32,130946
PH 11	6	CARA D IND	398	889	587	4475	12282,321	31,037991
PH 11	7	CARA DB CRUZADO	398	877	1731	4534	12608,325	32,328967
PH 11	8	CARA BD CRUZADO	398	887	1146	4484	12331,774	31,233827
PH 11	9	CANTO AC CRUZADO	400	866	1429	4616	13068,507	34,151286
PH 11	10	CANTO CA CRUZADO	400	871	802	4590	12921,702	33,569942
PH 12	1	DIRECTO	397	816	2178	4860	14826,711	41,113776
PH 12	2	DIRECTO	397	804	2208	4934	15281,662	42,91538
PH 12	3	CANTO A IND	397	833	506	4760	14222,836	38,722429
PH 12	4	CARA B IND	397	824	808	4817	14565,506	40,079404
PH 12	5	CANTO C IND	397	813	864	4879	14942,867	41,573752
PH 12	6	CARA D IND	397	813	928	4879	14942,867	41,573752
PH 12	7	CARA DB CRUZADO	397	811	1358	4894	15034,889	41,938159
PH 12	8	CARA BD CRUZADO	397	822	872	4816	14559,459	40,055458
PH 12	9	CANTO AC CRUZADO	399	829	705	4808	14511,129	39,864071
PH 12	10	CANTO CA CRUZADO	399	816	789	4885	14979,642	41,719381
PH 13	1	DIRECTO	399	842	1680	4722	12937,609	33,632934
PH 13	2	DIRECTO	399	837	1416	4754	13113,555	34,329676
PH 13	3	CANTO A IND	399	844	911	4713	12888,339	33,437823
PH 13	4	CARA B IND	399	829	1193	4796	13346,286	35,251292
PH 13	5	CANTO C IND	399	813	587	4892	13885,93	37,388283
PH 13	6	CARA D IND	399	859	994	4628	12427,643	31,613467

TABLAS DE RESULTADOS

PH 13	7	CARA DB CRUZADO	399	854	1101	4659	12594,69	32,274974
PH 13	8	CARA BD CRUZADO	399	833	1044	4777	13240,749	34,833366
PH 13	9	CANTO AC CRUZADO	401	831	667	4811	13429,9	35,582405
PH 13	10	CANTO CA CRUZADO	401	822	902	4863	13721,785	36,738269
PH 14	1	DIRECTO	398	832	1692	4782	12712,407	32,741131
PH 14	2	DIRECTO	398	836	2202	4759	12590,415	32,258044
PH 14	3	CANTO A IND	398	816	930	4872	13195,419	34,653861
PH 14	4	CARA B IND	398	833	1594	4767	12632,78	32,42581
PH 14	5	CANTO C IND	398	841	656	4731	12442,697	31,673082
PH 14	6	CARA D IND	398	852	714	4668	12113,519	30,369537
PH 14	7	CARA DB CRUZADO	398	854	1003	4659	12066,854	30,184742
PH 14	8	CARA BD CRUZADO	398	833	962	4777	12685,837	32,635914
PH 14	9	CANTO AC CRUZADO	400	846	617	4727	12421,666	31,589797
PH 14	10	CANTO CA CRUZADO	400	811	866	4926	13489,55	35,818617
PH 15	1	DIRECTO	398	779	1951	5106	16245,643	46,732747
PH 15	2	DIRECTO	398	774	2397	5138	16449,909	47,541638
PH 15	3	CANTO A IND	398	792	602	5022	15715,518	44,633452
PH 15	4	CARA B IND	398	785	795	5064	15979,481	45,678746
PH 15	5	CANTO C IND	398	792	536	5022	15715,518	44,633452
PH 15	6	CARA D IND	398	777	846	5117	16315,715	47,010233
PH 15	7	CARA DB CRUZADO	398	785	635	5064	15979,481	45,678746
PH 15	8	CARA BD CRUZADO	398	769	928	5106	16245,643	46,732747
PH 15	9	CANTO AC CRUZADO	400	794	1020	5032	15778,167	44,881542
PH 15	10	CANTO CA CRUZADO	400	783	514	5105	16239,28	46,70755
PH 16	1	DIRECTO	397	803	1656	4944	16511,497	47,78553
PH 16	2	DIRECTO	397	816	2198	4846	15863,403	45,219076
PH 16	3	CANTO A IND	397	797	420	4979	16746,104	48,714573
PH 16	4	CARA B IND	397	823	1080	4822	15706,664	44,598389
PH 16	5	CANTO C IND	397	838	718	4737	15157,805	42,424906
PH 16	6	CARA D IND	397	811	990	4894	16179,216	46,469694
PH 16	7	CARA DB CRUZADO	397	815	1082	4870	16020,92	45,842844
PH 16	8	CARA BD CRUZADO	397	817	757	4855	15922,381	45,452628
PH 16	9	CANTO AC CRUZADO	399	809	765	4929	16411,458	47,389375
PH 16	10	CANTO CA CRUZADO	399	829	600	4808	15615,592	44,237745

6.- VIBRACIONES INDUCIDAS

Especie	Nº viga	MOE	MOR
Pinus Sylvestris	ps1	9550	20,218
Pinus Sylvestris	ps2	9475	19,921
Pinus Sylvestris	ps3	9041	18,20236
Pinus Sylvestris	ps4	8534	16,19464
Pinus Sylvestris	ps5	8381	15,58876
Pinus Sylvestris	ps6	10650	24,574
Pinus Sylvestris	ps7	9217	18,89932
Pinus Sylvestris	ps8	11544	28,11424
Pinus Sylvestris	ps9	11228	26,86288
Pinus Sylvestris	ps10	10463	23,83348
Pinus Sylvestris	ps11	12900	33,484
Pinus Sylvestris	ps12	10158	22,62568
Pinus Sylvestris	ps13	11180	26,6728
Pinus Sylvestris	ps14	9976	21,90496
Pinus Sylvestris	ps15	11387	27,49252
Pinus Nigra	pn1	9219	18,90724
Pinus Nigra	pn2	8807	17,27572
Pinus Nigra	pn3	11768	29,00128
Pinus Nigra	pn4	8373	15,55708
Pinus Nigra	pn5	10878	25,47688
Pinus Nigra	pn6	8543	16,23028
Pinus Nigra	pn7	8152	14,68192
Pinus Nigra	pn8	7001	10,12396
Pinus Nigra	pn9	10467	23,84932
Pinus Nigra	pn10	8353	15,47788
Pinus Nigra	pn11	9030	18,1588
Pinus Nigra	pn12	8021	14,16316
Pinus Nigra	pn13	6512	8,18752
Pinus Nigra	pn14	8997	18,02812
Pinus Nigra	pn15	11721	28,81516
Pinus Pinaster	PP1	7744	13,06624

Pinus Pinaster	PP2	7981	14,00476
Pinus Pinaster	PP3	8164	14,72944
Pinus Pinaster	PP4	9504	20,03584
Pinus Pinaster	PP5	10079	22,31284
Pinus Pinaster	PP6	8903	17,65588
Pinus Pinaster	PP7	10230	22,9108
Pinus Pinaster	PP8	9253	19,04188
Pinus Pinaster	PP9	10760	25,0096
Pinus Pinaster	PP10	10059	22,23364
Pinus Pinaster	PP11	11120	26,4352
Pinus Pinaster	PP12	10253	23,00188
Pinus Pinaster	PP13	10526	24,08296
Pinus Pinaster	PP14	12193	30,68428
Pinus Pinaster	PP15	10929	25,67884
Pinus Halepensis	PH1	8615	16,5154
Pinus Halepensis	PH2	9155	18,6538
Pinus Halepensis	PH3	10463	23,83348
Pinus Halepensis	PH4	9521	20,10316
Pinus Halepensis	PH5	10277	23,09692
Pinus Halepensis	PH6	14385	39,3646
Pinus Halepensis	PH7	8293	15,24028
Pinus Halepensis	PH8	11483	27,87268
Pinus Halepensis	PH9	8537	16,20652
Pinus Halepensis	PH10	7321	11,39116
Pinus Halepensis	PH11	10876	25,46896
Pinus Halepensis	PH12	11993	29,89228
Pinus Halepensis	PH13	10400	23,584
Pinus Halepensis	PH14	11109	26,39164
Pinus Halepensis	PH15	12504	31,91584
Pinus Halepensis	PH16	12921	33,56716

7.- RESISTOGRAFÍAS

7.1.- MEDIAS TODAS ESPECIES

Especie	Feed V 0,5	Feed H 0,5	Drill V 0,5	Drill H 0,5
Pinus Sylvestris	18,57	20,82	10,04	9,24
Pinus Sylvestris	17,76	19,94	9,35	8,85
Pinus Sylvestris	17,43	18,37	9,20	8,98
Pinus Sylvestris	18,98	19,00	9,57	8,75
Pinus Sylvestris	18,70	21,16	9,65	8,97
Pinus Sylvestris	23,52	24,77	11,02	11,06
Pinus Sylvestris	21,29	21,82	10,96	10,28
Pinus Sylvestris	23,42	22,62	12,01	10,82
Pinus Sylvestris	25,48	24,47	12,12	11,16
Pinus Sylvestris	21,62	20,35	10,53	9,68
Pinus Sylvestris	21,98	21,47	11,49	9,98
Pinus Sylvestris	22,52	20,51	11,82	10,36
Pinus Sylvestris	20,34	21,04	10,28	9,75
Pinus Sylvestris	21,02	20,63	10,93	9,72

Pinus Sylvestris	22,62	21,34	11,18	10,30
Pinus Pinaster	24,99	19,77	10,58	11,76
Pinus Pinaster	22,66	19,74	9,79	10,13
Pinus Pinaster	23,94	20,43	10,83	10,46
Pinus Pinaster	27,89	23,73	11,89	12,02
Pinus Pinaster	33,04	24,48	14,03	12,77
Pinus Pinaster	26,54	20,68	11,70	11,21
Pinus Pinaster	27,95	22,56	11,82	11,66
Pinus Pinaster	29,53	21,58	11,99	11,28
Pinus Pinaster	42,34	33,56	17,63	17,76
Pinus Pinaster	29,84	24,06	12,95	11,87
Pinus Pinaster	34,79	28,96	14,71	13,87
Pinus Pinaster	34,48	31,68	15,33	15,23
Pinus Pinaster	35,52	33,10	15,87	15,74
Pinus Pinaster	32,87	28,39	14,90	13,62
Pinus Pinaster	28,14	24,59	13,02	12,41
Pinus Nigra	24,56	23,60	11,61	9,56
Pinus Nigra	24,28	21,53	10,65	9,06
Pinus Nigra	30,01	23,85	13,95	10,21

Pinus Nigra	26,81	21,73	13,21	10,27
Pinus Nigra	28,41	24,63	13,84	11,30
Pinus Nigra	22,34	19,31	10,04	7,34
Pinus Nigra	21,70	18,80	10,50	8,09
Pinus Nigra	23,13	21,70	11,18	9,63
Pinus Nigra	29,26	22,61	13,77	9,94
Pinus Nigra	24,04	22,04	10,64	9,21
Pinus Nigra	24,40	19,69	10,60	8,41
Pinus Nigra	28,02	22,45	13,59	9,97
Pinus Nigra	25,30	22,25	11,33	10,56
Pinus Nigra	22,83	19,20	9,81	8,21
Pinus Nigra	27,59	22,72	11,53	10,48
Pinus Halepensis	40,15	35,00	16,50	15,87
Pinus Halepensis	41,63	34,64	18,52	16,98
Pinus Halepensis	40,05	35,04	16,69	17,21
Pinus Halepensis	43,85	30,49	17,24	14,95
Pinus Halepensis	43,86	33,36	16,31	16,42
Pinus Halepensis	48,80	38,68	18,18	19,04
Pinus Halepensis	46,87	31,39	17,19	15,07
Pinus Halepensis	47,82	34,65	16,83	15,82
Pinus Halepensis	43,65	31,97	16,16	16,03
Pinus Halepensis	41,35	33,01	15,04	15,60
Pinus Halepensis	40,68	33,24	15,22	15,94

Pinus Halepensis	44,19	35,66	16,01	15,76
Pinus Halepensis	43,33	32,50	16,76	14,52
Pinus Halepensis	39,68	33,33	16,36	14,78
Pinus Halepensis	42,58	37,92	17,13	16,69
Pinus Halepensis	45,19	42,25	19,17	17,74

7.2.- PLANTILLA RESISTOGRAFIAS

Se realizaron 610 incisiones resistográficas en todo el conjunto de vigas. Debido a la gran cantidad de datos solo se muestra los valores de la resistografía número 1.

Nº resistografía	1	
	1.32	
Modelo	PD400-0979	
	000316 000800 001730	
	1.11 1.40 1.30	
Nombre	PSV V1	
Fecha	29.05.2018	
Hora	13:51:28	
Nº de muestras por mm	10	
Resolución de amplitud	10000	
Profundidad máxima de perforación del instrumento	4015	
	1	
Profundidad de perforación preseleccionada	1850	
Profundidad de perforación	1850	
Velocidad de avance (mm/min)	450	
Vueltas (r.p.m.)	2500	
Compensación motor de alimentación	29	
Motor de perforación compensado	285	
Amplitud máxima de avance	3417	
Amplitud máxima de resistencia	1240	
Razón para abortar	1	
Estado de comprobación de aguja	1	
Resultado de verificación de aguja	1	
	1	

		1	
		0	
		0	
Ángulo sensor inclinación X		0	
Ángulo sensor inclinación Y		0,4	
Ángulo sensor inclinación Z		90	
Espesor (cm)			
	0,01	0	0
	0,02	0	0
	0,03	0	0
	0,04	0	0
	0,05	0	0
	0,06	0	0
	0,07	1	0
	0,08	1	0
	0,09	4	2
	0,1	19	16
	0,11	47	37
	0,12	77	106
	0,13	114	197
	0,14	153	325
	0,15	204	483
	0,16	263	642
	0,17	328	811
	0,18	401	980
	0,19	477	1139
	0,2	538	1252
	0,21	562	1339
	0,22	587	1387
	0,23	618	1423
	0,24	638	1432
	0,25	651	1416
	0,26	659	1401
	0,27	663	1389
	0,28	657	1389
	0,29	643	1401
	0,3	631	1450
	0,31	652	1523
	0,32	671	1594
	0,33	684	1670
	0,34	711	1730
	0,35	739	1791
	0,36	765	1841

TABLAS DE RESULTADOS

	0,37	788	1872
	0,38	805	1882
	0,39	822	1879
	0,4	840	1860
	0,41	847	1831
	0,42	844	1788
	0,43	834	1729
	0,44	819	1684
	0,45	790	1639
	0,46	762	1610
	0,47	734	1595
	0,48	726	1584
	0,49	724	1592
	0,5	727	1609
	0,51	729	1632

	17,75	738	1217
	17,76	671	1070
	17,77	594	899
	17,78	507	718
	17,79	416	542
	17,8	328	374
	17,81	240	227
	17,82	158	127
	17,83	94	63
	17,84	51	28
	17,85	21	11
	17,86	6	0
	17,87	0	0
	17,88	0	0
	17,89	0	0
	17,9	0	0
	17,91	0	0
	17,92	0	0
	17,93	0	0
	17,94	0	0
	17,95	0	0
	17,96	0	0
	17,97	0	0
	17,98	0	0
	17,99	0	0
	18	0	0

TABLAS DE RESULTADOS

18,01	0	0
18,02	0	0
18,03	0	0
18,04	0	1
18,05	0	1
18,06	0	1
18,07	0	1
18,08	0	1
18,09	0	1
18,1	0	1
18,11	0	1
18,12	0	1
18,13	0	1
18,14	0	0
18,15	0	0
18,16	0	0
18,17	0	0
18,18	0	0
18,19	0	0
18,2	0	0
18,21	0	0
18,22	0	0
18,23	0	0
18,24	0	0
18,25	0	0
18,26	0	0
18,27	0	0
18,28	0	0
18,29	0	0
18,3	0	0
18,31	0	0
18,32	0	0
18,33	0	0
18,34	0	0
18,35	0	3
18,36	0	3
18,37	0	3
18,38	0	3
18,39	0	3
18,4	0	3
18,41	0	3
18,42	0	3
18,43	0	3
18,44	0	3

TABLAS DE RESULTADOS

	18,45	0	0
	18,46	0	0
	18,47	0	0
	18,48	0	0
	18,49	0	0
	18,5	0	0

8.- CLASIFICACIÓN VISUAL

Especie	Nº viga	Nudos	Anillos	Fendas	Acebolla dura	Resina	Fibras	Gema	Deformaciones
Pinus Sylvestris	PS1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
Pinus Sylvestris	PS2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
Pinus Sylvestris	PS3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
Pinus Sylvestris	PS4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
Pinus Sylvestris	PS5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Sylvestris	PS6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓
Pinus Sylvestris	PS7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X
Pinus Sylvestris	PS8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
Pinus Sylvestris	PS9	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
Pinus Sylvestris	PS10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
Pinus Sylvestris	PS11	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Sylvestris	PS12	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Sylvestris	PS13	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Sylvestris	PS14	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Sylvestris	PS15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X

TABLAS DE RESULTADOS

Pinus Pinaster	PP1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
Pinus Pinaster	PP2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Pinaster	PP3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Pinaster	PP4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Pinaster	PP5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Pinaster	PP6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
Pinus Pinaster	PP7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Pinaster	PP8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Pinaster	PP9	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Pinaster	PP10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
Pinus Pinaster	PP11	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
Pinus Pinaster	PP12	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Pinaster	PP13	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Pinaster	PP14	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Pinaster	PP15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Nigra	PN1	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Nigra	PN2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

TABLAS DE RESULTADOS

Pinus Nigra	PN3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Nigra	PN4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Nigra	PN5	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Nigra	PN6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Nigra	PN7	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Nigra	PN8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Nigra	PN9	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Nigra	PN10	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Nigra	PN11	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Nigra	PN12	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Nigra	PN13	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Nigra	PN14	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Nigra	PN15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Halepensis	PH1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Halepensis	PH2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓
Pinus Halepensis	PH3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Halepensis	PH4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

TABLAS DE RESULTADOS

Pinus Halepensis	PH5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Halepensis	PH6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Halepensis	PH7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
Pinus Halepensis	PH8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Halepensis	PH9	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Halepensis	PH10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
Pinus Halepensis	PH11	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
Pinus Halepensis	PH12	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Halepensis	PH13	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Halepensis	PH14	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Halepensis	PH15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pinus Halepensis	PH16	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓

9.- % ALBURA/DURAMEN

Especie	N° Viga	Área albura (mm ²)	Área duramen (mm ²)	Total (mm ²)	Albura (%)	Duramen (%)
Pinus Sylvestris	1	1930,16	11650,18	13580,34	14,21	85,79
Pinus Sylvestris	2	1390,54	12819,48	14210,02	9,79	90,21
Pinus Sylvestris	3	3903,39	9845,05	13748,44	28,39	71,61
Pinus Sylvestris	4	2542,37	11578,04	14120,41	18,00	82,00
Pinus Sylvestris	5	4989,35	9234,63	14223,98	35,08	64,92
Pinus Sylvestris	6	5805,51	7895,04	13700,55	42,37	57,63
Pinus Sylvestris	7	4384,40	9356,12	13740,52	31,91	68,09
Pinus Sylvestris	8	4859,62	8905,16	13764,78	35,30	64,70
Pinus Sylvestris	9	7335,34	6413,50	13748,84	53,35	46,65
Pinus Sylvestris	10	157,34	13778,62	13935,96	1,13	98,87
Pinus Sylvestris	11	1617,13	12017,60	13634,73	11,86	88,14
Pinus Sylvestris	12	3639,84	9858,47	13498,31	26,97	73,03
Pinus Sylvestris	13	912,22	12382,99	13295,21	6,86	93,14
Pinus Sylvestris	14	3085,20	10814,04	13899,24	22,20	77,80
Pinus Sylvestris	15	12574,63	1234,48	13809,11	91,06	8,94
Pinus Nigra	1	11157,69	2630,46	13788,15	80,92	19,08

TABLAS DE RESULTADOS

Pinus Nigra	2	11854,00	1523,36	13377,36	88,61	11,39
Pinus Nigra	3	11510,23	2597,14	14107,37	81,59	18,41
Pinus Nigra	4	6888,50	6610,99	13499,49	51,03	48,97
Pinus Nigra	5	9706,24	4037,64	13743,88	70,62	29,38
Pinus Nigra	6	9119,31	5069,69	14189,00	64,27	35,73
Pinus Nigra	7	5710,71	8179,23	13889,94	41,11	58,89
Pinus Nigra	8	1154,63	12613,59	13768,22	8,39	91,61
Pinus Nigra	9	12673,67	1000,16	13673,83	92,69	7,31
Pinus Nigra	10	10836,63	2518,51	13355,14	81,14	18,86
Pinus Nigra	11	9249,62	4617,15	13866,77	66,70	33,30
Pinus Nigra	12	3517,89	10151,07	13668,96	25,74	74,26
Pinus Nigra	13	5374,10	8113,11	13487,21	39,85	60,15
Pinus Nigra	14	7784,56	6229,36	14013,92	55,55	44,45
Pinus Nigra	15	8362,86	5505,74	13868,60	60,30	39,70
Pinus Pinaster	1	5443,20	8315,63	13758,83	40	60
Pinus Pinaster	2	13702,57	585,02	14287,59	95,91	4,09
Pinus Pinaster	3	10354,22	3253,48	13607,70	76,09	23,91
Pinus Pinaster	4	11428,52	2735,37	14163,89	80,69	19,31
Pinus Pinaster	5	8950,91	4709,37	13660,28	65,53	34,47
Pinus Pinaster	6	928,88	12890,70	13819,58	6,72	93,28
Pinus Pinaster	7	12017,34	1525,98	13543,32	88,73	11,27
Pinus Pinaster	8	2950,40	10596,43	13546,83	21,78	78,22
Pinus Pinaster	9	8405,17	3939,86	12345,03	68,09	31,91
Pinus Pinaster	10	10614,36	3590,69	14205,05	74,72	25,28

TABLAS DE RESULTADOS

Pinus Pinaster	11	12018,12	1801,23	13819,35	86,97	13,03
Pinus Pinaster	12	11452,47	2229,37	13681,84	83,71	16,29
Pinus Pinaster	13	12490,85	826,37	13317,22	93,79	6,21
Pinus Pinaster	14	3763,73	9957,30	13721,03	27,43	72,57
Pinus Pinaster	15	1315,71	12103,65	13419,36	9,80	90,20
Pinus Halepensis	1	15063,66	0,00	15063,66	100,00	0,00
Pinus Halepensis	2	14224,41	0,00	14224,41	100,00	0,00
Pinus Halepensis	3	13693,51	285,07	13978,58	97,96	2,04
Pinus Halepensis	4	13856,67	0,00	13856,67	100,00	0,00
Pinus Halepensis	5	13098,09	641,51	13739,60	95,33	4,67
Pinus Halepensis	6	13225,76	0,00	13225,76	100,00	0,00
Pinus Halepensis	7	11201,49	2752,25	13953,74	80,28	19,72
Pinus Halepensis	8	13690,50	0,00	13690,50	100,00	0,00
Pinus Halepensis	9	10683,62	2904,34	13587,96	78,63	21,37
Pinus Halepensis	10	12455,18	1591,58	14046,76	88,67	11,33
Pinus Halepensis	11	13321,87	1525,74	14847,61	89,72	10,28
Pinus Halepensis	12	13115,61	1108,11	14223,72	92,21	7,79

Pinus Halepensis	13	13480,66	0,00	13480,66	100,00	0,00
Pinus Halepensis	14	14156,50	411,47	14567,97	97,18	2,82
Pinus Halepensis	15	13804,20	0,00	13804,20	100,00	0,00
Pinus Halepensis	16	13171	57,82	13228,78	99,56	0,44

10.- RESULTADOS ENSAYOS DE ROTURA

10.1.- DATOS MÓDULO DE ELASTICIDAD GLOBAL A FLEXIÓN

Especie	Nº viga	h (mm)	b (mm)	l (mm)	6h (mm)	a (mm)	W ₁ (mm)	F ₁ (N)	W ₂ (mm)	F ₂ (N)	MOE (N/mm ²)
Pinus Sylvestris	PS1	176	79	4000	1056	1395	7,187	2036,640	27,713	8148,557	10262,683
Pinus Sylvestris	PS2	173	80	4000	1038	1375	7,222	2173,722	29,280	8688,220	10478,467
Pinus Sylvestris	PS3	174	77	4000	1044	1365	6,360	1941,152	27,092	7765,531	10117,724
Pinus Sylvestris	PS4	175	80	4000	1050	1385	5,307	1814,943	19,994	7294,662	13039,156
Pinus Sylvestris	PS5	175	80	4000	1050	1380	5,056	2048,415	20,564	8235,522	13978,997
Pinus Sylvestris	PS6	173	78	4000	1038	1385	9,871	3259,572	38,282	13025,141	12711,761
Pinus Sylvestris	PS7	176	79	4000	1056	1395	10,283	3111,475	42,407	12427,230	9979,662
Pinus Sylvestris	PS8	175	79	4000	1050	1385	4,040	1892,550	17,577	7571,592	14998,633
Pinus Sylvestris	PS9	173	77	4000	1038	1385	7,238	2622,225	28,159	10465,675	14148,472
Pinus Sylvestris	PS10	175	77	4000	1050	1395	8,526	2726,609	32,997	10923,299	12162,351
Pinus Sylvestris	PS11	175	78	4000	1050	1385	6,713	2945,310	27,251	11749,351	15568,761
Pinus Sylvestris	PS12	172	78	4000	1032	1395	9,306	3065,315	37,841	12254,276	12129,106
Pinus Sylvestris	PS13	174	76	4000	1044	1405	8,340	2774,709	30,149	11063,760	14449,799
Pinus Sylvestris	PS14	175	78	4000	1050	1385	9,529	3120,720	37,187	12485,450	12075,820
Pinus Sylvestris	PS15	176	78	4000	1056	1385	10,295	3125,036	36,928	12508,938	12382,278
Pinus Pinaster	PP1	180	77	4000	1080	1335	9,373	2571,635	35,558	10272,454	9426,354

TABLAS DE RESULTADOS

Pinus Pinaster	PP2	178	79	4000	1068	1340	8,612	2750,797	33,514	10990,777	10783,077
Pinus Pinaster	PP3	179	76	4000	1074	1335	5,534	1714,750	22,815	6829,775	9787,797
Pinus Pinaster	PP4	179	80	4000	1074	1335	8,694	3084,446	33,776	12285,354	11640,771
Pinus Pinaster	PP5	178	77	4000	1068	1335	6,724	2436,561	27,439	9717,114	11784,748
Pinus Pinaster	PP6	179	78	4000	1074	1345	6,952	2276,606	26,351	9097,726	11492,232
Pinus Pinaster	PP7	178	77	4000	1068	1335	7,582	2958,235	31,123	11825,379	12691,351
Pinus Pinaster	PP8	179	77	4000	1074	1345	7,371	2602,964	28,405	10383,547	12301,084
Pinus Pinaster	PP9	177	76	4000	1062	1345	7,354	2727,861	27,927	10881,174	13906,981
Pinus Pinaster	PP10	176	78	4000	1056	1345	8,836	2951,031	33,659	11750,016	12208,748
Pinus Pinaster	PP11	176	79	4000	1056	1345	7,009	2659,320	28,702	10619,437	12497,418
Pinus Pinaster	PP12	176	77	4000	1056	1345	10,001	3648,393	38,635	14584,759	13409,386
Pinus Pinaster	PP13	175	77	4000	1050	1345	8,969	3313,306	35,503	13233,641	13337,374
Pinus Pinaster	PP14	175	77	4000	1050	1345	9,003	3484,013	32,648	13882,630	15895,144
Pinus Pinaster	PP15	176	78	4000	1056	1345	7,880	2897,930	27,202	11520,746	15647,296
Pinus Nigra	PN1	174	76	4000	1044	1345	5,853	1922,215	24,347	7671,702	11303,026
Pinus Nigra	PN2	176	79	4000	1056	1365	8,345	2585,311	34,372	10335,375	10112,352
Pinus Nigra	PN3	174	79	4000	1044	1365	6,049	2173,134	22,215	8680,410	14449,029
Pinus Nigra	PN4	175	79	4000	1050	1365	6,266	2000,753	26,993	7984,349	9958,732
Pinus Nigra	PN5	175	79	4000	1050	1355	5,224	1896,761	23,347	7572,953	10800,101

TABLAS DE RESULTADOS

Pinus Nigra	PN6	175	80	4000	1050	1365	6,221	2013,892	25,658	8034,792	10587,045
Pinus Nigra	PN7	177	75	4000	1062	1365	3,837	1153,419	17,401	4591,327	8859,205
Pinus Nigra	PN8	175	79	4000	1050	1355	6,469	1725,548	28,706	6877,825	7866,624
Pinus Nigra	PN9	176	78	4000	1056	1365	4,619	1617,072	19,260	6449,223	11431,579
Pinus Nigra	PN10	177	78	4000	1062	1375	6,769	2008,316	29,499	8008,579	8916,477
Pinus Nigra	PN11	176	78	4000	1056	1375	6,703	2310,187	28,976	9181,108	10694,240
Pinus Nigra	PN12	174	79	4000	1044	1375	5,755	1432,651	25,260	5723,867	7659,433
Pinus Nigra	PN13	175	78	4000	1050	1385	7,844	1682,515	32,421	6726,679	7129,739
Pinus Nigra	PN14	176	77	4000	1056	1385	7,339	2153,441	28,968	8589,894	10487,375
Pinus Nigra	PN15	176	78	4000	1056	1385	10,076	3557,092	36,686	14181,895	14164,152
Pinus Halepensis	PH1	178	86	4000	1068	1305	2,033	870,312	9,793	3470,290	9799,287
Pinus Halepensis	PH2	173	88	4000	1038	1305	5,084	2007,459	21,378	7995,854	11507,658
Pinus Halepensis	PH3	175	79	4000	1050	1305	5,049	2227,188	21,770	8868,940	13543,984
Pinus Halepensis	PH4	178	76	4000	1068	1305	5,346	1829,960	19,951	7278,168	12527,631
Pinus Halepensis	PH5	174	78	4000	1044	1305	5,104	2064,718	20,518	8218,992	14053,126
Pinus Halepensis	PH6	173	79	4000	1038	1305	8,853	4407,211	34,040	17549,742	18878,283
Pinus Halepensis	PH7	174	75	4000	1044	1305	5,219	1641,748	21,876	6597,287	10706,558
Pinus Halepensis	PH8	175	77	4000	1050	1305	4,079	1909,188	17,577	7571,592	14767,607
Pinus Halepensis	PH9	173	77	4000	1038	1305	4,503	1370,736	17,307	5558,405	11716,786

Pinus Halepensis	PH10	177	77	4000	1062	1305	4,851	1463,917	20,189	5836,870	9448,842
Pinus Halepensis	PH11	174	79	4000	1044	1305	5,752	2498,440	22,437	9986,093	15726,119
Pinus Halepensis	PH12	172	77	4000	1032	1305	6,983	3226,832	27,784	12844,624	17313,889
Pinus Halepensis	PH13	175	77	4000	1050	1305	2,892	1041,506	12,516	4153,848	11177,265
Pinus Halepensis	PH14	175	79	4000	1050	1305	6,119	2354,555	22,385	9390,285	14846,569
Pinus Halepensis	PH15	171	77	4000	1026	1305	3,745	1750,294	16,683	6951,568	15145,636
Pinus Halepensis	PH16	180	78	4000	1080	1305	9,071	3265,996	29,199	12984,771	15552,216

10.2.- DATOS RESISTENCIA A FLEXIÓN AXIAL

Especie	N° viga	Desplazamiento máquina (mm)	Fuerza aplicada (N)	Precarga (N)	Peso barra + apoyos (N)	Fuerza máxima (N)	MOR (N/mm ²)
Pinus Sylvestris	PS1	74,510	20371,0	100,0	270,0	20741,0	35,471
Pinus Sylvestris	PS2	85,660	21720,0	100,0	270,0	22090,0	38,057
Pinus Sylvestris	PS3	73,100	19413,0	100,0	270,0	19783,0	34,750
Pinus Sylvestris	PS4	99,770	25135,0	100,0	270,0	25505,0	43,254
Pinus Sylvestris	PS5	99,980	22737,0	100,0	270,0	23107,0	39,046
Pinus Sylvestris	PS6	134,970	32563,0	100,0	270,0	32933,0	58,616
Pinus Sylvestris	PS7	127,380	31061,0	100,0	270,0	31431,0	53,753

TABLAS DE RESULTADOS

Pinus Sylvestris	PS8	75,880	26256,0	100,0	270,0	26626,0	45,727
Pinus Sylvestris	PS9	75,860	26160,0	100,0	270,0	26530,0	47,833
Pinus Sylvestris	PS10	102,680	27302,0	100,0	270,0	27672,0	49,110
Pinus Sylvestris	PS11	70,620	29381,0	100,0	270,0	29751,0	51,749
Pinus Sylvestris	PS12	131,240	30632,0	100,0	270,0	31002,0	56,226
Pinus Sylvestris	PS13	80,480	27686,0	100,0	270,0	28056,0	51,394
Pinus Sylvestris	PS14	107,570	31203,0	100,0	270,0	31573,0	54,918
Pinus Sylvestris	PS15	107,890	31251,0	100,0	270,0	31621,0	54,378
Pinus Pinaster	PP1	98,680	25664,0	100,0	270,0	26034,0	41,793
Pinus Pinaster	PP2	100,410	27497,0	100,0	270,0	27867,0	44,756
Pinus Pinaster	PP3	59,280	17078,0	100,0	270,0	17448,0	28,696
Pinus Pinaster	PP4	94,300	30713,0	100,0	270,0	31083,0	48,566
Pinus Pinaster	PP5	72,130	24263,0	100,0	270,0	24633,0	40,438
Pinus Pinaster	PP6	67,840	22743,0	100,0	270,0	23113,0	37,316
Pinus Pinaster	PP7	90,730	29568,0	100,0	270,0	29938,0	49,147
Pinus Pinaster	PP8	71,980	25979,0	100,0	270,0	26349,0	43,093
Pinus Pinaster	PP9	70,760	27241,0	100,0	270,0	27611,0	46,791

TABLAS DE RESULTADOS

Pinus Pinaster	PP10	90,650	29378,0	100,0	270,0	29748,0	49,680
Pinus Pinaster	PP11	75,000	26571,0	100,0	270,0	26941,0	44,423
Pinus Pinaster	PP12	121,280	36480,0	100,0	270,0	36850,0	62,340
Pinus Pinaster	PP13	101,970	33102,0	100,0	270,0	33472,0	57,274
Pinus Pinaster	PP14	86,820	34714,0	100,0	270,0	35084,0	60,032
Pinus Pinaster	PP15	66,140	28839,0	100,0	270,0	29209,0	48,780
Pinus Nigra	PN1	79,720	19188,0	100,0	270,0	19558,0	34,297
Pinus Nigra	PN2	103,710	25850,0	100,0	270,0	26220,0	43,877
Pinus Nigra	PN3	70,010	21722,0	100,0	270,0	22092,0	37,824
Pinus Nigra	PN4	75,810	19987,0	100,0	270,0	20357,0	34,456
Pinus Nigra	PN5	70,130	18934,0	100,0	270,0	19304,0	32,434
Pinus Nigra	PN6	66,760	20096,0	100,0	270,0	20466,0	34,207
Pinus Nigra	PN7	45,180	11484,0	100,0	270,0	11854,0	20,659
Pinus Nigra	PN8	77,170	17200,0	100,0	270,0	17570,0	29,521
Pinus Nigra	PN9	62,480	16145,0	100,0	270,0	16515,0	27,991
Pinus Nigra	PN10	82,540	20033,0	100,0	270,0	20403,0	34,441
Pinus Nigra	PN11	82,560	22984,0	100,0	270,0	23354,0	39,872

TABLAS DE RESULTADOS

Pinus Nigra	PN12	78,610	14327,0	100,0	270,0	14697,0	25,347
Pinus Nigra	PN13	97,940	16824,0	100,0	270,0	17194,0	29,907
Pinus Nigra	PN14	76,470	21473,0	100,0	270,0	21843,0	38,051
Pinus Nigra	PN15	123,400	35490,0	100,0	270,0	35860,0	61,668
Pinus Halepensis	PH1	24,890	8692,0	100,0	270,0	9062,0	13,020
Pinus Halepensis	PH2	58,380	20017,0	100,0	270,0	20387,0	30,305
Pinus Halepensis	PH3	57,800	22190,0	100,0	270,0	22560,0	36,506
Pinus Halepensis	PH4	52,660	18229,0	100,0	270,0	18599,0	30,239
Pinus Halepensis	PH5	53,520	20572,0	100,0	270,0	20942,0	34,718
Pinus Halepensis	PH6	98,060	43898,0	100,0	270,0	44268,0	73,300
Pinus Halepensis	PH7	59,740	16489,0	100,0	270,0	16859,0	29,067
Pinus Halepensis	PH8	46,170	18933,0	100,0	270,0	19303,0	32,047
Pinus Halepensis	PH9	44,840	13895,0	100,0	270,0	14265,0	24,234
Pinus Halepensis	PH10	52,830	14602,0	100,0	270,0	14972,0	24,298
Pinus Halepensis	PH11	57,260	24968,0	100,0	270,0	25338,0	41,474
Pinus Halepensis	PH12	77,470	32119,0	100,0	270,0	32489,0	55,837
Pinus Halepensis	PH13	34,670	10400,0	100,0	270,0	10770,0	17,881

Pinus Halepensis	PH14	57,360	23497,0	100,0	270,0	23867,0	38,621
Pinus Halepensis	PH15	51,220	17398,0	100,0	270,0	17768,0	30,895
Pinus Halepensis	PH16	71,260	32480,0	100,0	270,0	32850,0	50,889

10.3.- PLANTILLA DATOS LANDSMONT

Se realizaron 61 roturas en maquina de ensayo a flexión. Debido a la gran cantidad de datos solo se muestra los valores del ensayo de la viga 1 de la especie pino silvestre.

Código	PS 1
Fuerza máx. (N)	Deflexión máx. (mm)
20371,000	74,510
Deflection (mm)	Force (N)
0,000	0,000
0,000	100,776
0,000	101,980
0,003	103,171
0,009	104,113
0,014	105,337
0,020	106,305
0,026	107,549
.....
76,080	5066,202
76,087	5070,099
76,096	5073,180
76,105	5077,053
76,111	5080,595
76,118	5083,873
76,126	5087,903
76,135	5091,568